

ISSN 1997-6011

Научно-практический журнал

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

19(3)' 2026

Москва, Издательство РГАУ-МСХА

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



ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

2026; Том 19, № 3

Учредитель и издатель:

**ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева**

Адрес учредителя и издателя:
127434, Российская Федерация,
г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

Журнал 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,
Прянишникова ул., 14, строение 7-7А
Тел.: 8 (499) 976-36-67
Email: prirodamgup@mail.ru
Сайт: environment.elpub.ru

Отпечатано в типографии
ООО «Офсет Принт»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 39, корп. 1
Тел: 8 (499) 976-24-85,
8 (916) 503-02-43

Подписано в печать 14.08.26 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 ВНИИГМ 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 ВНИИГМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)

ПОДПИСКА:

электронный каталог «Пресса России» <https://www.ppressa-rf.ru/cat/1/edition/t80746/>

Цена подписная



ISSN 1997-6011

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

2026;19(3)

Founder and Publisher:

**Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy**

Address of Founder and Publisher:
49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation

The 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, Pryanishnikov str., 14,
Moscow, 127434, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 976-36-67
Email: prirodamgup@mail.ru
Website : environment.elpub.ru

Printed in typography
OOO "Offset Print"
127550, Moscow,
Dmitrovskoe shosse, 39, building 1
Tel.: +7 (499) 976-24-85,
+7 (916) 503-02-43

Signed for print 14.08.26
Format 60 84/8, Circulation 500

When using the materials of the journal
in any form reference to the journal is obligatory.

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. Ismailylov, 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)

Bahadır 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

Р.С. Масный, О.А. Баев, Д.С. Рыбалко Современное состояние и проблемы эксплуатации каналов мелиоративных систем Российской Федерации	6
П.И. Пыленок, Р.О. Ефремов Управление мелиоративным режимом вовлекаемой в оборот деградированной торфяной почвы	17
Л.А. Журавлева, О.М. Кузина, Ю.А. Мырксина Влияние орошения дождеванием на физические и химические свойства почв Поволжья	25
Ф.К. Абдразаков, Т.М. Шадьяров, М.К. Онаев Обеспеченность водными ресурсами пастбищных территорий Западно-Казахстанской области	32
И.Н. Гаспарян, О.Н. Ивашова, Ш.В. Гаспарян, Н.Ф. Денискина Влияние изменения климата на уплотнение почвы	40
М.Е. Бельштина Оценка влияния экзогенных физических факторов на параметры роста и развития сельскохозяйственных культур	47
Н.С. Севрюгина, А.Ю. Фомин, А.С. Апатенко Автономный многофункциональный комплекс для удаления и утилизации борщевика Сосновского	55
И. Ичитегетсе Расчет режима орошения кукурузы для различных типов почв агроклиматического региона Имбо (Республика Бурунди) с использованием модели FAO CROPWAT	62
Т.И. Дровозова, С.А. Марьяш, М.В. Власов, Д.В. Мильченкова, Н.Н. Красовская Возможности применения доочищенных сточных вод молокоперерабатывающих заводов на орошение	72

Гидротехническое строительство

В.А. Фартуков, Г.М. Васильев Проблемы внедрения искусственного интеллекта в гидротехнике	80
Х. Алабар, Н.В. Ханов, Т.Ю. Жукова, А.В. Еремеев, Д.А. Алексеев Сравнение гидравлических характеристик бетонного полотна BeNotex SK и геомата Энкамат A20, заполненного щебнем с битумно-полимерным вяжущим	85
А.П. Крылов Перспективы развития низконапорных микро-ГЭС в составе гидротехнических сооружений	91

Гидравлика и инженерная гидрология

Р.В. Калинин, Ю.Г. Безбородов, А.А. Ткачев Гидрологическое обоснование параметров и конструкции водоотводящей системы в условиях техногенно-нагруженной территории г. Санкт-Петербурга (на примере парка академика Сахарова)	99
О.М. Розенталь, А.Г. Самбурский Краткосрочный прогноз мутности природной воды для оперативного регулирования режима ее водоочистки	106

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

М.А. Лавренов, П.А. Азарапин, А.А. Котов Оценка успешности интродукции лиственницы европейской (<i>Larix decidua</i> Mill.) на территории центра Европейской части России	115
О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, А.С. Гузалов, А.В. Куриленко, Д.А. Филимонов Определение начальной температуры термической деструкции лесных горючих материалов	123
В.К. Хлюстов, С.Г. Кокорин Типология календарных лет как инструмент обоснования адаптации лесного хозяйства Ленинградской области к климатическим изменениям	129
С.Н. Крючков, А.В. Солонкин, А.С. Соломенцева, С.А. Егоров, А.К. Романенко, Д.А. Горбушова Анализ роста и физиологических показателей гибридной формы дуба в засушливых условиях	136
Л.И. Аткина, Е.В. Москаленко, Л.П. Абрамова Характеристика насаждений на территории мужского монастыря во имя Святых Царственных Страстотерпцев в урочище Ганина Яма	145

Contents

Land reclamation, water economy and agrophysics

O.S. Masnyi, O.A. Baev, D.S. Rybalko Current state and problems of operation of canals of the reclamation systems of the Russian Federation	6
P.I. Pylenok, R.O. Efremov Management of the reclamation regime of the degraded peat soil involved in the circulation.....	17
L.A. Zhuravleva, O.M. Kuzina, Yu.A. Myrksina Influence of sprinkling irrigation on the physical and chemical properties of soils in the Volga region.....	25
Abdrazakov F.K., Shadyarov T.M., Ongayev M.K. Availability of water resources in the pasture areas of the West Kazakhstan region	32
I.N. Gasparyan, O.N. Ivashova, Sh.V. Gasparyan, N.F. Deniskina Impact of climate change on soil compaction	40
M.E. Belyshkina Assessment of the influence of exogenous physical factors on the parameters of growth and development of agricultural crops.....	47
N.S. Sevryugina, A.Y. Fomin, A.S. Apatenko Autonomous multifunctional complex for the removal and disposal of Sosnovsky hogweed.....	55
I. Icitetse Calculation of irrigation regime for maize on different soil types of the Imbo agro-climatic region (Republic of Burundi) using the FAO CROPWAT model	62
T.I. Drovovozova, S.A. Maryash, Vlasov M.V., D.V. Milchenkova, N.N. Possibilities for using treated wastewater from dairy processing plants for irrigation	72

Hydraulic engineering construction

V.A. Fartukov G.M. Vasiliev Problems of artificial intelligence implementation in ydraulic engineering	80
H. Alabar, N.V. Khanov, T.Yu. Zhukova, A.V. Ereemeev, A.D. Alekseev Comparison of hydraulic characteristics of Benotex SK concrete sheet and enkamat A20 geomat filled with crushed stone with bitumen-polymer binder.....	85
A.P. Krylov Prospects for the development of low-head micro-hydroelectric power plants as part of hydraulic structures.....	91

Hydraulics and engineering hydrology

R.V. Kalinichenko, Yu.G. Bezborodov, and A.A. Tkachev Hydrological justification of parameters and design of the water discharge system in the conditions of the technogenically loaded territory of St. Petersburg (on the example of academician Sakharov park)	99
O.M. Rozental, A.G. Samburskii Short-term forecasting of natural water turbidity for operational regulation of its water treatment	106

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

M.A. Lavrenov, P.A. Azarapin, A.A. Kotov Assessment of the success of european larch (<i>Larix decidua</i> Mill.) introduction in the territory of the center of the European part of Russia	115
O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, A.S. Guzalov, A.V. Kurilenko, D.A. Filimonov Determination of thermal decomposition temperature of forest combustible materials	123
V.K. Khlyustov, S.G. Kokorin Typology of calendar years as a tool for substantiating the adaptation of forestry in the Leningrad region to climate change	129
S.N. Kryuchkov, A.V. Solonkin, A.S. Solomentseva, S.A. Egorov, A.K. Romanenko, D.A. Gorbushova Analysis of the growth and physiological parameters of the hybrid form of oak in arid conditions.....	136
L.I. Atkina, E.V. Moskalenko, L.P. Abramova Characteristics of plantings on the territory of the monastery in the name of the Holy Royal Passion-Bearers in the Ganina Yama tract.....	145

Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Оригинальная статья

УДК 626.826

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-6-16>



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАНАЛОВ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Р.С. Масный¹, О.А. Баев^{2✉}, Д.С. Рыбалко³

^{1, 2, 3} Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации; г. Новочеркасск, Российская Федерация

¹ Rosniipm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0254-738X>

² Oleg-Baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

³ Ruba4eks@gmail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1838-0131>

Аннотация. Цель исследований – оценка современного состояния и выявление проблем эксплуатации мелиоративных каналов в Российской Федерации, а также анализ факторов, влияющих на снижение технической эффективности мелиоративных систем. В качестве материалов послужили результаты анализа исследований отечественных ученых, направленных на рациональное использование водных ресурсов в сельскохозяйственном секторе страны, статистические данные Минприроды России, отраслевая статистика, материалы Государственного доклада «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации», сведения по количеству сооружений ФГБНУ «РосНИИПМ» и данные интернет-портала ФГБНУ ВНИИ «Радуга». Применялись классические методы расчета гидравлических и фильтрационных параметров. Определение коэффициента полезного действия выполнялось в соответствии с рекомендациями СП 100.13330.2016. В работе показано значительное снижение объема водопотребления для нужд орошения, что в 3-4 раза ниже уровня 1970-1985 гг. Установлено, что порядка 42% каналов мелиоративных систем находится в работоспособном состоянии, о 25% сооружений данные мониторинга отсутствуют, а 87% каналов выполнены в земляном русле. Среднестатистическое значение КПД для подавляющего большинства каналов составляет 0,66, потери воды на фильтрацию достигают 40%. Техническое состояние подавляющего большинства каналов фактически оценивается как критическое. Основной проблемой является неудовлетворительное техническое состояние гидротехнических сооружений и открытой сети. Для устойчивого развития орошаемого земледелия, увеличения площадей орошения требуется комплексный подход, включающий в себя реконструкцию гидротехнических сооружений и повышение КПД до нормативных значений.

Ключевые слова: потери воды, мелиоративная система, оросительный канал, фильтрация, коэффициент полезного действия, открытая сеть

Для цитирования: Масный Р.С., Баев О.А., Рыбалко Д.С. Современное состояние и проблемы эксплуатации каналов мелиоративных систем Российской Федерации. Природообустройство. 2026;Т.19(3):6-16. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-6-16>

Scientific article

CURRENT STATE AND PROBLEMS OF OPERATION OF CANALS OF THE RECLAMATION SYSTEMS OF THE RUSSIAN FEDERATION

O.S. Masnyi¹, O.A. Baev^{2✉}, D.S. Rybalko³

^{1, 2, 3} Russian Research Institute of Land Reclamation Problems; Novocherkassk, Russian Federation

¹ Rosniipm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0254-738X>

² Oleg-Baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

³ Ruba4eks@gmail.ru; ORCID ID: 0009-0001-1838-0131

Abstract. Objective research – to assess the current state and identify problems in the operation of irrigation system canals in the Russian Federation, as well as to analyze the factors affecting the decrease in the technical efficiency of irrigation systems. **Materials and methods.** The materials used were

the results of the analysis of studies conducted by Russian scientists on the rational use of water resources in the agricultural sector of the country, statistical data from the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, industry statistics, materials from the State Report «On the State and Use of Water Resources in the Russian Federation», information on the number of facilities at the FSBSI «Russian Research Institute of Land Improvement Problems» and data from the Internet portal of the Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Research Institute of «Raduga». Classical methods were used to calculate hydraulic and filtration parameters. The determination of the coefficient of efficiency was performed in accordance with the recommendations of SP 100.13330.2016. **Results and discussion.** The study shows a significant decrease in water consumption for irrigation purposes (which is 3-4 times lower than in 1970-1985). It was found that approximately 42% of the canals in the irrigation systems are in good condition, 25% of the structures do not have monitoring data, and 87% of the canals are made of earth. The average efficiency value for the vast majority of canals is 0.66, and water losses due to filtration reach 40%. **Conclusions.** The technical condition of the vast majority of canals is actually assessed as «critical». The main problems are the unsatisfactory technical condition of hydraulic structures and the open network. To ensure sustainable development of irrigated agriculture and increase the area under irrigation, a comprehensive approach is required, including the reconstruction of hydraulic structures and improving the efficiency to the required standards.

Keywords: water losses, reclamation system, irrigation canal, filtration, efficiency, open network

For citation: Masnyi R.S., Baev O.A., Rybalko D.S. The Current State and Problems of Canal Exploitation in the Reclamation Systems of the Russian Federation. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):6-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-6-16>

Введение. Несмотря на высокий потенциал мелиорируемых земель Российской Федерации [1], существующие проблемы не позволяют гарантировать стабильное водоснабжение с целью орошения сельскохозяйственных угодий. Ряд объективных и субъективных факторов, связанных с высоким износом и неудовлетворительным техническим состоянием гидротехнических сооружений, обеспечивающих подачу водных ресурсов, неэффективное использование земель снижают темпы увеличения площадей орошения.

Для решения поставленной задачи предлагаются мероприятия в рамках «Государственной программы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» [2], включающие в себя как комплексную реконструкцию и модернизацию оросительных систем, так и меры, направленные на восстановление текущего состояния мелиорированных земель.

Другими факторами, ограничивающими увеличение площадей орошаемых земель, являются нарастающий дефицит водных ресурсов, который неминуемо приводит к увеличению стоимости воды, постепенное изменение климата, что особенно актуально для засушливых регионов страны. Группа ученых в одной из фундаментальных работ [3] отмечает недостаточную водообеспеченность многих отраслей экономики, в том числе сельского хозяйства на современном уровне развития и в планируемой перспективе, несоответствие водного режима и режима требований

к водным ресурсам, высокую изменчивость стока. При этом отмечается, что территориальное распределение стока находится в составе стратегических задач [3]. В подтверждение этому В.И. Данилов-Данильян отмечает неоднозначность ситуации. Несмотря на то, что Россия занимает второе место в мире по возобновляемым запасам воды, «...80% населения и столько же хозяйства сосредоточены в европейской части страны, а воды там 20% от наших запасов. И наоборот: 80% воды находится за Уралом, а населения там 20%»¹.

По прогнозам ученых [3], развитие глобального водного кризиса ожидается к 2030 г., что напрямую скажется на сельском хозяйстве и орошаемом земледелии.

Цель исследований: оценка современного состояния и выявление проблем эксплуатации мелиоративных каналов в Российской Федерации, а также анализ факторов, влияющих на снижение технической эффективности мелиоративных систем.

Материалы и методы исследований. Согласно сведениям [3] данных Минприроды², отраслевой статистики³ и Государственного Доклада⁴ объемы водопотребления в Российской Федерации на орошение с каждым годом

¹ Европейской части России грозит катастрофический дефицит воды. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.unepcom.ru/news/news-2021/4682-210913-water.html> (дата обращения: 21.04.2026).

² О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году: Государственный доклад. М.: Минприроды России; ФГБУ «ВНИИ Экология», 2025. 721 с.

сокращаются (22 км³ на 1985 г. [3] против 5,8 км³ на 2020 г. с долей на орошение 12% от суммарного водозабора (рис. 1).

Анализ данных рисунка 1 показывает, что максимальное значение общего водопотребления за весь анализируемый период зафиксировано в 1985 г. и составило 102,2 км³. В 1990-2000 гг. наблюдается снижение общего водопотребления с 96,2 до 66,9 км³, что соответствует сокращению на 30,5%. К основным причинам сокращения относится уменьшение площадей орошаемых земель, обусловленное как изменением структуры землепользования, так и ухудшением технического состояния мелиоративной инфраструктуры. В период 2000-2024 гг. общее водопотребление стабилизировалось в диапазоне 47-60 км³, достигнув минимального уровня 47,0 км³ в 2020 г., а к 2024 г. показатель возрос до 50,4 км³.

Современный объем водопотребления для целей орошения и сельхозводоснабжения (в среднем 6,4-6,5 км³ в 2020-2024 гг.) примерно в 3-4 раза ниже, чем в период 1970-1985 гг., что обусловлено не только снижением орошаемых площадей, но и внедрением современных технологий водопользования и водосбережения в сельском хозяйстве, а также техническим перевооружением мелиоративных систем и повышением эффективности использования водных ресурсов в аграрном секторе. Потери воды при транспортировке в России находятся на уровне 6,5-7,0 км³ в год, что более чем в 5 раз ниже аналогичного показателя в СССР (1970-1980 гг.). Основной причиной снижения потерь является сокращение

масштабов орошаемого земледелия, а также применение современных технологий строительства и реконструкции каналов и других гидротехнических сооружений [4].

Многие ученые и эксплуатирующие мелиоративные системы организации отмечают снижение технического уровня инфраструктуры и физический износ гидротехнических сооружений, обеспечивающих функционирование мелиоративного сектора, как основной показатель уменьшения водоподачи и сдерживающий фактор для увеличения площадей орошения.

Обширные исследования состояния мелиоративных систем Российской Федерации и Республики Беларусь содержат конкретные данные, подтверждающие озвученные выше предположения. Так, на основании выполненного мониторинга 3722 мелиоративных объектов авторами [5] получены некоторые сведения по физическому износу, достигающие 100%: «...открытая оросительная сеть – 75-90%, гидротехнические сооружения – 75-90%, насосные станции – 74-100%» [5]. При этом подавляющее большинство таких сооружений – это открытые каналы.

В Российской Федерации функционирует разветвленная сеть открытых каналов различного назначения: мелиоративных, энергетических, судоходных, комплексного назначения, рыбопропускных. Подавляющее большинство таких сооружений (а это порядка 87%) выполнено в земляном русле и характеризуется неудовлетворительным техническим состоянием, что напрямую сказывается на объеме потерь воды при ее транспортировке.

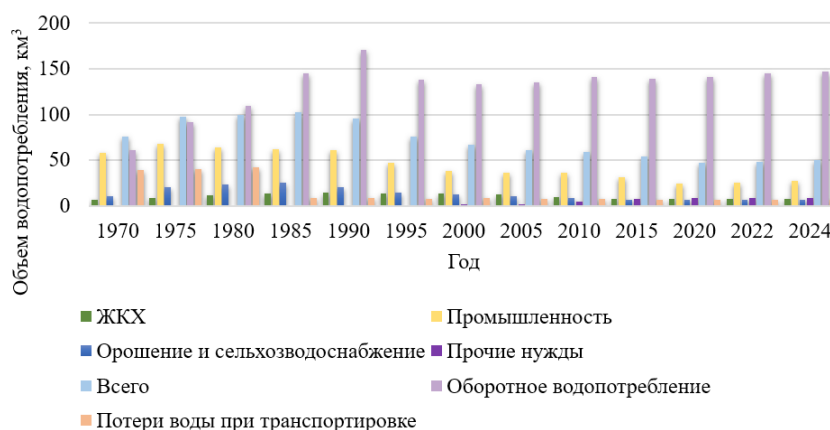


Рис. 1. Сведения о динамике использования воды

Fig. 1. Information on the dynamics of water use

³ Народное хозяйство РСФСР за 70 лет: Статистический ежегодник / НЗ0 Госкомстат РСФСР. М.: Финансы и статистика, 1987. 471 с.

⁴ О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2016 году: Государственный доклад. М.: НИИ-Природа, 2017. 300 с.

В соответствии с ГОСТ Р 70566-2022⁵ техническое состояние гидротехнических сооружений классифицируется по 5 категориям: неработоспособное, нормативное, ограниченно работоспособное, предельное/аварийное и работоспособное). На рисунке 2 представлены обобщенные сведения об уровне технического состояния каналов мелиоративных систем.

По данным проведенных исследований [6-8], порядка 42% каналов находится в работоспособном состоянии, требующем текущего ремонта. В неудовлетворительном техническом состоянии (ограниченно работоспособные и неработоспособные, требующие капитального ремонта, реконструкции или списания) – 20,5%, в нормативном состоянии – 13,3%. Одновременно с этим отсутствуют данные мониторинга о 25% сооружений, что не позволяет получить полное представление о реальном их состоянии. Объективно техническое состояние каналов в Российской Федерации следует оценивать как критическое. Основные проблемы связаны с высокой степенью физического износа гидротехнических сооружений, контрольно-измерительной аппаратуры и другой мелиоративной инфраструктуры, недостаточным проведением ремонтно-восстановительных работ.

В работе [6], на основе обобщения и анализа законодательных, нормативных правовых документов в области безопасности гидротехнических сооружений, а также различных публикаций, отмечается снижение технического состояния, и как следствие – безопасности подавляющего

большинства гидротехнических сооружений, в том числе на мелиоративных системах.

В одной из работ, посвященных оценке коэффициентов фильтрации и полезного действия каналов мелиоративных систем [9], приводятся следующие сведения: «...протяженность каналов, находящихся в государственности – 38684 км (из которых 23253 км – оросительные каналы и 15431 км – осушительные). Это также требует актуализации и учета действующих каналов (в том числе тех, что не в аварийном состоянии).

Данные о протяженности каналов мелиоративных систем разнятся, что обусловлено рядом причин. Во-первых, часть таких сооружений находится в частной собственности, что затрудняет их учет, а многие внутрихозяйственные распределители давно не эксплуатируются. Во-вторых, к каналам при их учете относят и другие водопроводящие гидротехнические сооружения (акведуки, дюкеры, тоннели, водовыпуски и др.). В-третьих, определенная часть каналов не эксплуатируется ввиду неудовлетворительного технического состояния, отсутствия подвешенных площадей орошения, снижения водопотребления, нехватки водных ресурсов [10].

На рисунке 3 представлены обобщенные сведения о протяженности и количестве каналов по федеральным округам (с учетом имеющихся у авторов данных, результатов мониторинга ФГБНУ «РосНИИПМ» и открытых сведений информационного портала ФГБНУ ВНИИ «Радуга»⁶.

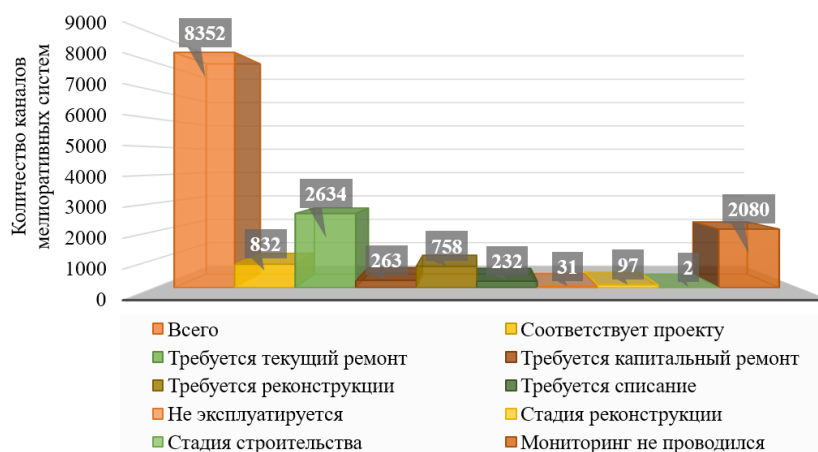


Рис. 2. Сведения об уровне технического состояния каналов мелиоративных систем за 2024 г.

Fig. 2. Information on the level of the technical condition of the canals of the reclamation systems for 2024

⁵ ГОСТ Р 70566-2022. Системы и сооружения мелиоративные. Правила обследования и мониторинга технического состояния: введ. 2022-12-16. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 16 с.

⁶ Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. Информационный портал ФГБНУ ВНИИ «Радуга». [Электронный ресурс]. URL: <https://inform-raduga.ru/gts> (дата обращения: 02.04.2026).

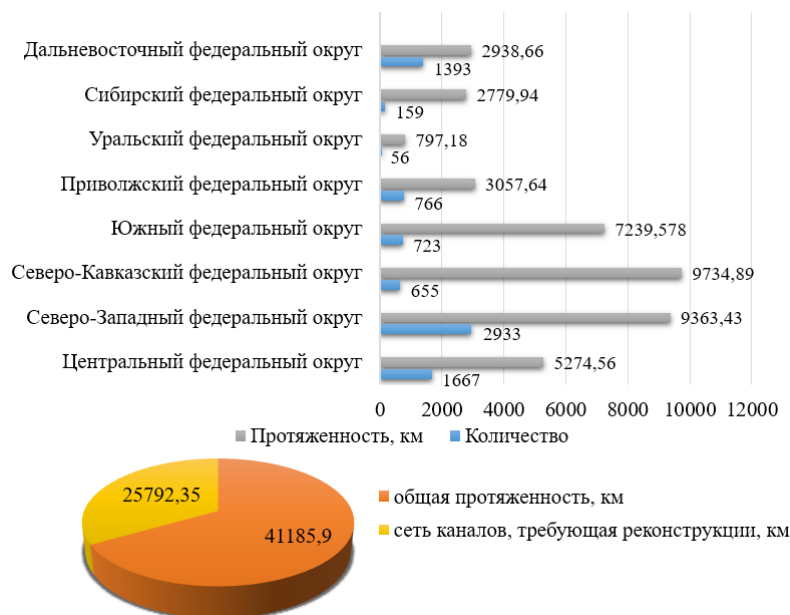


Рис. 3. Протяженность и количество каналов по федеральным округам

Fig. 3. Length and number of canals by federal districts

К причинам снижения эффективности функционирования каналов мелиоративных систем относятся [9]:

1. *Потери воды на фильтрацию через дно и откосы каналов*, которые в несколько раз превышают все остальные виды потерь. Такие потери зависят от типа и характеристик грунта, глубины уровня грунтовых вод, гидравлических характеристик, величины смоченной поверхности каналов, мутности воды и др.

2. *Потери воды на испарение*. Как правило, они не превышают 5% от общей величины потерь ввиду малой водной поверхности в каналах, с которой происходит испарение. С увеличением параметров канала и снижением скорости воды величина потерь на испарение будет неуклонно возрастать.

3. *Потери воды при водоучете*. Значительную долю составляют потери в случае неправильного учета воды при ее распределении. Необходимость поддержания горизонтов воды в каналах, отсутствие или применение устаревших приборов водоучета, погрешности измерения, техническое несовершенство мелиоративных систем оказывают влияние на потери воды.

В последние годы учеными в области мелиоративной гидротехники проведены обширные исследования, доказывающие необходимость реконструкции водопроводящих гидротехнических сооружений с применением геосинтетических и композитных материалов. В то же время исследования, выполненные производителями геосинтетики (например, «БентИзол» и др.), подтверждают эффективность применения геосинтетики

с целью снижения потерь воды в мелиоративном секторе страны [11-13].

Исследования, выполненные Н.Н. Дубенком, А.Е. Новиковым, Э.Б. Дедовой и др., а также крупными компаниями-производителями полимеров (например, «Сибур»), доказывают эффективность применения закрытой сети из трубопроводов на мелиоративных системах (особенно в регионах с жарким климатом) с целью снижения потерь воды на фильтрацию и испарение, что позволит повысить КПД до 0,95 и выше [14].

Исследования акад. В.А. Шевченко [15] подтверждают снижение показателей коэффициента полезного действия (КПД) ввиду интенсивных потерь воды на каналах мелиоративных систем: «Физический износ сооружений мелиоративно-водохозяйственного комплекса, достигающий 80% и более, низкие значения КПД мелиоративных систем определяют непроизводительные потери воды при орошении».

В работе [16] отмечается, что ряд намеченных «Водной стратегией Российской Федерации на период до 2020 года» показателей не достигнут. К основным причинам этого отнесены также снижение КПД, дефицит воды и одновременно непроизводительные потери водных ресурсов на уровне 30% и более, снижение уровня технического состояния оросительных систем.

Исследования казахстанских ученых [17] также показали, что потери воды на фильтрацию, составляющие до 50% от водозабора, напрямую связаны с выведением мелиорируемых земель из сельскохозяйственного оборота. Это обусловлено негативным воздействием фильтрационных

вод на прилегающие территории и дополнительными затратами на устройство дренажа и других мероприятий. При этом отмечается, что сокращение таких потерь можно обеспечить «...за счет реконструкции и модернизации оросительных сетей и устройства противofiltrационных облицовок каналов» [17].

Согласно исследованиям Г.К. Ризенкампа [18] сумма потерь воды в необлицованных каналах при транспортировке и водораспределении ($\sum Q_i$) достигает весьма больших значений, а КПД таких каналов является невысоким. На практике получается, что среднестатистические значения КПД подавляющего большинства необлицованных каналов (преимущественно магистральных и распределительных) находятся в пределах 0,66, то есть, порядка 1/3 воды по-прежнему теряется на фильтрацию при ее транспортировке.

На рисунке 4 представлены обобщенные сведения о типах русел каналов мелиоративных систем в процентном соотношении, полученные по результатам обобщения исследований [2, 5, 7, 9] и натурным данным. В то же время в классических исследованиях об основах ирригации [18] делается вывод о том, что новые необлицованные каналы мелиоративных систем имеют КПД ниже (порядка 0,40), чем находящиеся в длительной эксплуатации (0,65-0,70). В таком случае одним из ключевых показателем эффективности функционирования каналов, и как следствие – увеличения площадей орошения, необходимо считать техническое состояние мелиоративной инфраструктуры и гидротехнических сооружений.

Результаты и их обсуждение. Эксплуатация каналов мелиоративных систем неразрывно связана с двумя взаимовлияющими процессами: фильтрацией и гидравликой, что напрямую влияет на эксплуатационную надежность всей мелиоративной системы.

Выделим взаимосвязь фильтрационных и гидравлических особенностей эксплуатации каналов мелиоративных систем:

1. Влияние гидравлических процессов на фильтрационный режим каналов. Высокие скорости течения водного потока (как гидравлический фактор) и волновые явления приводят к разрушению защитных покрытий каналов, деформациям грунтовых русел. В результате создаются дополнительные пути фильтрации, снижаются физико-механические показатели конструкций гидротехнических сооружений, возникают риски образования аварийных ситуаций, что наиболее характерно для каналов.

2. Влияние фильтрационных процессов на гидравлический режим работы каналов. Процессы фильтрации из канала могут приводить к суффозии, образуя пустоты в дамбах каналов либо за облицовкой, создаются дополнительные гидравлические сопротивления, увеличивается шероховатость русел. В результате снижается пропускная способность каналов, происходят заиливание и зарастание русел, деформации ложа и откосов [19, 20].

3. Влияние зарастания и фильтрационных процессов. Результаты расчетов и исследований [21-23] наглядно демонстрируют, что не всегда зарастание оросительных каналов растительностью приводит к увеличению фильтрационных потерь. Как правило, длительно эксплуатируемые грунтовые (в том числе заросшие) каналы подвержены заиливанию и кольматации с течением времени и характеризуются меньшими потерями воды на фильтрацию по сравнению с теми, что подвергаются уходным работам (очистке от заиливания, удалению растительности), а также частично облицованные с нарушенными защитными (особенно бетонными и железобетонными) покрытиями.

На основании обобщенных исследований гидравлической эффективности оросительных каналов [8] отметим, что повышение показателя при зарастаемости оказывает значительное влияние на их функционирование, и как следствие – на потери воды, техническое состояние мелиоративных систем. Так, зарастание каналов в земляном русле повышает гидравлическую шероховатость в 2,5-4,0 раза (по данным 15 каналов и их участков [8]), что приводит к снижению их пропускной способности, недополучению воды конечным потребителем, повышению эксплуатационных и других затрат.

На рисунке 5 представлен график зависимости КПД и коэффициента шероховатости на каналах мелиоративных систем в зависимости от расходов воды.



Рис. 4. Сводные данные о типах русел каналов

Fig. 4. Summary data on types of canals channels

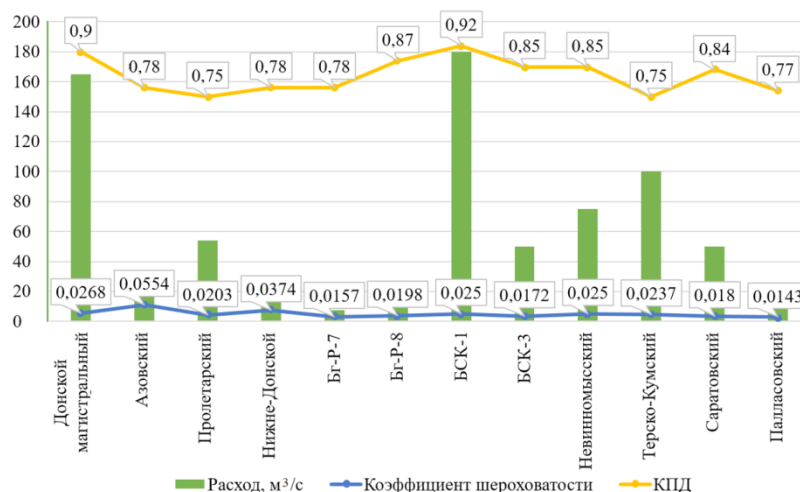


Рис. 5. График зависимости КПД и коэффициента шероховатости на каналах

Fig. 5. Graph of the dependence of efficiency and coefficient of roughness on the canals

В работах [24, 25] выделяют следующие основные критерии технической эффективности и эксплуатационной надежности каналов [25]:

- 1) по пропускной способности:

$$\alpha' \cdot Q_{\text{пр}} \leq Q \leq Q_{\text{пр}}; \quad (1)$$

- 2) по допустимым скоростям:

$$U_{\text{нез}} < U \leq U_{\text{нер}}; \quad (2)$$

- 3) по относительной ширине русла:

$$\beta_{\text{г.н}} < \beta \leq \beta_{\text{max}}; \quad (3)$$

- 4) по коэффициенту полезного действия:

$$\beta' \cdot \eta_{\text{нор}} \leq \eta \leq \eta_{\text{нор}}; \quad (4)$$

- 5) по показателю технического состояния:

$$\sigma' \cdot P_{\text{Т.С.пр}} \leq P_{\text{Т.С}} \leq P_{\text{Т.С.тр}}; \quad (5)$$

- 6) по показателю безопасности работы:

$$P_{\text{бнор}} \leq P_{\text{б}} \leq P_{\text{бmax}}, \quad (6)$$

где Q , $Q_{\text{пр}}$ – фактическая и проектная пропускная способность; α' – показатель снижения пропускной способности; U , $U_{\text{нез}}$, $U_{\text{нер}}$ – допускаемая незаилающая и неразмывающая скорости; β , $\beta_{\text{г.н}}$, β_{max} – фактическая, гидравлически наивыгоднейшая и максимальная относительная ширина канала по дну; η , $\eta_{\text{нор}}$ – фактический и нормативный КПД; β' – показатель снижения КПД вследствие влияния неучтенных факторов; $P_{\text{б}}$, $P_{\text{бнор}}$ – фактический и нормальный (по СП 58.13330.2019) показатели безопасной работы; $P_{\text{бmax}}$ – максимальное значение показателя безопасной работы (соответствующее для ГТС I класса); $P_{\text{Т.С}}$, $P_{\text{Т.С.пр}}$ – показатели технического состояния канала (фактический и требуемый); σ' – коэффициент снижения показателя технического состояния.

В таблице 1 представлено влияние основных параметров (гидравлических, фильтрационных, технического состояния и КПД) на показатели технической эффективности и надежности, и как следствие – снижение площадей орошения. Как следует из данных таблицы 1,

эксплуатационные параметры каналов мелиоративных систем находятся в тесной взаимосвязи, причем гидравлические и фильтрационные характеристики выступают в качестве первичных факторов, а КПД является интегральным показателем, обобщающим их влияние. Снижение гидравлической эффективности и увеличение фильтрационных потерь приводят к уменьшению значения КПД ниже нормативного, что ведет не только к уменьшению объема подачи воды потребителям (снижению технической эффективности), но и к росту аварийных ситуаций, подтоплению и деградации орошаемых земель, снижению безопасности гидротехнических сооружений (снижению эксплуатационной надежности).

Последствия снижения технической эффективности и эксплуатационной надежности каналов заключаются в фактическом снижении орошаемых площадей, в том числе ввиду отсутствия технической возможности системы подавать требуемый объем воды на орошение.

В таблице 2 представлены сценарии, основанные на принципе влияния показателей КПД на объем оросительной воды и орошаемую площадь.

Представленные сценарии демонстрируют прямую зависимость коэффициента полезного действия оросительной сети (η) и доли воды, фактически доходящей до потребителей. Снижение показателя (η) с нормативного до низкого приводит к росту потерь воды с 3 до 40%, что в свою очередь сокращает фактически орошаемую площадь от проектной до 60-74%. В «низком» сценарии, помимо снижения урожайности, могут проявляться процессы деградации почв, а именно вторичное засоление, подтопление, заболачивание или опустынивание.

Таблица 1. Влияние эксплуатационных параметров и технического состояния на эксплуатационную надежность и техническую эффективность каналов мелиоративных систем

Table 1. Influence of operational parameters and technical condition on operational reliability and technical efficiency of channels of reclamation systems

Параметр	Фактор	Влияние на техническую эффективность	Влияние на эксплуатационную надежность
Гидравлический	Изменение гидравлических характеристик русла (коэффициент шероховатости, n), увеличение смоченного периметра и живого сечения, снижение гидравлического радиуса и средней скорости водного потока	Увеличение гидравлических сопротивлений и снижение пропускной способности канала приводит к невозможности подачи расчетного объема воды в установленный срок	Переливы воды через дамбы и разрушение откосов снижают общую надежность гидротехнических сооружений, колебание уровней воды влияет на характер потерь
Фильтрационный	Высокий коэффициент фильтрации грунтов основания, свободная и (или) подпертая фильтрация (при близком залегании УГВ на глубине 0,3-2,5 м)	Фильтрационные потери напрямую снижают КПД мелиоративной системы, и как следствие – их техническую эффективность	Увеличивается риск подтопления прилегающих территорий, заболачивания и вторичного засоления почв, что ведет к деградации орошаемых земель, выбытию их из сельскохозяйственного оборота
Техническое состояние	Зарастание и заиливание русла, деформации откосов (размывы, оползание), разрушение защитных покрытий, деформационных и гидроизоляционных швов	Увеличивается шероховатость и уменьшается живое сечение канала, что приводит к снижению пропускной способности	Повышается аварийность (разрушение сооружений, снижение эксплуатационных характеристик), снижаются срок службы и безотказность работы системы в целом
Коэффициент полезного действия	КПД магистрального канала (η) – интегральный показатель, зависящий от гидравлических и фильтрационных потерь. Нормативное значение регламентируется в соответствии с СП 100.13330.2016 ⁷	При снижении КПД ниже нормативного значения система не может обеспечить требуемую эффективность использования водных ресурсов	Характеризует общую надежность системы водоподдачи; низкий КПД требует постоянного регулирования объема водоподдачи; повышается риск дефицита для водопотребителей

Таблица 2. Сценарии влияния КПД на орошаемые площади и потери воды

Table 2. Scenarios of efficiency impact on irrigated areas and water losses

Показатель Indicator	Нормативный сценарий ($\eta = 0,90-0,97$) / Normative Scenario ($\eta = 0,90-0,97$)	Пониженный сценарий ($\eta = 0,75-0,89$) / Reduced Scenario ($\eta = 0,75-0,89$)	Низкий сценарий ($\eta = 0,60-0,74$) / Low scenario ($\eta = 0,60-0,74$)
Подача воды к голове канала, $W_{\text{год}}, \text{ млн м}^3$ / Water supply to the head of the canal, $W_{\text{head}}, \text{ million m}^3$	100	100	100
Потери (фильтрация, испарение, сбросы), % / Losses (filtration, extraction, discharges), %	3-10%	11-25%	26-40%
Подача воды потребителям, $W_{\text{потр}}, \text{ млн м}^3$ / Water supply to consumers, $W_{\text{cons}}, \text{ million m}^3$	90-97	75-89	60-74
Фактически орошаемая площадь, $F_{\text{факт}} (\% \text{ от проектной})$ / Actual irrigated area, $F_{\text{actual}} (\% \text{ of project area})$	90-97%	75-89%	60-74%
Сокращение орошаемой площади, % / Reduction of irrigated area, %	3-10%	11-25%	26-40%
Последствия для орошаемого земледелия / Impact on irrigated agriculture	Урожайность соответствует плану / Yields match the plan	Недополив сельскохозяйственных угодий, снижение орошаемых площадей, уменьшение урожайности / Underwatering of agricultural land, reduction of irrigated areas, decrease in yields	Снижение урожайности, вывод сельхоз земель из оборота, вторичное засоление и заболачивание почв / Decrease in yields, withdrawal of agricultural land from circulation, secondary salinization and waterlogging of soils

⁷ Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85: СП 100.13330.2016: утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г.: введ. в действие с 17 июня 2017 г. М.: Изд-во стандартов, 2017. 209 с.

Гидравлические характеристики водного потока непосредственно оказывают влияние на фильтрационные параметры как облицованных, так и необлицованных каналов, поэтому при оценке фильтрационных потерь требуется учет гидравлических параметров, а именно скорости течения, глубины заполнения, гидравлической шероховатости.

Выводы

1. Анализ результатов исследований показал, что лишь порядка 13,3% каналов мелиоративных систем соответствует проектному (нормативному) техническому состоянию, а более 20,5% находится в ограниченно работоспособном и неработоспособном состояниях; данные мониторинга по 25% сооружений отсутствуют. Техническое состояние мелиоративных каналов не только напрямую снижает безопасность и надежность гидротехнических сооружений, но и влияет на развитие орошаемого земледелия в целом. При этом среднестатистические показатели КПД подавляющего большинства необлицованных каналов не превышают 0,66 (при нормативном значении ($\eta = 0,90-0,97$), а потери воды достигают 40% от общего водозабора. Недооценка проблем фильтрации и гидравлической эффективности каналов

мелиоративных систем значительно повышает риски недополучения урожаев, особенно в засушливых регионах. Решению вопроса потерь воды на мелиоративных системах требуется уделять внимание не как технической, а как стратегической государственной задаче в рамках обеспечения продовольственной безопасности страны.

2. Для поддержания устойчивого функционирования мелиоративных систем и увеличения площадей орошаемого земледелия, наращивания объемов производства сельхозпродукции Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации одним из направлений предусмотрено снижение потерь в сельском хозяйстве. Кроме того, для достижения целевых показателей, предусмотренных Государственной программой эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации (с 2022 по 2031 гг.), необходим комплексный подход, включающий в себя: реконструкцию подавляющего большинства гидротехнических сооружений и мелиоративной инфраструктуры; применение закрытой водопроводящей сети в регионах с жарким климатом; внедрение современных технологий водочета на мелиоративных системах.

Список использованных источников

1. Колганов А.В., Масный Р.С., Балакай Г.Т. Потенциал мелиорированных земель России // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 1. С. 1-18. DOI: 10.31774/2712-9357-2026-16-1-1-18
2. Дубенок Н.Н., Ольгаренко Г.В. Перспективы восстановления мелиоративного комплекса Российской Федерации // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2021. № 2. С. 56-59. DOI: 10.30850/vrsn/2021/2/56-59. EDN: NUEFIY
3. Козлов Д.В. и др. Вода или нефть? Создание единой водохозяйственной системы: Монография / Под ред. Д.В. Козлова. М.: МППА БИМПА, 2008. 456 с. EDN: TEXWGP
4. Баев О.А. Развитие исследований, посвященных теории фильтрации из каналов // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 1. С. 130-154. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-1-130-154>. EDN: HOAVHG
5. Ольгаренко Д.Г. Технический уровень и эффективность эксплуатации мелиоративных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 4 (20). С. 287-295. EDN: UXLZTL
6. Щедрин В.Н., Косиченко Ю.М., Бакланова Д.В. Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. 282 с. EDN: WUYTAT
7. Косиченко Ю.М. Каналы переброски стока России: Учебное пособие. Новочеркасск: НГМА, 2004. 240 с. EDN: RNTAIR
8. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, № 8. С. 1147-1162. EDN: OUXBGA

References

1. Kolganov A.V., Masnyj R.S., Balakaj G.T. Potencial meliorirovannyh zemel' Rossii // Melioraciya i gidrotekhnika. 2026. Vol. 16, No 1. P. 1-18. DOI: 10.31774/2712-9357-2026-16-1-1-18
2. Dubenok N.N., Ol'garenko G.V. Perspektivy vosstanovleniya meliorativnogo kompleksa Rossijskoj Federacii // Vestnik rossijskoj sel'skhozaystvennoj nauki. 2021. No 2. P. 56-59. DOI: 10.30850/vrsn/2021/2/56-59. EDN: NUEFIY
3. Voda ili neft'? Sozdanie edinoj vodohozyajstvennoj sistemy / D.V. Kozlov [i dr.]; pod red. D.V. Kozlova. M.: MPPA BIMPA, 2008. 456 p. EDN: TEXWGP
4. Baev O.A. Razvitie issledovanij, posvyashchennyh teorii fil'tracii iz kanalov // Melioraciya i gidrotekhnika. 2025. Vol. 15, No 1. P. 130-154. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-1-130-154>
5. Ol'garenko D.G. Tekhnicheskij uroven' i effektivnost' ekspluatcii meliorativnyh sistem // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii. 2015. Vol 4 (20). P. 287-295. EDN: HOAVHG
6. Shchedrin V.N. Obespechenie bezopasnosti i nadezhnosti nizkonapornyh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij / V.N. Shchedrin Yu.M. Kosichenko D.V. Baklanova. Novocherkassk: RosNIIPM, 2016. 282 p. EDN: WUYTAT
7. Kosichenko Yu.M. Kanaly perebroski stoka Rossii. Novocherkassk: NGMA, 2004. 240 p. EDN: RNTAIR
8. Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Gidravlicheskaya effektivnost' orositel'nyh kanalov pri ekspluatcii // Vestnik MGSU. — 2020. Vol. 15. No 8. Pp. 1147-1162. EDN: OUXBGA
9. Talalaeva V.F., Baev O.A. Rezul'taty ocenki koefficienta poleznogo dejstviya neoblicovannyh meliorativnyh

9. Талалаева В.Ф., Баев О.А. Результаты оценки коэффициента полезного действия необлицованных мелиоративных каналов // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 1. С. 23-42. DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-1-23-42. EDN: EUKHKB
10. Кузьмичев А.А. Обоснование приоритетности и очередности проведения ремонтно-восстановительных работ на мелиоративных системах на примере канала Бг-Р-8-1 Багаевской оросительной системы // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 4. С. 231-242. DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-231-242
11. Косиченко Ю.М., Баев О.А., Яковлев В.А. Об эффективности применения бентонитовых геокомпозилов на объектах водохозяйственного комплекса // Гидротехника. 2022. № 1. С. 65-69. EDN: FMQJSN
12. Ищенко А.В., Баев О.А. Оценка эффективности противотрационного экрана на Донском магистральном канале // Градостроительство и архитектура. 2017. Т. 7, № 4. С. 67-72. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.11. EDN: YVSVJR
13. Беляков О.А., Абдразаков Ф.К. Изучение эффективности использования гидроизоляционных материалов на облицованных оросительных каналах // Основы рационального природопользования: Материалы XI Национальной конференции с международным участием. Саратов: ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2025. С. 26-31. EDN: PXSXFC
14. Данилов-Данильян В.И. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России / Институт устойчивого развития; Центр экологической политики России. М.: ООО «Типография ЛЕВКО», 2009. 88 с.
15. Шевченко В.А., Исаева С.Д., Дедова Э.Б., Наумова Т.В. Современные вопросы совершенствования организационно-правовой базы мелиорации земель // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2023. № 1. С. 63-67. EDN: OLADUT
16. Шевченко В.А., Исаева С.Д., Дедова Э.Б. Новый этап развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93, № 4. С. 355-361. EDN: SDJBQR
17. Способ устранения фильтрационных потерь воды на оросительным межхозяйственным и внутрихозяйственных каналах: Патент КЗ № 31365 / Умбетаев И., Абишев И.А., Бигараев О.К. Оpubл. 29.07.2016; Бюл. № 8.
18. Ризенкамф Г.К. Основы ирригации. Т. 1. Л.: 2-я тип. Транспечати НКПС им. тов. Лоханкова, 1925. 604 с.
19. Игнатенко Е.В., Брянская Ю.В. Распределение скоростей в каналах различной геометрии и шероховатости // Гидротехническое строительство. 2023. № 4. С. 50-53. EDN: TQMPBC
20. Шкура В.Н., Шевченко А.В. О коэффициенте шероховатости и параметре Шези для гидравлического расчета рыбоходно-нерестовых каналов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 92, № 1. С. 226-245
21. Косиченко Ю.М., Гуринов К.Г. Определение приведенного коэффициента шероховатости для неоднородного русла по длине // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 1997. № 3. С. 85-88
22. Гуринов К.Г. Оценка гидравлической эффективности каналов // Мелиорация и водное хозяйство: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Шумаковские чтения), г. Новочеркасск, 25 сентября 2024 г. Новочеркасск: Лик, 2024. С. 189-194
23. Ткачев А.А., Ольгаренко И.В. Современные проблемы в управлении водораспределением в магистральных каналах оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2021. Т. 11, № 2. С. 1-23. DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. EDN: NTRFMJ
24. Колганов А.В., Косиченко Ю.М. Гидравлическая эффективность и надежность оросительных каналов. М.: Издательство «Roma», 1997. 160 с. EDN: NTBGA
25. Kuz'michev A.A. Obosnovanie prioritetnosti i ocherednosti provedeniya remontno-vosstanovitel'nykh rabot na meliorativnykh sistemah na primere kanala Bg-R-8-1 Bagaevskoy orositel'noy sistemy // Melioraciya i gidrotekhnika. 2024. Vol. 14, No 4. P. 231-242. DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-231-242.
26. Koshchenko Yu.M., Baev O.A., Yakovlev V.A. Ob effektivnosti primeneniya bentonitovykh geokompozitov na ob'ektakh vodohozyajstvennogo kompleksa // Gidrotekhnika. 2022. No 1. P. 65-69. EDN: FMQJSN
27. Ishchenko A.V., Baev O.A. Ocenka effektivnosti protivofiltratsionnogo ekrana na Donskom magistral'nom kanale // Gradostroitel'stvo i arhitektura. 2017. Vol. 7, No 4. P. 67-72. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.11. EDN: YVSVJR
28. Belyakov O.A., Abdrazakov F.K. Izuchenie effektivnosti ispol'zovaniya gidroizolyacionnykh materialov na oblicovannykh orositel'nykh kanalah // Osnovy racional'nogo prirodoopol'zovaniya: materialy XI Nacional'noj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Saratov: FGBOU VO Vavilovskij universitet, 2025. P. 26-31. EDN: PXSXFC
29. Danilov-Daniilyan V.I. Vodnye resursy mira i perspektivy vodohozyajstvennogo kompleksa Rossii. – M.: OOO «Tipografiya LEVKO», Institut ustojchivogo razvitiya / Centr ekologicheskoy politiki Rossii, 2009. 88 p.
30. Shevchenko V.A. Sovremennyye voprosy sovershenstvovaniya organizacionno-pravovoj bazy melioratsii zemel' / V.A. Shevchenko, S.D. Isaeva, E.B. Dedova, T.V. Naumova // Vestnik rossijskoy sel'skhozoyajstvennoy nauki. 2023. No 1. P. 63-67. EDN: OLADUT
31. Shevchenko V.A., Isaeva S.D., Dedova E.B. Novyy etap razvitiya meliorativno-vodohozyajstvennogo kompleksa Rossijskoy Federatsii // Vestnik Rossijskoy akademii nauk. 2023. Vol. 93. No 4. P. 355-361. EDN: SDJBQR
32. Patent KZ № 31365. Sposob ustraneniya fil'tracionnykh poter' vody na orositel'nykh mezhkhozoyajstvennom i vnutrihozyajstvennykh kanalah. Umbetaev I., Abishev I.A., Bigaraev O.K., opubl. 29.07.2016, byul. № 8.
33. Rizenkamp G.K. Osnovy irrigatsii. T. 1. L.: 2-ya tip. Transpechati NKPS im. tov. Lohankova, 1925. 604 p.
34. Ignatenko E.V., Bryanskaya Yu.V. Raspredelenie skorostej v kanalah razlichnoj geometrii i sherohovatosti Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. 2023. No 4. P. 50-53. EDN: TQMPBC
35. Shkura V.N., Shevchenko A.V. O koeffitsiente sherohovatosti i parametre Shezi dlya gidravlicheskogo rascheta rybohodno-nerestovykh kanalov // Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya. 2024. Vol. 92, No 1. P. 226-245.
36. Koshchenko Yu.M., Gurin K.G. Opredelenie privedennogo koeffitsienta sherohovatosti dlya neodnorodnogo rusla po dline // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki, 1997. No 3. P. 85-88.
37. Gurin K.G. Ocenka gidravlicheskoy effektivnosti kanalov // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo: materialy Vserossijskoy nauchno-prakticheskoy konferencii (Shumakovskie chteniya), g. Novocherkassk, 25 sent. 2024 g. Novocherkassk: Lik, 2024. P. 189-194.
38. Tkachev A.A., Ol'garenko I.V. Sovremennyye problemy v upravlenii vodoraspredeleniem v magistral'nykh kanalah orositel'nykh sistem // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioratsii. 2021. Vol. 11, No 2. P. 123. DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. EDN: NTRFMJ
39. Kolganov A.V., Koshchenko Yu.M. Gidravlicheskaya effektivnost' i nadezhnost' orositel'nykh kanalov. M.: Izdatel'stvo «Roma», 1997. 160 p. EDN: NTBGA

24. Колганов А.В. Косиченко Ю.М. Гидравлическая эффективность и надежность оросительных каналов: Монография. М.: Издательство «Рома», 1997. 160 с. EDN: NTBGAА

25. Косиченко Ю.М., Угроватова Е.Г. Гидравлическая эффективность и эксплуатационная надежность крупных каналов территориального перераспределения стока // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2013. № 2 (10). С. 157-174. EDN: QALPEN

Информация об авторах

Роман Степанович Масный – врио директора, канд. воен. наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, AuthorID: 618663, ORCID ID: 0000-0002-6149-5073; rosniiipm@yandex.ru

Олег Андреевич Баев – ведущий научный сотрудник, д-р техн. наук, доцент, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации; AuthorID: 699695, ORCID ID: 0000-0003-0142-4270; Oleg-Baev1@yandex.ru

Дмитрий Сергеевич Рыбалко – аспирант, научный сотрудник Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, ORCID ID: 0009-0001-1838-0131; Ruba4eks@gmail.ru

Вклад авторов

Р.С. Масный – статическая обработка данных, редактирование рукописи.

О.А. Баев – подготовка текста рукописи, выполнение расчетов
Д.С. Рыбалко – формулировка выводов, подготовка графических материалов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Поступила в редакцию / Received 25.03.2026

Поступила после доработки и рецензирования / Received 19.05.2026

Принята к публикации / Accepted 19.05.2026

25. Kosichenko Yu.M., Ugrovatova E.G. Gidravlicheskaya effektivnost' i ekspluatatsionnaya nadezhnost' krupnyh kanalov territorial'nogo pereraspredeleniya stoka // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii. 2013. No 2 (10). P. 157-174. EDN: QALPEN

Information about the authors

Roman S. Masnyi – Acting Director, CSs (military), Russian Research Institute of Land Reclamation Problems, AuthorID: 618663, ORCID ID: 0000-0002-6149-5073; rosniiipm@yandex.ru

Oleg A. Baev – Leading Researcher, DSs (Tech). Associate Professor, Russian Research Institute of Land Reclamation Problems, AuthorID: 699695, ORCID ID: 0000-0003-0142-4270; AuthorID: 699695, ORCID ID: 0000-0003-0142-4270; Oleg-Baev1@yandex.ru

Dmitry S. Rybalko – Postgraduate Student, Researcher, Russian Research Institute of Land Reclamation Problems, ORCID ID: 0009-0001-1838-0131; Ruba4eks@gmail.ru

Contribution of the authors

R.S. Masny – static data processing, manuscript editing.

O.A. Baev – preparation of the text of the manuscript, performing calculations.

D.S. Rybalko – formulation of conclusions, preparation of graphic materials.

Оригинальная статья

УДК 631.62:631.458

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-17-24>

УПРАВЛЕНИЕ МЕЛИОРАТИВНЫМ РЕЖИМОМ ВОВЛЕКАЕМОЙ В ОБОРОТ ДЕГРАДИРОВАННОЙ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ

П.И. Пыленок^{1✉}, Р.О. Ефремов²^{1,2}Мещерский филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»; г. Рязань, Российская Федерация¹petr.pylenok@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-7621-2331²ruslan260599@gmail.com; ORCID:0009-0007-0045-5039

Аннотация. Цель исследований – управление мелиоративным режимом деградированной торфяной почвы для повышения продуктивности и экологической устойчивости мелиорируемого агроландшафта в условиях Нечерноземной зоны РФ. Использованы такие материалы и методы исследований, как системный анализ, балансовый метод и полевой деляночный опыт с раннеспелым картофелем. В опытных условиях апробирована технология вовлечения в оборот залежной деградированной торфяной почвы (агрозема), включающая в себя операции вспашки залежи, фрезерование и применение оперативного гидромелиоративного рециклинга для увлажнения агрозема. При этом достигнуты разуплотнение пахотного слоя почвы в 1,2 раза по сравнению с залежью и повышение потенциального плодородия. В условиях умеренно жаркого и средневлажного вегетационного периода был проведен один полив дренажными водами нормой 25 мм. С поливной водой в почву поступало около 4 кг/га аммония и более 10 кг/га углерода. Средний модуль дренажного стока составил 0,176 л/с · га. Среднесуточная природная промываемость почвы, формируемая атмосферными осадками, составила 2,2 мм/сут., технологическая промываемость почвы отсутствовала. Обработка клубней картофеля гуматом калия достоверно повышала урожайность по сравнению с контролем на 1,96 т/га, или на 7,56%. Использование увлажнения повышало урожайность на 2,1 т/га, или на 8,1%, по сравнению с контролем. Совместное применение увлажнения и гумата калия повышало урожайность по сравнению с использованием гумата калия на 1,39 т/га, или на 4,98%, и на 1,25 т/га, или на 4,46%, по сравнению с использованием увлажнения. Относительно общего расхода воды при водопотреблении на единицу продукции наиболее эффективным оказался вариант с внесением гумата калия – 57,7 м³/т. Относительно расхода поливной воды наиболее эффективным является вариант с совместным применением увлажнения и гумата калия (8,5 м³/т), а наиболее затратным – вариант с увлажнением (8,9 м³/т).

Ключевые слова: агрозем, осушение, увлажнение, дренажные воды, промываемость почвы, мониторинг, залежь, картофель, урожайность, ресурсоемкость

Формат цитирования: Пыленок П.И., Ефремов Р.О. Управление мелиоративным режимом вовлекаемой в оборот деградированной торфяной почвы. Природообустройство. 2026;Т.19(3):17-24. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-17-24>

Scientific article

MANAGEMENT OF THE RECLAMATION REGIME OF THE DEGRADED PEAT SOIL INVOLVED IN THE CIRCULATION

P.I. Pylenok^{1✉}, R.O. Efremov²^{1,2}The St. Petersburg Branch of the A.N. Kostyakov Federal State Budgetary Scientific Research Center VNIIGiM; Ryazan, Russian Federation¹petr.pylenok@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-7621-2331²ruslan260599@gmail.com; ORCID:0009-0007-0045-5039

Abstract. The purpose of the research is to manage the reclamation regime of degraded peat soil to increase productivity and environmental sustainability of reclaimed agricultural landscapes in the Non-Chernozem zone of the Russian Federation. Materials and methods: system analysis, balance method and field experience with early-ripening potatoes. Under experimental conditions, the technology of involving degraded peat soil (agrozem) into circulation, including plowing operations, milling, and the use of operational hydro-reclamation recycling to moisten the agrozem, has been tested. At the same time, decompression of the arable soil layer by 1.2 times compared with the fallow and an increase in potential fertility was

achieved. In the prevailing hydrometeorological conditions of the moderately hot and moderately humid growing season, one irrigation with drainage waters of 25 mm was carried out. Irrigation water supplied about 4 kg/ha of ammonium and more than 10 kg/ha of carbon to the soil. The average drainage flow modulus was 0.176 l/s • ha. The average daily natural soil washability, formed by atmospheric precipitation, was 2.2 mm/day in the absence of technological washability. Treatment of potato tubers with potassium humate significantly increased yields by 1.96 t/ha, or 7.56%, compared with the control. Humidification increased yields by 2.1 t/ha, or 8.1% compared to the control. The combined use of moisture and potassium humate increased yields by 1.39 t/ha, or 4.98%, and by 1.25 t/ha, or 4.46%, compared with potassium humate. According to the total water consumption per unit of production, the most effective option was the addition of potassium humate – 57.7 m³/t. In terms of irrigation water consumption, the most effective option is with the combined use of humidification and potassium humate – 8.5 m³/t, and the most expensive option with humidification – 8.9 m

Keywords: agrozem, drainage, humidification, drainagewaters, soilwashability, monitoring, deposit, potato, yield, resource intensity

For citation: Pylenok P.I., Efremov R.O. Management of the reclamation regime of the degraded peat soil involved in the circulation. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):17-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-17-24>

Введение. Осушение торфяных болот для сельскохозяйственного использования наряду с преимуществами получения дополнительной продукции имеет ряд существенных недостатков, связанных с потерей органического вещества торфа, эмиссией диоксида углерода, возрастанием рисков торфяных пожаров, загрязнением и эвтрофированием природных вод [1-4]. Для ослабления этих антропогенных воздействий применяются рециклинговые гидромелиоративные технологии с утилизацией дренажных вод путем увлажнения осушаемых торфяных почв, ограничение степени мелиоративного воздействия на агроландшафты с учетом закона убывающей отдачи, сохранение части болот в естественном состоянии и др. [1, 5-7]. К основным способам увлажнения торфяных почв относятся дождевание, подпочвенное, внутрипочвенное и поверхностное увлажнение с предпочтительным возделыванием влаголюбивых овощных культур и раннего картофеля [2, 6, 8, 9]. В отношении деградированных торфяных почв при вводе их в сельскохозяйственный оборот недостаточно изучены особенности управления мелиоративным режимом при утилизации дренажных вод и вопросы восстановления их потенциального плодородия, что обуславливает актуальность проведенных исследований. Для условий Мещерской низменности постановка таких исследований производится впервые.

Цель исследований: управление мелиоративным режимом деградированной торфяной почвы для повышения продуктивности и экологической устойчивости мелиорируемого агроландшафта в условиях Нечерноземной зоны РФ.

Материалы и методы исследований. Методика исследований включала себя

использование системного анализа, метода водного баланса, применение законов земледелия и экологии [1, 10, 11]. Агроэкологический мониторинг проводился в натурном и полевом деляночном опыте на участке экспериментального дренажа гидромелиоративной системы (ГМС) «Тинки-П» (54°15'с.ш. и 39°52' в.д.), расположенного на болоте с тем же названием, с грунтовым типом водного питания в южной части Мещерской низменности. Строительство гидромелиоративной системы с общей площадью осушения 316 га было осуществлено в 1960 г. Участок экспериментального дренажа, на котором проводился полевой опыт, построен в 2020 г. на площади около 2 га. Пластмассовые дрены глубиной 1,1-1,4 м заложены через 18 м узкотраншейным способом. Торфянисто-глеевые почвы участка в процессе осушения и сельскохозяйственного использования трансформировались в агрозем с примесью торфа в корнеобитаемом слое почвы.

Влажность почвы определялась измерителем *НН-2* и термостатно-весовым способом, атмосферные осадки – почвенным дождемером ГР-28. Активность почвенно-биотического комплекса (ПБК) определялась полевым аппликационным методом с размещением льняной ткани на стеклах в пахотном слое почвы. Кислотность (рН-индекс) и солесодержание в водных пробах измерялись потенциометрическим методом. Измерение плотности по слоям почвы производилось в шурфах методом режущего кольца объемом 50 см³ из комплекта полевой лаборатории Литвинова ППЛ-9. В полевом деляночном двухфакторном опыте (фактор А – увлажнение, фактор В – гумат калия) изучались 4 варианта: контроль, природоохранный режим увлажнения (ПРУ), обработка клубней

раннеспелого картофеля сорта Метеор гуматом калия (ГК) и совместное действие изучаемых факторов (ПРУ + ГК). Закладка опыта была произведена методом рендомизированных блоков по Б.А. Доспехову, площадь делянок составляла 12 м² [12].

Опытный участок представляет собой модуль водооборотной осушительно-увлажнительной системы, который позволяет применять технологию оперативного рециклинга с увлажнением почвы дренажными водами дождеванием. Дренажный сток определялся гидрометрическим способом путем измерения живого сечения водного потока с промером глубин и скорости течения воды в створе водомерного поста [6]. Физико-химические свойства дренажных вод определялись с использованием колориметрического и титриметрического методов, а также каталитическим окислением при температуре 680°C.

Водопотребление картофеля определяли из уравнения водного баланса расчетного слоя почвы 0,4 м по формуле (1) [5]:

$$E = W_n - W_k + x + \sum m + g, \quad (1)$$

где W_n и W_k – влагозапасы в расчетном слое почвы в начале и конце расчетного периода, мм; x – атмосферные осадки за расчетный период, мм; $\sum m$ – сумма поливных норм за расчетный период, мм; g – вертикальный влагообмен между почвой и грунтовыми водами, мм.

Для количественной оценки вертикального влагообмена в увязке с динамикой грунтовых вод использовалась полученная нами ранее [2] и апробированная в регионе зависимость (2):

$$g = Z \exp(1 - \beta H), \quad (2)$$

где $Z = E - x - m + (W_{\text{нв}} - W_n)$; x – атмосферные осадки, мм; W_n – начальные запасы влаги в расчетном слое почвы, мм; $W_{\text{нв}}$ – запасы влаги при наименьшей влагоемкости, мм; β – коэффициент, равный 2,3 при $Z > 0$ и 2,0 при $Z < 0$; H – глубина залегания грунтовых вод от поверхности, м.

Природоохранный режим увлажнения картофеля в опыте на трансформированной торфяной почве (агроземе) характеризовался предполивным порогом влажности почвы 0,7 ППВ (предельная полевая влагоемкость) и привязкой вегетационных поливов к наиболее влаголюбивым фазам роста и развития картофеля – бутонизации и цветения [2]. Технология использования гумата калия включала в себя подготовку рабочего раствора (10 мл гумата калия на 10 л дренажной воды) с добавлением микроудобрений и обработку клубней картофеля перед посадкой (замачивание в течение 2 ч перед посадкой) [11].

Результаты и их обсуждение. Технология вовлечения в оборот залежного участка включала в себя скашивание травостоя, вспашку на глубину 25 см и последующую разделку пласта навесной почвофрезой 1GQN-125 М с удалением корней боронованием в два следа. В результате обеспечивалось разуплотнение почвы в пахотном слое от 1,39 до 1,12-1,15 г/см³, или в 1,2 раза, по сравнению с залежью (табл. 1). По показателю плотности, определенной методом режущего кольца, достигнуты снижение степени деградации от уровня слабодеградированной до недеградированной и повышение потенциального плодородия со среднего уровня до высокого согласно классификации [13].

С экологической позиции состояние залежной почвы оценивалось как экологический риск. В результате вовлечения в оборот состояние агрозема было приведено к экологической норме [1, 2]. Одновременно произошло незначительное увеличение плотности твердой фазы при сохранении пористости. Полевые влагозапасы 20 см слоя почвы уменьшились на 4,6 мм, что объясняется временным разрывом капилляров и уменьшением притока влаги от грунтовых вод.

Таблица 1. Агрофизические показатели и влагозапасы деградированной торфяной почвы (агрозема)

Table 1. Agrophysical indicators and moisture reserves of degraded peat soil (agrozema)

Слой почвы, см / Soil layer, cm	Плотность скелета грунта, г/см ³ / Density of soil skeleton, g/cm ³	Плотность твердых частиц грунта, г/см ³ / Density of solid particles in the soil, g/cm ³	Пористость, % / Porosity, %	Влажность, % / Humidity, %	Запас влаги, мм / Moisture reserve, mm
Агрозем первого года использования / Agrozem of the first year of use					
0-10	1,12±0,01	2,53±0,01	55,9±0,6	12,2±0,4	13,6±0,6
10-20	1,15±0,01	2,42±0,01	52,8±0,3	15,0±0,2	17,1±0,2
20-30	1,49±0,05	2,41±0,01	37,9±1,9	13,0±0,7	19,5±0,8
30-40	0,59±0,07	2,30±0,01	74,4±3,1	86,7±3,9	50,1±2,1
40-50	1,12±0,06	2,49±0,01	54,9±3,6	29,8±2,9	33,3±1,0
Агрозем залежного участка / Agricultural soil of the fallow plot					
0-10	1,39±0,07	2,49±0,01	55,9±0,6	12,3±0,2	17,1±0,3
10-20	1,38±0,09	2,34±0,01	52,8±0,3	13,2±0,7	18,2±0,2

Результаты и методы анализа агрохимических свойств агрозема, выполненные испытательной лабораторией Рязанского филиала ФГБУ «РосАгрохимслужба», представлены в таблице 2. Они характеризуются кислой реакцией среды пахотного слоя ($pH=4,1-4,3$ ед.), что для большинства сельскохозяйственных культур требует нейтрализации известкованием, и хорошим уровнем органического вещества 6,1-6,6%. Относительно общего азота отмечается средний уровень обеспеченности, необходимый для нормального роста растений. Содержание подвижного фосфора находится в пределах нормы, что говорит о достаточном фосфорном обмене для большинства культур. Концентрация в почве подвижного калия соответствует высокому уровню, что положительно влияет на уровень эффективного плодородия.

Атмосферные осадки за период вегетации картофеля с 4 июня по 15 августа составили 179,4 мм, в том числе в июне – 78,1 мм, в июле – 73,3 мм, в августе – 28,0 мм. В этих условиях средняя глубина грунтовых вод (УГВ) была близка к норме осушения для картофеля. К моменту посадки картофеля (04.06.2024 г.) грунтовые воды находились на глубине 103 см от поверхности земли, что ниже нормы осушения посевного периода для картофеля, а к моменту уборки (15.08.2024 г.) – на глубине 104 см, что соответствует норме осушения (рис. 1).

Гидрологический режим агрозема был в основном благоприятным для роста и развития картофеля за исключением дождливого периода в третью неделю июня, когда после выпадения 35 мм осадков УГВ поднимался до 79-86 см от поверхности, что сопровождалось формированием избыточной влажности корнеобитаемого слоя почвы (рис. 2). К 20 июня влагозапасы в расчетном слое превысили предельную полевую влагоемкость (ППВ). В этот период среднесуточная природная промываемость почвы составила 2,2 мм/сут., а максимум достигал 5 мм/сут. Периодический промывной режим, формируемый атмосферными осадками, наблюдался еще трижды в июле – начале августа с интенсивностью менее 1 мм/сут.

В первой декаде июля, когда наступила фаза полной бутонизации картофеля, влагозапасы опустились до предполивного порога влажности (0,7 ППВ), и 11 июля в вариантах ПРУ был проведен полив нормой 25 мм. В фазу цветения картофеля влажность была близка к оптимальной, и полив не потребовался. Немаловажно то, что проведение полива нормой 25 мм не вызвало техногенной промываемости почвы.

В качестве водоисточника для полива использовались дренажные воды магистрального канала ГМС «Тинки-П» с применением схемы оперативного гидромелиоративного рециклинга. Модуль дренажного стока в летний период

Таблица 2. Агрохимические свойства агрозема

Table 2. Agrochemical properties of agrozem

Показатели / Indicators	Методы анализа / Methods of the analysis	Результаты анализа / Results of the analysis
pH, единицы pH / pH, pH units	ГОСТ 26483-85, п. 4.2	$4,2 \pm 0,1$
Органическое вещество, % / Organic matter, %	ГОСТ 26213-2021, п. 6.1	$6,1 \pm 0,5$
Азот общий, % / Total nitrogen, %	ГОСТ Р 58896-2019	$0,3 \pm 0,1$
Подвижный фосфор, млн⁻¹ / Mobile phosphorus, ppm⁻¹	ГОСТ Р 54650-2011	105 ± 25
Подвижный калий, млн⁻¹ / Mobile potash, ppm	ГОСТ Р 54650-2011	30 ± 8

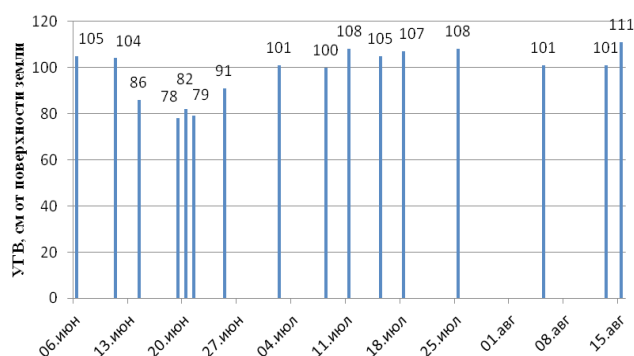


Рис. 1. Динамика уровня грунтовых вод, ГМС «Тинки-П»

Fig. 1. Dynamics of the groundwater level, GMS "Tinki-P"

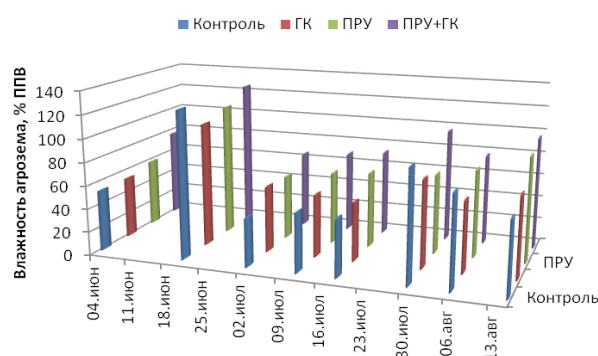


Рис. 2. Динамика влагозапасов агрозема в слое 0-40 см

Fig. 2. Dynamics of agrozem moisture reserves in the 0-40 cm layer

изменялся в диапазоне 0,0275-0,339 л/с·га при среднем значении 0,176 л/с·га. С одним поливом поступление в почву аммония составило около 4 кг/га, углерода – более 10 кг/га, что коррелирует с данными других исследований [14].

Технология выращивания картофеля включала в себя обработку почвы, обработку клубней гуматом калия посадку (4 июня), послевсходовую прополку, окучивание (25 июня), полив дренажными водами в вариантах ПРУ дождеванием в фазу цветения картофеля нормой 25 мм (11 июля), уборку и учет урожая сплошным способом (15 августа).

Основные показатели природоохранного режима увлажнения приведены в таблице 3. На контроле водопотребление среднеспелого картофеля составляло 153,6 мм, в варианте применения гумата калия (ГК) – 161,1 мм. С увлажнением водопотребление возрастало до 174,6 мм в варианте ПРУ и до 185,9 мм – в варианте ПРУ + ГК.

Микробиологическая активность почвенно-биотического комплекса (ПБК) в пахотном слое почвы (20 см) по вариантам опыта была установлена по значению показателя целлюлозоразрушающей активности почвы (ЦАП). Время экспозиции составило 71 сут. (с 4 мая по 15 августа).

Увлажнение агрозема и обработка клубней гуматом калия повышали микробиологическую

активность почвы по сравнению с контролем в первом случае на 15%, во втором случае – до 38% (рис. 3). При этом по шкале Д.С. Звягинцева все варианты укладываются в диапазон средней степени ЦАП (30-50%).

Учет урожая в опыте был выполнен сплошным способом. Средняя урожайность картофеля сорта Метеор, возделываемого на осушаемом агроземе первого года вовлечения в оборот из состояния залежи, изменялась по вариантам полевого деляночного опыта от 25,94 до 29,29 т/га при диапазоне изменчивости от 24,46 до 32,68 т/га (табл. 4).



Рис. 3. Микробиологическая активность почвы

Fig. 3. Microbiological activity of soil

Таблица 3. Показатели природоохранного мелиоративного режима раннего картофеля сорта Метеор

Table 3. Indicators of the environmental reclamation regime of early potatoes of the Meteor variety

Варианты опыта / Variants of the experiment	Водопотребление, мм / Water consumption, mm	Вертикальный водообмен, мм / Vertical water exchange, mm	Вегетационные поливные нормы, мм / Vegetation irrigation norms, mm	Сезонные нормы увлажнения, мм / Seasonal norms of moisturizing, mm
ПРУ / NMR	174,6	+0,1	25	25
ПРУ+ГК / NMR+PH	185,9	+3,8	25	25
ГК / PH	161,1	-4,3	0	0
Контроль / control	153,6	-2,7	0	0

Note:

ГК – PH – potassium humate

ПРУ – NMR – natural moisturizing regime

Таблица 4. Урожайность раннего картофеля сорта Метеор, т/га

Table 4. Yield of the early Meteor potatoes, t/ha

Вариант увлажнения (А) / Variant of moisturizing (A)	Вариант ГК(В) / Variant PH (B)	Повторения, (n) / Repetitions, (n)				Суммы V / Sums V	Средние / Average
		1	2	3	4		
Контроль / Control	0	26,07	28,93	24,46	24,28	103,74	25,94
	ГК / PH	30,36	29,64	24,46	27,14	111,60	27,90
ПРУ / NMR	0	31,79	29,64	25,54	25,18	112,15	28,04
	ГК / PH	32,68	30,36	26,61	27,50	117,15	29,29
Суммы P / Sums		120,9	114,82	101,07	104,36	$\sum x = 441,15$	$\bar{x} = 27,57$

Note:

ГК – PH – potassium humate

ПРУ – NMR – natural moisturizing regime

Средняя урожайность в опыте составила 27,75 т/га, на контроле – 25,94 т/га. Обработка клубней гидратированным торфом (вариант ГТ) повышала урожайность по сравнению с контролем на 1,96 т/га, или на 7,56%, и на 3,35 т/га, или на 12,9%, вместе с увлажнением (вариант ПРУ+ГК). Применение увлажнения без применения гумата калия (вариант ПРУ) повышало урожайность на 2,1 т/га, или на 8,1%, по сравнению с контролем. Совместное применение увлажнения и гумата калия повышало урожайность по сравнению с вариантом ГК на 1,39 т/га, или на 4,98%, и на 1,25 т/га, или на 4,46%, по сравнению с вариантом ПРУ.

Дисперсионный анализ двухфакторного полевого опыта с увлажнением и обработкой клубней рабочим раствором гумата калия показал, что на 5%-ном уровне значимости средний эффект от увлажнения с совместным применением гумата калия является достоверным, эффект от взаимодействия исследуемых факторов – недостоверным (табл. 5).

Таким образом, достоверные прибавки урожая картофеля на 5%-ном уровне значимости получены от применения увлажнения дренажными водами нормой 25 мм независимо

от фактора гумата калия – как по частным средним, так и по средним значениям фактора. От гумата калия прибавка является существенной только для среднего эффекта.

Экологическая эффективность была определена по показателю ресурсоемкости изучаемых технологий, устанавливаемых в свою очередь по общим затратам на водопотребление и по затратам оросительной воды, отнесенных к единице товарной продукции картофеля (табл. 6). При одном поливе применение гумата калия не оказало значительного влияния на ресурсоемкость технологий возделывания раннеспелого картофеля.

Выстраивание наиболее приоритетного ряда эффективности изучаемых технологий по общему расходу воды (водопотреблению) на единицу продукции представлено на рисунке 4.

ГК	Контроль	ПРУ	ПРУ+ГТ
57,7 м³/т	59,3 м³/т	62,3 м³/т	63,5 м³/т

Рис. 4. Приоритетный ряд эффективности изучаемых технологий по общему расходу воды на единицу продукции

Fig. 4. Ranking of the technologies under study by priority based on total water consumption per unit of output

Таблица 5. Действие увлажнения и гумата калия на урожайность раннего картофеля сорта Метеор, т/га, 2024 г.

Table 5. The effect of moisture and potassium humate on the yield of early potatoes of the Meteor variety, t/ha, 2024

Вариант (А) / Variant (A)	Гумат калия (В) / Potassium humate (B)		Средние по фактору (А) (НСР ₀₅ =1,415 т/га) / Average for factor (A) (LSD ₀₅ =1,415 t/ha)
	Не применялся / Not used	Применялся / Used	
Контроль / Control	25,94	27,90	26,92
ПРУ / NMR	28,04	29,29	28,66
Средние по (В) (НСР ₀₅ = 1,415 т/га) / Average for (B) (LSD ₀₅ = 1,415 t/t/ha)	26,99	28,59	27,79

Примечание. Для сравнения частных средних – НСР₀₅ = 2,001 т/га

For comparison, sample average – LSD₀₅ (Least Significance Difference) = 2.001 t/ha

Таблица 6. Ресурсоемкость технологий возделывания картофеля сорта Метеор, 2024 г.

Table 6. Resource intensity of technologies for cultivating Meteor potatoes, 2024

Варианты опыта / Variants of the experiment	Урожайность, т/га / Yield t/ha	Сезонная норма увлажнения, м³/га мм / Seasonal norms of moisturizing, mm	Водо- потребление, м³/га / Water consumption, m³/ha	Ресурсоемкость, м³/т / Resource intensity, m³/t	
				по водо- потреблению / on water consumption	по ороси- тельной норме / on irrigation
Контроль / Control	25,94	0	1536	59,3	0
ГК / PH	27,90	0	1611	57,7	0
ПРУ MR	28,04	250	1746	62,3	8,9
ПРУ+ГК / NMR+HP	29,29	250	1859	63,5	8,5

Note:

ГК – PH – potassium humate

ПРУ – NMR – natural moisturizing regime

ГТ – HP – humate peat

По оросительной норме наиболее эффективным является вариант с совместным применением увлажнения и гумата калия ПРУ+ГК ($8,5 \text{ м}^3/\text{т}$), а наиболее затратным – вариант ПРУ ($8,9 \text{ м}^3/\text{т}$).

Выводы

1. В полевых условиях апробирована технология вовлечения в оборот залежной деградированной торфяной почвы (агрозема), включающая в себя операции вспашки залежи и разделки пласта почвофрезой с боронованием в два следа, а также применение оперативного гидро-мелиоративного рециклинга для увлажнения агрозема. При этом достигнуты разуплотнение пахотного слоя почвы в 1,2 раза по сравнению с залежью и повышение потенциального плодородия от среднего до высоких уровней.

2. Для утилизации дренажных вод применялся природоохранный мелиоративный режим увлажнения агрозема с привязкой вегетационных поливов к наиболее влаголюбивым фазам роста и развития картофеля (бутонизации и цветения) и назначением сроков полива с учетом водообмена с грунтовыми водами. Мощность расчетного слоя почвы составляла 0,4 м, предполивной порог влажности почвы для раннего картофеля – 0,7 ППВ. В условиях умеренно жаркого и средневлажного периода вегетации был проведен один полив дренажными водами нормой 25 мм.

3. В гидрологическом режиме агрозема в середине июня были зарегистрированы избыточная влажность почвы и повышение УГВ до 79-86 см от поверхности земли после выпадения 35 мм осадков. В этот период среднесуточная природная промываемость почвы, формируемая атмосферными осадками, составила 2,2 мм/сут., а максимум достигал 5 мм/сут. Периодический природный промывной режим наблюдался еще

трижды в июле – начале августа с интенсивностью менее 1 мм/сут. Модуль дренажного стока в летний период изменялся в диапазоне 0,0275-0,339 л/с·га при среднем значении 0,176 л/с·га. С одним поливом поступление в почву аммония составило около 4 кг/га, углерода – более 10 кг/га.

4. Применение обработки клубней гуматом калия (вариант ГК) достоверно повышало урожайность по сравнению с контролем на 1,96 т/га, или на 7,56%, и на 3,35 т/га, или на 12,9%, вместе с увлажнением (вариант ПРУ+ГК). Применение увлажнения без применения гумата калия (вариант ПРУ) повышало урожайность на 2,1 т/га, или на 8,1%, по сравнению с контролем. Совместное применение увлажнения и гумата калия повышало урожайность по сравнению с вариантом ГК на 1,39 т/га, или на 4,98%, и на 1,25 т/га, или на 4,46%, по сравнению с вариантом ПРУ. Достоверные прибавки урожая картофеля на 5%-ном уровне значимости получены в результате применения увлажнения дренажными водами независимо от гумата калия – как по частным средним, так и по средним значениям фактора.

5. Установлено, что общий расход воды на водопотребление, отнесенный к единице продукции, наиболее эффективным оказался вариант ГК – $57,7 \text{ м}^3/\text{т}$. По расходу поливной воды наиболее эффективным является вариант с совместным применением увлажнения и гумата калия (ПРУ+ГК) – $8,5 \text{ м}^3/\text{т}$, или на 4,5% меньше, чем в варианте ПРУ ($8,9 \text{ м}^3/\text{т}$).

6. По результатам исследований производству рекомендовано провести нейтрализацию почвы от избыточной кислотности с помощью известкования, что позволит при правильной агротехнике добиться повышения эффективного плодородия и урожайности сельскохозяйственных культур.

Список использованных источников

1. Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В. и др. Агроэкология / Под ред. В.А. Черникова, А.И. Чекереса. М.: Колос, 2000. 536 с. EDN: UCWORT
2. Пыленок П.И., Сидоров И.В. Природоохранные мелиоративные режимы и технологии. М.: Россельхозакадемия, 2004. 323 с. EDN: TGBVXK
3. Зайдельман Ф.Р. Деградация почв как результат антропогенной трансформации их водного режима и защитные мероприятия // Почвоведение. 2009. № 1. С. 93-105. EDN: JVFVHZ
4. Уланов А.Н., Журавлёва Е.Л. Экологические аспекты освоения и сельскохозяйственного использования торфяных почв и выработанных торфяников // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 3. С. 94-96. EDN: KWFYDP
5. Пыленок П.И. Гидрология дренажа. Научно-технологическое обоснование осушительно-увлажнительных систем:

References

1. Agroecology / V.A. Chernikov, R.M. Aleksakhin, A.V. Golubev [et al.]; Edited by V.A. Chernikov, A.I. Chekeres. M.: Kolos, 2000. 536 p. EDN: UCWORT
2. Pylenok P.I., Sidorov I.V. Environmental amelioration regimes and technologies. Moscow, Russian Agricultural Academy, 2004. 323 p. EDN: TGBVXK
3. Seidelman F.R. Soil degradation as a result of anthropogenic transformation of their water regime and protective measures // Soil science. 2009. No. 1. P. 93-105. EDN: JVFVHZ
4. Ulanov A.N., Zhuravleva E.L. Ecological aspects of the development and agricultural use of peat soils and exhausted peat bogs // Theoretical and applied ecology. 2009. No. 3. P. 94-96. EDN: KWFYDP
5. Pylenok P.I. Hydrology of drainage. Scientific and technological substantiation of dehumidification and humidification systems: a monograph. Moscow: FNTS

Монография. М.: ФНИЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2024. 172 с. DOI: 10.37738/VNIIGIM.2024.54.76.001. EDN: IRCKTZ

6. Пыленок П.И., Ефремов Р.О. Экологические требования к управляемым факторам воздействия мелиорации торфяных почв на окружающую среду // Мелиорация и водное хозяйство. 2004. № 4. С. 83-86. EDN: MZZMQZ

7. Хаджиди А.Е., Кузнецов Е.В., Новиков А.Е. Утилизация дренажного стока осушительной системы // Природообустройство. 2025. № 1. С. 13-20. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-13-20. EDN: JOUNCR

8. Дронова Т.Н., Дергачева И.А. Возделывание раннего картофеля на орошаемых землях // Орошаемое земледелие. 2013. № 1. С. 6-7.

9. Зинковский В.Н., Зинковская Т.С., Пантелеева Т.Н. Эффективность орошения картофеля на осушаемых землях Нечерноземья при разных погодных условиях // Использование мелиорированных земель – современное состояние и перспективы развития мелиоративного земледелия: Сборник трудов. 2015. С. 258-261.

10. Митин В.Ф. Методика расчета водного режима почвы и дренажного стока // Мелиорация и водное хозяйство. 1996. № 2. С. 15-16.

11. Комякова Е.М., Комякова Е.М. Влияние торфогуминовых удобрений на формирование урожайности и показателя качества картофеля // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: Материалы VII Международной научной конференции. 2010. Брянская ГСХА. С. 235-237.

12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1973. 336 с.

13. Руководство по определению потенциального плодородия и уровня его использования по почвам пашни Центрального района России с целью их охраны, предотвращения деградации. М.: Роскомзем, 1997. 25с.

14. Лагутина Т.Б., Варпакхович И.М. О выносе веществ с дренажным стоком из пойменных и торфяных почв // Мелиорация земель Архангельской области: Сборник научных трудов / Северный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации; Гл. ред. А.И. Климко. Ленинград, 1984. С. 101-105.

Информация об авторах

Петр Иванович Пыленок – д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник Мещерского филиала ФГБНУ «ФНИЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»; ORCID: 0000-0001-7621-2331; RINIC AuthorID: 796754; petr.pylenok@yandex.ru

Руслан Олегович Ефремов – младший научный сотрудник Мещерского филиала ФГБНУ «ФНИЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»; аспирант, AuthorID: 1223080; ruslan260599@gmail.com

Вклад авторов

П.И. Пыленок – общее научное руководство исследованием, постановка проблемы и целей, разработка концепции эксперимента

Р.О. Ефремов – непосредственное проведение экспериментальных исследований

Конфликт интересов / Contribution of the authors

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interest

Поступила в редакцию / Received 22.01.2026

Поступила после рецензирования / Received 27.05.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 29.05.2026

VNIIGIM I.M. A.N. Kostyakova, 2024. 172 p. DOI: 10.37738/VNIIGIM.2024.54.76.001. EDN: IRCKTZ

6. Pylenok P.I., Efremov R.O. Ecological requirements for manageable factors of impact of peat soil reclamation on the environment. // Land reclamation and water management. No. 4, 2024. P. 83-86. EDN: MZZMQZ

7. Khadjidi A.E., Kuznetsov E.V., Novikov A.E. Utilization of drainage runoff of the drainage system // Prirodoobustroystvo. No. 1 (2025). P. 13-20 DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-13-20. EDN: JOUNCR

8. Dronova T.N. Dergacheva I.A. Cultivation of early potatoes on irrigated lands // Irrigated agriculture. 2013. No. 1. P. 6-7.

9. Zinkovsky V.N., Zinkovskaya T.S., Panteleeva T.N. Potato irrigation efficiency in drained lands of the Non-Chernozem region under different weather conditions // In the collection: The use of reclaimed lands – the current state and prospects for the development of reclamation agriculture. 2015. P. 258-261.

10. Mitin V.F. Methodology for calculating the water regime of soil and drainage runoff // Land reclamation and water management. 1996. No. 2. P. 15-16.

11. Komyakova E.M., Komyakova E.M. The influence of peat-humic fertilizers on the formation of yields and quality indicators of potatoes // In collection: Agroecological aspects of the sustainable development of agriculture. Proceedings of the VII International Scientific Conference. 2010. P. 235-237.

12. Dospekhov B.A. Methodology of field experience. Moscow: Kolos, 1973. 336 p.

13. Guidelines for determining potential fertility and the level of its use for arable soils in the central region of Russia in order to protect them and prevent degradation. Moscow, Roskomzem, 1997. 25 p.

14. Lagutina T.B., Varpakhovich I.M. On the removal of substances with drainage runoff from floodplain and peat soils // In the collection: Land reclamation of the Arkhangelsk region. collection of scientific papers. Northern Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation; editor-in-chief A.I. Klimko. Leningrad, 1984. P. 101-105.

Information about the authors

Peter I. Pylenok – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher; ORCID: 0000-0001-7621-2331; RSCI AuthorID: 796754; petr.pylenok@yandex.ru

Ruslan O. Efremov – Junior Researcher, postgraduate student; AuthorID: 1223080; ORCID: 0009-0007-0045-5039; ruslan260599@gmail.com

Contribution of the authors

P.I. Pylenok – general scientific management of the research, formulation of the problem and goals, development of the concept of the experiment

R.O. Efremov – direct conduct of experimental research

Оригинальная статья

УДК 631.67:556.12(574.1)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-25-31>

ВЛИЯНИЕ ОРОШЕНИЯ ДОЖДЕВАНИЕМ НА ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ ПОВОЛЖЬЯ

Л.А. Журавлева¹, О.М. Кузина^{2✉}, Ю.А. Мырксина³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; Москва, Российская Федерация¹ dfz@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-1168-4001² kuzina_om@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-9229-4306³ myrksina@rgau-msha.ru ORCID: 0000-0002-8023-3183

Аннотация. Длительное орошение со временем ухудшает состояние почв. Цель работы – исследование изменений физических и химических свойств почв под воздействием многолетнего орошения дождеванием и разработка конструктивно-технологических решений, направленных на минимизацию потенциальных негативных последствий орошения. Представлен анализ исследований влияния многолетнего орошения на характеристики почв. С целью минимизации негативного влияния орошения на почву была разработана технология, позволяющая регулировать норму полива по секторам, на основе фактического водопотребления. Экспериментальные исследования проводились при поливе кукурузы. Почва – каштановая среднесуглинистая. Сравнение выполнялось по результатам полива на трех участках: традиционный полив постоянной нормой, полив в соответствии с представленной расчетной методикой и полив усовершенствованными дождевателями. Проведенные сравнительные экспериментальные исследования продемонстрировали возможность снижения стока при поливе. Как показали исследования, традиционное дождевание демонстрирует значительные потери воды по причине поверхностного стока, который составляет около 10% от нормы полива. Это существенно уступает более эффективным методам: секторная технология снижает сток в 2,5 раза, а комбинация секторной технологии с усовершенствованными конструкциями спринклеров – почти в 3,2 раза. Получены результаты выноса питательных веществ из почвы и гумуса. Так, за период 2020-2024 гг. при поливе по разрабатываемой технологии вынос питательных элементов со стоком был сокращен в среднем в 2,3 раза; при поливе по разрабатываемой технологии и с оснащением дождевальных машин усовершенствованными конструкциями дождевателей – в 3 раза. В течение трехлетнего экспериментального периода при традиционном орошении потери гумуса составили 790 кг/га. Внедрение новой технологии полива позволило сократить эти потери до 336 кг/га. Наилучшие результаты были достигнуты при комбинированном использовании разрабатываемой технологии с разработанными дождевателями, что привело к минимизации потерь гумуса до 202 кг/га.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-26-00132).

Ключевые слова: дождевание, почва, поливная норма, гумус, сток, питательные вещества

Для цитирования: Журавлева Л.А., Кузина О.М., Мырксина Ю.А. Влияние орошения дождеванием на физические и химические свойства почв Поволжья. Природообустройство. 2026;Т.19(3):25-31. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-25-31>

Scientific article

INFLUENCE OF SPRINKLING IRRIGATION ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS IN THE VOLGA REGION

L.A. Zhuravleva^{1✉}, O.M. Kuzina², Yu.A. Myrksina³^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; Moscow, Russian Federation¹ dfz@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-1168-4001² kuzina_om@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-9229-4306³ myrksina@rgau-msha.ru ORCID: 0000-0002-8023-3183

Abstract. Long-term irrigation worsens the condition of the soil over time. The purpose of the research is to study changes in the physical and chemical properties of soils under the influence of long-term

sprinkling irrigation and to develop design and technological solutions aimed at minimizing the potential negative consequences of irrigation. An analysis of studies of the effect of perennial irrigation on soil characteristics is presented. In order to minimize the negative impact of irrigation on the soil, a technology has been developed that allows you to adjust the irrigation rate by sector, based on actual water consumption. Experimental studies were carried out when watering corn. The soil is chestnut medium loamy. The comparison was made based on the results of irrigation in three areas: traditional irrigation at a constant rate, irrigation in accordance with the presented calculation method and improved sprinklers. Comparative experimental studies have demonstrated the possibility of reducing runoff during irrigation. Comparative experimental studies have demonstrated the possibility of reducing runoff during irrigation. As studies have shown, traditional sprinkling shows significant water losses due to surface runoff, which is about 10% of the irrigation rate. This is significantly inferior to more efficient methods: sector technology reduces runoff by 2.5 times, and the combination of sector technology with improved sprinkler designs by almost 3.2 times. The results of the removal of nutrients from the soil and humus are given. For the period 2020-2024, with irrigation according to the developed technology, the removal of nutrients with runoff was reduced by an average of 2.3 times; when watering according to the developed technology and equipping sprinklers with improved sprinkler designs – 3 times. During the three-year experimental period, humus loss was 790 kg/ha with traditional irrigation. The introduction of the new irrigation technology made it possible to reduce these losses to 336 kg/ha. The best results were achieved by combining the developed technology with the developed sprinklers, which led to the minimization of humus losses to 202 kg/ha.

The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No 25-26-00132).

Keywords: sprinkling, soil, irrigation rate, humus, runoff, nutrients

For citation: Zhuravleva L.A., Kuzina O.M., Myrksina Yu.A. Influence of sprinkling irrigation on the physical and chemical properties of soils in the Volga region. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(3):25-31. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-25-31>

Введение. В России, согласно информации Департамента мелиорации, в 2024 г орошалась площадь 4,67 млн га, и к 2030 г. планируется увеличить площадь орошаемых земель на 1/4 от этого уровня [1].

Орошение значительно влияет на почву, изменяя химический состав, физические свойства и активность микроорганизмов. В черноземах и темно-каштановых почвах многократные поливы разрушают структуру почв, уплотняют ее.

Необходимо учитывать процессы деградации почв, их засоление и эрозию, возникающие в результате длительных многолетних поливов и переполивов.

Цель исследований: изучение изменений физических и химических свойств почв под воздействием многолетнего орошения дождеванием и разработка конструктивно-технологических решений, направленных на минимизацию потенциальных негативных последствий орошения.

Материалы и методы исследований. Влияние длительного орошения на почвенные характеристики стало предметом исследований широкого круга ученых. Например, в результате многолетних исследований на Алейской оросительной системе выявлено, что южные

черноземы под воздействием орошения трансформируются в лугово-черноземные почвы. В течение первых 20 лет орошения физические свойства почв оставались приемлемыми, хотя их плотность увеличилась на 6-8% по сравнению с неорошаемыми участками. Однако после 50 лет орошения уплотнение достигло 1,45 г/см³, а содержание гумуса снизилось на 30%, что объясняется минерализацией и вымыванием гумуса в более глубокие слои почвы [2].

Содержание гумуса при длительном орошении различных типов почв представлено на рисунке 1 [3].

В обычных черноземах степной зоны, орошаемых пресной водой, содержание гумуса в верхнем слое почвы является низким, составляя 3,4%. На участках с богарным земледелием уровень гумуса несколько выше – 3,7%.

При богарном земледелии тип гумуса – гуматный, тогда как при орошении – гумино-фульватный, что свидетельствует о начале процесса дегумификации [4]. При поливе минерализованной водой этот процесс является более ярко выраженным.

Согласно исследованиям авторов после некоторого снижения содержания гумуса может

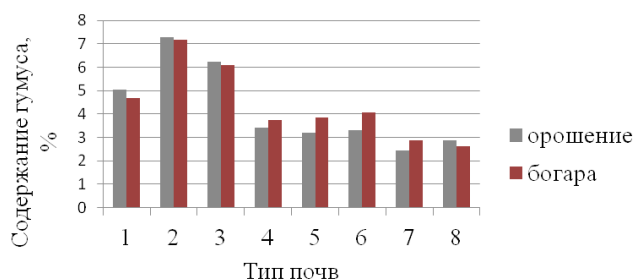


Рис. 1. Содержание гумуса при длительном орошении различных типов почв:

1 – серая лесная почва; 2 – чернозем типичный; 3 – чернозем обыкновенный ЦЧО; 4 – чернозем обыкновенный, орошаемый пресной водой; 5 – чернозем обыкновенный; чернозем, орошаемый слабоминерализованной водой; 6 – чернозем южный; 7 – солонец; 8 – темно-каштановая почва

Fig. 1. Humus content during long-term irrigation of various types of soils:

1 – gray forest soil, 2 – typical, 3 – common chernozem, 4 – common chernozem irrigated with fresh water, 5 – common chernozem irrigated with low-mineralized water, 6 – southern chernozem, 7 – solonets, 8 – dark chestnut soil

происходить постепенная стабилизация, а в отдельных случаях – и повышение уровня, связанное поступлением в почву пожнивных остатков [5].

При длительном орошении темно-каштановых почв и внесении удобрений (500 кг/га минеральных и 40 т/га навоза крупного рогатого скота) содержание гумуса увеличивается. Тип гумуса из фульватно-гуматного переходит в гуматный [4]. Следует отметить, что для получения более точных данных необходим ряд исследований влияния полива без компенсационного внесения удобрений.

Преобразование органического вещества на орошаемых землях определяется не только типом почвы и степенью ее влажности, но и качеством поливной воды, графиком поливов, типом и количеством вносимых удобрений. При этом поливная вода и режим орошения, способствующие накоплению кальция в почве, могут привести к ускоренному образованию гумуса и уменьшению его подвижности.

Большинство исследователей наблюдают при орошении значительные преобразования почвенной структуры: повышение плотности и механической прочности, снижение пористости.

При многолетнем орошении также наблюдаются заметные изменения гранулометрического состава почвы. Каштановые среднесуглинистые почвы, например, теряют тонкодисперсные

частицы по причине вымывания в большей степени, чем легкие суглинки [6].

На агрегатном уровне негативные последствия многолетних поливов проявляются в увеличении глыбистости, уменьшении межагрегатной и агрегатной пористости. При орошении слабоминерализованной и минерализованной водой меняется объем мезопор.

Орошение, особенно переполив, приводит к трансформации гидрологического режима и водного баланса, накоплению влаги, повышению уровня грунтовых вод непосредственно как на орошаемых, так и на близлежащих территориях.

Исследования мелиоративных режимов орошаемых на протяжении 25-50 лет черноземов и каштановых почв показывают процессы ошелачивания, осолонцевания, обесструктурирования, явления элювиально-иллювиального характера во многих регионах страны и даже взаимоусиление процессов [7].

Уровень концентрации водорастворимых солей в орошаемых почвах определяется минеральным составом воды, используемой для полива, составом и расположением грунтовых вод. Процесс вторичного засоления и осолонцевания при этом имеет циклический характер за счет чередования влажных и сухих лет [8].

Интенсивный полив приводит к существенным изменениям в составе питательных веществ почвы. В верхних слоях наблюдается снижение общего и доступного азота, фосфора.

Согласно исследованиям [2] орошение в течение более 20 лет вызвало уменьшение азота на 18%, а при орошении на протяжении 50 лет – на 56%. При длительном поливе также зафиксировано снижение подвижного фосфора на 18%, причем содержание обменного калия при орошении увеличилось почти на 40% по сравнению с контролем при орошении в течение более 20 лет.

Как показывают исследования, изменения в почве, деградация почв при длительном, тем более обильном многолетнем орошении, являются неизбежным процессом. Тем не менее можно подобрать конструктивные и технологические решения полива с возможностью восстановления свойств почв и компенсации негативных изменений.

График на рисунке 2 иллюстрирует кривые безнапорного впитывания для разных типов грунтов в обобщенной форме, то есть критические значения, превышение которых

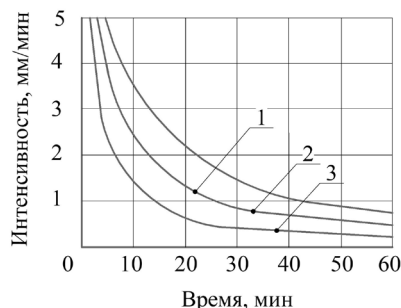


Рис. 2. Кривые безнапорного впитывания: 1 – черноземные почвы; 2 – темно-каштановые почвы; 3 – светло-каштановые почвы [9, 10]

Fig. 2. Non-pressure absorption curves: 1 – chernozem soils, 2 – dark chestnut soils, 3 – light chestnut soils [9, 10]

приведет к образованию стока [9, 10]. Зависимость интенсивности полива от времени напрямую отражает режим работы дождевальной техники и применяемую технологию орошения, что подтверждено экспериментальными исследованиями при поливе широкозахватными дождевальными машинами ДМ Фрегат, Кубань-ЛК1.

Очевидно, что технологии полива, связанные с выдачей дробных норм полива, импульсный, прерывистый полив, мелкодисперсное дождевание позволяют снизить негативное влияние, а конструктивные решения дождевальных машин и самих дождевателей, обеспечивающих мелкокапельное распыливание дождя и низкую интенсивность, также представляют интерес с позиции экологически безопасного полива.

Существенным препятствием для широкого внедрения экологически безопасных методов и средств полива является комплекс факторов. К ним относятся высокие потребности сельскохозяйственных культур в воде, потери влаги вследствие испарения и сноса ветром мелких дождевых частиц, а также ряд других технологических ограничений, которые сужают круг доступных и эффективных решений.

Согласно результатам исследований, проведенных в Поволжье, староорошаемые почвы в ближайшем будущем столкнутся с деградацией: ожидается сокращение содержания гумуса на 3-8%, а также общее ухудшение агрофизических и химических характеристик пахотного слоя [11].

Длительное орошение почв приводит к уплотнению верхних слоев суглинистых и глинистых почв, в результате чего их объемная масса возрастает до 1,30-1,40 г/см³. На богарных землях (без искусственного полива) этот показатель составляет лишь 1,05-1,10 г/см³ [11].

Таким образом, плотность сложения, порозность, содержание гумуса при многолетних поливах связаны с технологией дождевания и применяемой дождевальной техникой.

Низкая результативность оросительных мероприятий в засушливых регионах Поволжья в значительной степени связана с игнорированием фундаментальных подходов к регулированию водного баланса почв. При проведении полива критически важно предотвращать образование стока. Величина поливной нормы, не приводящей к поверхностному стоку, определяется такими факторами, как скорость подачи воды, проницаемость грунта и интенсивность распыления при дождевании.

С целью минимизации негативного влияния орошения на почву была разработана технология, позволяющая корректировать норму полива по секторам, с основой на фактическом водопотреблении, применение которой показало эффективность [12, 13].

Скорость движения широкозахватной дождевальной машины V , м/с, –

$$V = \frac{\pi L}{1800 n t_i}, \quad (1)$$

где n – количество участков (секторов); L – длина машины, то есть радиус поливного круга, м.

Время первого полива –

$$t_i = \begin{cases} \frac{s_i m}{q - 0,5 s_i E_i}, & \text{при } i = (k-1)n + 1; \\ \frac{T_{i-1}(q + 0,5 s_i E_{i-1})}{q - 0,5 s_i E_i}, & \text{при } i \neq (k-1)n + 1, \end{cases} \quad (2)$$

где m – поливная норма; E_i – среднечасовое водопотребление, м³/га; q – расход машины, м³/ч; s_i – площадь сектора; i – порядковый номер полива; k – номер полива поля.

Поливная норма –

$$m = \frac{360 q t_i}{\pi L^2 \alpha}, \quad (3)$$

где α – угол сектора полива, град.

При следующих поливах:

$$t_i = \begin{cases} \frac{s_i (m - 0,5 E_{i-n} t_{i-n})}{q - 0,5 s_i E_i}, & \text{при } i = (k-1)n + 1; \\ \frac{T_{i-1}(q + 0,5 s_i E_{i-1}) - 0,5 s_i (E_{i-n-1} t_{i-n-1} + E_{i-n} t_{i-n})}{q - 0,5 s_i E_i}, & \text{при } i \neq (k-1)n + 1. \end{cases}$$

Экспериментальные исследования проводились при поливе кукурузы.

Почва – каштановая среднесуглинистая. Диапазон pH в слое 0,0-0,4 м на участках проведения исследований – 6,8-7,0, то есть почва преимущественно слабокислая, среда ближе к нейтральной. Содержание гумуса горизонта А – 3,9-4,6%.

Сравнение выполнялось по результатам полива на трех участках.

Первый участок – традиционный полив постоянной нормой. Удобрения не вносились. Норма полива – 400 м³/га.

Второй участок – полив в соответствии с зависимостями, определяемыми по следующей методике.

Третий участок – полив по предложенной методике; на дождевальной машине установлены двухдефлекторные дождеватели [13].

Анализ показал, что химический состав почв на всех трех орошаемых участках почти не различается.

Фактическая поливная норма определялась с помощью почвенных дождемеров, расставленных по длине дождевальной машины.

Нижний предел влагоемкости НВ был принят за 70% согласно рекомендациям [14-16].

Результаты и их обсуждение. Величина поверхностного стока при поливах определялась на 5 стоковых площадках на каждом опытном поле. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 3.

По данным за 2022 г., традиционная технология дождевания привела к поверхностному стоку в объеме около 10% от поливной нормы. Это в 2,5 раза больше, чем при секторной технологии, и почти в 3,2 раза больше, чем при использовании в дополнение к секторной технологии спринклеров с двойным дефлектором. Практически аналогичные результаты можно было наблюдать в 2023 и 2024 гг.

Интенсивный поверхностный сток от полива приводит к деградации почвы через смыв. Этот процесс не только разрушает структуру почвы, но и обедняет ее, уносит питательные вещества и гумус (рис. 4).

За период 2020-2024 гг. при поливе дождевальной машиной по разрабатываемой технологии вынос питательных элементов со стоком был сокращен в среднем в 2,3 раза, при поливе по разрабатываемой технологии и с оснащением дождевальных машин усовершенствованными конструкциями дождевателей – в 3 раза.

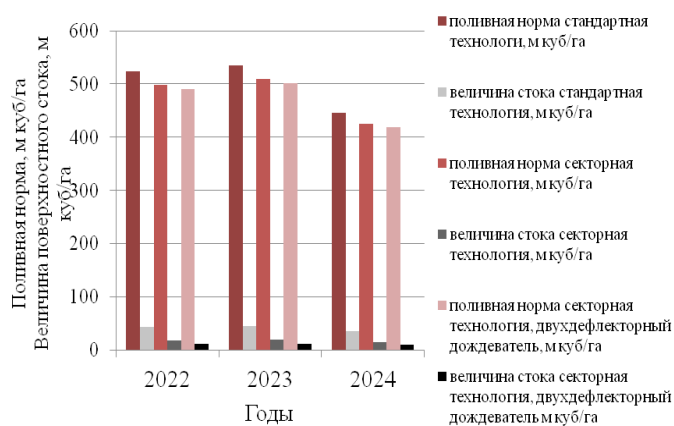


Рис. 3. Поливная норма и поверхностный сток за один полив по годам

Fig. 3. Irrigation rate and surface runoff for one irrigation by years

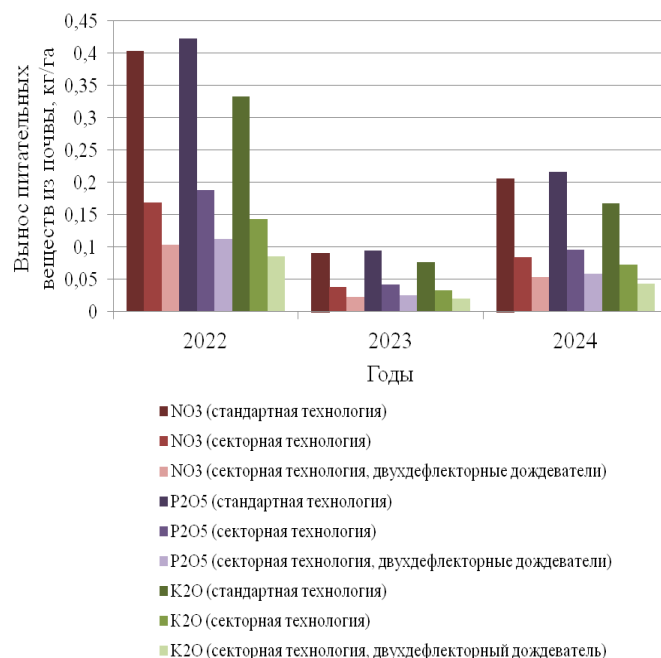


Рис. 4. Результаты выноса питательных веществ из почвы

Fig. 4. Results of removal of nutrients from the soil

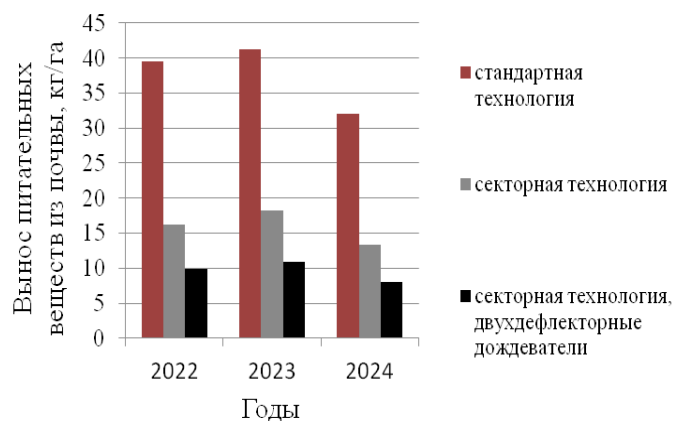


Рис. 5. Результаты выноса гумуса

Fig. 5. Results of humus removal

Анализ результатов показал также значительную разницу в потерях гумуса в зависимости от способа полива. За трехлетний период использование стандартной дождевальной машины приводит к потерям в 790 кг/га. Применение разрабатываемой технологии полива снизило этот показатель до 336 кг/га. Наиболее эффективным оказалось сочетание разрабатываемой технологии с установленными дождевателями, когда потери гумуса составили всего 202 кг/га (рис. 5).

Располагая информацией об объемах вымывания гумуса и питательных веществ при каждом поливе, можно произвести расчеты совокупных потерь за сельскохозяйственный сезон или многолетний период.

Список использованных источников

1. Библиодосье: Круглый стол / Комитет Государственной Думы по аграрным вопросам. По информационно-библиографическим ресурсам Управления библиотечных фондов (Парламентской библиотеки). Официальные материалы. Москва, 2025.
2. Шуравилин А.В., Вуколов Н.Г., Пивень Е.А. Свойства и плодородие почв при многолетнем орошении // Плодородие. 2008. № 1. С. 19-21
3. Несват А.П. Влияние орошения на водно-физические свойства темно-каштановых почв // Агрономия и лесное хозяйство. 2011. № 4. С. 57-58. EDN: PAXRPT
4. Щедрин В.Н., Докучаева Л.М., Юркова Р.Е. Негативные почвенные процессы при регулярном орошении различных типов почв // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2018. № 2 (30). С. 1-21. EDN: XODEYP
5. Скуратов Н.С. Эколого-мелиоративное регулирование плодородия орошаемых черноземов: Пособие для специалистов. Новочеркасск: Южный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации. 2001. 190 с.
6. Боронина Н.Ю., Мякий П.А., Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М. Влияние орошения на гранулометрию агропочв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 8. С. 52-58. EDN: VNBRGQ
7. Приходько В.Е., Манахов Д.В. Почвенные процессы на разных структурных уровнях организации и диагностика их изменений при орошении // Вестник Московского университета. Серия 17 «Почвоведение». 2010. № 2. С. 8-17
8. Кушнарева А.В., Безуглова О.С. Влияние орошения на свойства почв: Обзор // Живые и биокосные системы. 2023. № 46. DOI: 10.18522/2308-9709-2023-46-4. EDN: FHZAHV
9. Журавлева Л.А., Якобсон Б.Б. Технично-технологические решения и рекомендации по сохранению плодородия почв, подверженных водной эрозии: Монография. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2024. 115 с.
10. Ларионова А.М. Припитуемая способность почв при поливах дождеванием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ФГУП НИИССБ «Прогресс», 2004. 40 с.
11. Шадских В.А., Кизжаева В.Е., Романова Л.Г. К вопросу влияния орошения на плодородие почв степной с сухостепной зон Поволжья // Техника и технологии. Орошаемое земледелие. 2019. № 4. С. 46-49. EDN: QNTBZT
12. Журавлева Л.А., Соловьев В.А. Совершенствование технологических приемов полива дождевальными машинами кругового действия «Каскад» // Мелиорация. 2019. № 1 (87). С. 78-82. EDN: EWYNEM

Выводы

Результаты проведенных исследований указывают на то, что деградация почв, спровоцированная длительным орошением, представляет собой закономерный и труднообратимый процесс.

Многолетнее орошение приводит к ухудшению физико-химических, водно-физических и теплофизических показателей.

Для минимизации негативных последствий и восстановления продуктивности земель требуется разработка комплексных инженерно-технологических стратегий.

Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали эффективность при уменьшении стока, что позволило снизить вынос питательных веществ и гумуса из почвы.

References

1. Bibliodosiye. State Duma Committee on Agrarian Issues, "Round Table". On the information and bibliographic resources of the Department of Library Collections (Parliamentary Library). Official materials. Moscow. 12. 2025.
2. Shuravilin A.V., Vukolov N.G., Piven E.A. Properties and fertility of soils in multi-year irrigation // Fertility. № 1. 2008. P. 19-21.
3. Nesvat A.P. Influence of irrigation on the water-physical properties of dark chestnut soils // Agronomy and forestry. 2011. № 4. P. 57-58. EDN: PAXRPT
4. Shchedrin V.N., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E. Negative soil processes in regular irrigation of various types of soils // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. № 2(30). 2018. P. 1-21. EDN: XODEYP
5. Skuratov N.S. Ecological and reclamation regulation of the fertility of irrigated black earths. Manual for specialists. Novocherkassk. South scientific research institute of hydraulic engineering and land reclamation. 2001. 190 p.
6. Boronina N.Yu., Myagky P.A., Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M. The influence of irrigation on the granulometry of agricultural soils // Bulletin of the Altai State Agrarian University. № 8. 2018. P. 52-58. EDN: VNBRGQ
7. Prihodko V.E., Manakhov D.V. Soil processes at different structural levels of organization and diagnostics of their changes during irrigation // Bulletin of the Moscow University. Ser 17. Soil science. 2010. № 2. P. 8-17.
8. Kushnareva A.V., Bezuglova O.S., Effect of irrigation on soil properties. Review // "Living and bioinert systems". 2023. № 46; DOI: 10.18522/2308-9709-2023-46-4 EDN: FHZAHV
9. Zhuravleva L.A., Yakobson B.B. Technical and technological solutions and recommendations for the preservation of fertility of soils subject to water erosion: monograph. MOSCOW: FSBEI HE RGAU_MSHA. 2024. 115 p
10. Larionova A.M. Impregnating ability of soils during sprinkling irrigation. Abstract of the Dissertation of candidate of technical sciences. Moscow, FGUP NIISB Progress Publ., 2004. 40 p.
11. Shadskikh V.A., Kizhaeva V.E., Romanova L.G. On the issue of irrigation influence on the fertility of steppe soils from the dry steppe zones of the Volga region // Technics and Technologies. Irrigated agriculture. № 4. 2019. P. 46-49. EDN: QNTBZT
12. Zhuravleva L.A., Soloviev V.A. Improvement of technological methods of irrigation with circular sprinkler machines "Kaskad" // Land reclamation. 2019. № 1 (87). P. 78-82. EDN: EWYNEM

13. Журавлева Л.А., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С., Кузина О.М. Ресурсосбережение при проектировании и эксплуатации широкозахватных дождевальных машин: Монография. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. 237 с.

14. Технический регламент по управлению и корректировке объемов воды для орошения (На примере Ростовской области). Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015. 58 с.

15. Павленко В.Н., Юшкин Д.А. Суммарное водопотребление кукурузы в межфазные периоды роста и развития растений // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 10. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.100.10.022>

16. Коновалова Г.В. Усовершенствованные приемы возделывания кукурузы на зерно при орошении дождеванием на светло-каштановых почвах Нижнего Поволжья: Дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 2016. 201с.

Информация об авторах

Лариса Анатольевна Журавлёва, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сельскохозяйственного строительства; ORCID: 0000-0002-1168-4001; Scopus: 57204785451; PIIID: WOS Research ID: AAO-7123-2020; dfz@yandex.ru

Оксана Михайловна Кузина, старший преподаватель кафедры сельскохозяйственных мелиораций, ORCID: 0000-0001-9229-4306; kuzina_om@rgau-msha.ru

Юлия Александровна Мырксина, канд. эконом. наук, доцент кафедры бухгалтерского учета, финансов и налогообложения, ORCID: 0000-0002-8023-3183, myrksina@rgau-msha.ru

Вклад авторов

Л.А. Журавлева – проведение теоретических исследований, участие в проведении полевых опытов, обработка их результатов
О.М. Кузина – поиск и анализ литературных источников, а также статистических данных
Ю.А. Мырксина – редакция и оформление текстового и графического материалов статьи.

Поступила в редакцию / Received 25.03.2026

Поступила после доработки и рецензирования / Received 19.05.2026

Принята к публикации / Accepted 19.05.2026

13. Zhuravleva L.A., Apatenko A.S., Sevryugina N.S., Kuzina O.M. Resource Saving in the Design and Operation of Wide-Span Sprinkler Machines: Monograph. Moscow, RSAU-MSHA Publ., 2023. 237 p.

14. Technical Regulations for Water Management and Adjustment for irrigation (On the example of the Rostov region). – Kolomna: IP Vorobyov O.M., 2015. 58 p. ISBN 978-5-9906885-2-0.

15. Pavlenko V.N., Yushkin D.A. Total water consumption of corn in interphase periods of plant growth and development // International Research Journal. 2020. № 10. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.100.10.022>

16. Konovalova G.V. Improved methods of corn cultivation for grain during sprinkling irrigation on light chestnut soils of the Lower Volga region: Dissertation of candidate of agricultural sciences: 06.01.01, 06.01.02: defended 29.09.2016 / Konovalova Galina Viktorovna. – Saratov, 2016. – 201.

Information about the authors

Iarisa A. Zhuravleva, DSs (Tech), associate professor, professor of the department of agricultural construction; ORCID: 0000-0002-1168-4001; Scopus: 57204785451; RSCI ID: WOS Research ID: AAO-7123-2020; dfz@yandex.ru

Oksana M. Kuzina, senior lecturer, department of agricultural land reclamation, ORCID: 0000-0001-9229-4306; kuzina_om@rgau-msha.ru

Yulia A. Myrksina, CSs (Econ), associate professor, department of accounting, finance and taxation, ORCID: 0000-0002-8023-3183, myrksina@rgau-msha.ru

Contribution of the authors

L.A. Zhuravleva – conducting theoretical research, participating in field experiments, and processing their results
O.M. Kuzina – search and analysis of literary sources, as well as statistical data.
Yu.A. Myrksina – editing and design of the text and graphic materials of the article.

Оригинальная статья

УДК 631.67:556.12(574.1)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-32-39>

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ПАСТБИЩНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Ф.К. Абдразаков^{1✉}, Т.М. Шадьяров², М.К. Онаев³

¹ Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; 410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3, Российская Федерация

^{2,3} Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана; 090009, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51, Республика Казахстан

¹ abdrzakov.fk@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3247-5257

² talap_mnazhatovich@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6541-9695

³ maratonaev@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5584-1948

Аннотация. Казахстан располагает большим потенциалом в производстве продукции животноводства. В данной отрасли животноводства Западно-Казахстанская область имеет значительную перспективу для развития отгонного животноводства, так как наличие больших площадей пастбищных территорий с естественной кормовой базой позволяет повысить продуктивность животноводства. В то же время основным фактором, влияющим на продуктивность животноводства, является обводненность пастбищных территорий. Цель исследований – мониторинг пунктов отгонного животноводства на обеспеченность водными ресурсами и разработка альтернативного способа обводнения пастбищных территорий. Для определения обеспеченности водными ресурсами в статье представлены сведения о мониторинге действующих пунктов отгонного животноводства в сухостепной, полупустынной и пустынной зонах области, полученные путем обследования фактического состояния источников обводнения. По результатам мониторинга выявлены пункты с маловодными, безводными и минерализованными подземными водоисточниками. Предложен альтернативный способ обводнения пастбищных территорий отгонного животноводства с маловодными, безводными и минерализованными подземными водоисточниками. Суть альтернативного способа обводнения пастбищных территорий заключается в сооружении наземных искусственных водоисточников (бассейн-прудокопань) для обеспечения дополнительными водными ресурсами маловодных, безводных и минерализованных пастбищных территорий отгонного животноводства.

Финансирование. Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан в рамках реализации научно-технической программы «Создание высокопродуктивных пастбищных угодий в условиях Северного и Западного Казахстана и их рациональное использование» по мероприятию «Разработать научно обоснованные решения по оптимальным условиям организации обводнения пастбищ Западно-Казахстанской области» (№ госрегистрации BR06249365).

Ключевые слова: Западно-Казахстанская область, пастбищные территории, подземные водоисточники, минерализация воды, бассейн-прудокопань

Для цитирования: Абдразаков Ф.К., Шадьяров Т.М., Онаев М.К. Обеспеченность водными ресурсами пастбищных территорий Западно-Казахстанской области. Природообустройство. 2026;Т.19(3):32-39. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-32-39>

Scientific article

AVAILABILITY OF WATER RESOURCES IN THE PASTURE AREAS OF THE WEST KAZAKHSTAN REGION

Abdrzakov F.K.^{1✉}, Shadyarov T.M.², Ongayev M.K.³

¹ Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov; 410012, Saratov, Petr Stolypin Avenue, Building 4, Building 3, Russian Federation

^{2,3} Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University; 090009, Uralsk, 51 Zhangir khan Street, Republic of Kazakhstan

¹ abdrzakov.fk@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3247-5257

² talap_mnazhatovich@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6541-9695

³ maratonaev@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5584-1948

Abstract. Kazakhstan has great potential for producing livestock products. In this livestock industry, the West Kazakhstan region has great potential for the development of transhumance, as the availability of large areas

of pastureland with natural feed resources allows for increased livestock productivity. At the same time, the main factor affecting livestock productivity is the water content of pasture areas. The purpose of the study is to monitor the water supply of transhumance livestock farming sites and develop an alternative method for irrigating pasture areas. To determine the availability of water resources, the article provides information on monitoring the current livestock farming sites in the dry steppe, semi-desert, and desert zones of the region by examining the actual condition of the water sources. According to the monitoring results, there are areas with low-water, waterless, and mineralized underground water sources. An alternative method of irrigating pasture areas of transhumant livestock farming with low-water, waterless, and mineralized underground water sources has been proposed. The essence of an alternative method of watering pasture areas is to construct above-ground artificial water sources (ponds) to provide additional water resources to low-water, waterless, and mineralized pasture areas for transhumance livestock farming.

Financing. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan as part of the implementation of the scientific and technical program "Creation of High-Productive Pastures in Northern and Western Kazakhstan and Their Rational Use" under the project "Develop Scientific-Based Solutions for Optimal Conditions for the Organization of Pasture Irrigation in the West Kazakhstan Region" (registration number BR06249365).

Keywords: West Kazakhstan Region, pastures areas, groundwater sources, water mineralization, basin – pond digging

For citation: Abdrazakov F.K., Shadyarov T.M., Ongayev M.K. Availability of water resources in the pasture areas of the West Kazakhstan Region. *Prirodoobustrojsvo*. 2026;19(3):32-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-32-39>

Введение. Казахстан располагает большим потенциалом в производстве продукции животноводства, а для достижения значительных результатов необходимо рационально использовать естественную кормовую базу и обеспечить водными ресурсами пастбищные территории [1]. Одним из поручений Первого Президента Республики Казахстана является восстановление и развитие животноводства мирового уровня, ориентированного на решение проблем рационального использования отгонных пастбищных территорий, организация и эффективное освоение которых на современном этапе сохраняют высокую актуальность [2]. В данной отрасли животноводства Западно-Казахстанская область имеет значительную перспективу для развития отгонного животноводства, так как наличие больших площадей пастбищных территорий с естественной кормовой базой позволяет повысить продуктивность животноводства [3, 4]. Объем водопотребления находится в прямой зависимости от сроков содержания сельскохозяйственных животных на отгонных пастбищах и норм потребления воды для различных видов скота. Сроки содержания скота зависят от климатических условий, продуктивности травостоя и сезона его использования [5].

Территория Западно-Казахстанской области подразделяется на три природные зоны: сухостепную, полупустынную и пустынную. С севера на юг сухостепная зона сменяется на зону полупустынь, полупустынная зона сменяется

на зону пустынь. Из этого следует, что нагрузка на водопойный пункт зависит от продолжительности использования пастбищ. Для северной части области она принимается равной 180 суткам в теплый период (летом – 110 суток, весной и осенью – 70 суток) и 185 суткам в зимний период. Для южного региона теплый период содержания животных составляет 250 суток (150 суток летом и 100 суток весной и осенью) и 115 суток в холодный зимний период [6].

Цель исследований: оценить уровень обеспеченности водными ресурсами пастбищных территорий и разработать оптимальные условия организации обводнения на маловодных, безводных и минерализованных пастбищных территориях отгонного животноводства Западно-Казахстанской области.

Материалы и методы исследований. Мониторинг действующих пунктов отгонного животноводства проведен в период с 2018 по 2020 гг. на пастбищных территориях Западно-Казахстанской области согласно программе и методике исследований поверхностных и подземных водоисточников. Для получения достоверных результатов мониторинга пунктов отгонного животноводства использовали метод системного анализа. Анализ результатов мониторинга выполнен с использованием математической обработки в программе Excel.

Удельную норму водопотребления для водопоя скота при обводнении пастбищ определяют с учетом всех потребителей воды: людей, занятых

в животноводстве, продуктивного и рабочего скота, применяемого сельскохозяйственного оборудования – по формуле:

$$Q_{\text{ср.сут.}} = \sum n_i \cdot q_i, \quad (1)$$

где n_i – количество голов i -й группы животных; q_i – среднесуточное водопотребление сельскохозяйственных животных, л.

При выборе источника хозяйственно-питьевого водоснабжения следует руководствоваться ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая»¹ и ГОСТ 17.1.3.03-77 «Охрана природы. Гидросфера»², а также документом «Правила выбора и оценки качества источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения» [7].

Использование пастбищных территорий часто ограничивается не отсутствием воды, а ее нехваткой и непригодностью для использования. Нехватка воды и соленые водоисточники приводят к дополнительным затратам на транспортировку пресной воды из других водоисточников.

Показатели предельно допустимой минерализации воды, которые используются при разработке схем обводнения пастбищных территорий в Казахстане, представлены в таблице 1.

В соответствии с документом «Указания по проектированию сельскохозяйственного водоснабжения СН 267-63»³ водопойный пункт на пастбищных территориях должен обслуживать не более 2000 гол. овец или 250 гол. крупного рогатого скота, или 250 лошадей.

Количество водопойных пунктов при планировании мероприятий по освоению пастбищных территорий вычисляют по формуле:

$$N_{\text{poi}} = \sum A_n / A_n, \quad (2)$$

где $\sum A_n$ – общая площадь пастбищных территорий, га; A_n – нормативная площадь пастбищных территорий для одного водопойного пункта, га.

Важной задачей развития пастбищного животноводства является решение проблемы обводнения пастбищных территорий. Пастбищное содержание сельскохозяйственных

животных – это система, основанная на использовании пастбищных территорий, находящихся на большом расстоянии от населенных пунктов [8, 9].

Пастбищные территории должны обводняться в первую очередь за счет легко доступных подземных вод первых от поверхности водоносных горизонтов. Восстановление водной инфраструктуры за счет широкого использования подземных вод позволит увеличить площади пастбищ с достаточной кормовой продуктивностью для содержания на них скота мясного направления [10-12].

Для решения поставленных задач осуществлен сбор сведений о водных ресурсах в 12 районах Западно-Казахстанской области, направленный на оценку уровня водообеспечения пастбищных территорий. Проведен отбор проб воды из подземных источников для определения ее качественных и количественных характеристик. Оценено современное состояние инфраструктуры обводненных пастбищных территорий, а также проведена работа по выявлению технических проблем, связанных с эксплуатацией обводнительных сооружений.

Мониторинг водоисточников осуществлен путем обследования их фактического состояния. При обследовании подземных источников обводнения фиксировали координаты водозаборного сооружения, обеспеченность электроэнергией; фотографировали общий вид водопойного пункта; определяли параметры: глубина колодца, статический и динамический уровень воды, диаметр обсадной колонны скважины, дебит колодца и скважины, техническое состояние водопойного пункта и поильных площадок.

Гидрохимический анализ воды выполнен химическими и физико-химическими методами согласно принятым методико-нормативным документам: измерение pH – согласно ГОСТ 26449.1-85 «Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы химического

Таблица 1. Предельная минерализация воды в пунктах водопоя, мг/л

Table 1. Maximum water mineralization at watering points, mg/l

Вид животных / Type of animals	Сезоны использования пастбищных территорий / Seasons of using pasture areas		
	Летние / Summer	Весенне-осенние / Spring and autumn	Зимние / Winter
Овцы и козы / Sheep and goats	600	800	10000
Крупный рогатый скот / Cattle	5000	6000	–
Лошади / Horses	5000	6000	6000
Верблюды / Camels	6000	8000	12000

¹ ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая».

² ГОСТ 17.1.3.03-77 «Охрана природы. Гидросфера».

³ СН 267-63 «Указания по проектированию сельскохозяйственного водоснабжения».

анализа соленых вод», ГОСТ 31957-2012 «Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов»; содержание хлоридов – по ГОСТ 4245-72 «Вода питьевая. Методы определения содержания хлоридов»; определение азота аммонийного, нитритов, нитратов – по ГОСТ 33045-2014 «Вода. Методы определения азотсодержащих веществ» спектрофотометрическим методом на приборе Varian, Cary-50; определение общей жесткости, кальция и магния – согласно ГОСТ 26449.1-85 «Установки дистилляционные опреснительные стационарные».

Результаты и их обсуждение. В период реализации научно-технической программы проведен мониторинг действующих крестьянских хозяйств Западно-Казахстанской области на обеспеченность водными ресурсами пастбищных территорий [13]. Всего обследовали 387 колодцев и 301 скважину (табл. 2).

Из общего количества обследованных подземных водоисточников в пунктах отгонного животноводства 387 ед. (56%) представлено шахтными колодцами, 301 ед. (44%) – скважинами.

Обобщенные сведения о количестве и технических характеристиках колодцев и скважин, функционирующих на пастбищных территориях, в разрезе 12 районов Западно-Казахстанской области, приведены в таблице 3.

Из анализируемых 12 районов области в 7 районах (Жанибекский, Акжаикский, Бокейординский, Жангалинский, Казталовский, Каратобинский, Сырымский) количество колодцев превышает количество скважин; в остальных районах имеет место существенное преобладание количества скважин над количеством колодцев.

На основе приведенных количественных данных определено то, какая часть из общего числа колодцев и скважин приходится на каждый район Западно-Казахстанской области. Наибольший удельный вес в структуре скважин занимают

Казталовский район (удельный вес района – 23%), Жанибекский (18%), Бокейординский (13%) и Теректинский (12%) районы. В структуре колодцев преобладают Бокейординский (с удельным весом 35%), Казталовский (19%), Жангалинский (14%), Акжаикский (13%) районы. Наименьшая доля скважин наблюдается в Жангалинском районе (0,33%), наименьшая доля колодцев – в Таскалинском (0,26%), Чингирлауском (0,52%) и Бурлинском (0,78%) районах области.

При разделении территории области 55% колодцев находятся в сухостепной зоне, 55% скважин – в полупустынной зоне. Если относительно скважин удельный вес пустынной зоны составляет 2%, то относительно колодцев наименьший удельный вес наблюдается в сухостепной зоне, где сосредоточен только 21% всех колодцев области. Из этого следует, что большинство колодцев и скважин сосредоточено на территориях районов, чьи хозяйства находятся на значительном расстоянии от естественных водоисточников.

Одним из важнейших показателей качества подземных вод является их минерализация. Анализ уровня минерализации воды в колодцах и скважинах сухостепной, полупустынной и пустынной зон Западно-Казахстанской области представлен на рисунке 1.

Как следует из данных рисунка 1, среди колодцев и скважин сухостепной и полупустынной зон Западно-Казахстанской области количество вод, относящихся к категориям солоноватых, составляет 54-56%, то есть больше количества пресных, однако встречаются воды соленой категории, составляющие 8-11%. Подземные воды пустынной зоны по степени минерализации относятся к категории пресных и солоноватых, из чего следует, что все выделенные территориальные зоны имеют разную степень минерализации. Это связано с широкой территориальностью зон, состоящих из нескольких районов, имеющих, соответственно, различные природные условия.

Таблица 2. Сводные сведения по колодцам и скважинам Западно-Казахстанской области
Table 2. Summary information on wells and boreholes in the West Kazakhstan Region

Зоны / Zones	Количество, шт / Quantity, pcs	Глубина, м / Depth, m	Размеры, мм / Dimensions, mm	Дебит, дм ³ /с / Debit, dm ³ /s	Минерализация, г/дм ³ / Mineralization, g/dm ³
Всего колодцев – 387 / Total wells – 387					
Сухостепная / Dry Steppe	80	2,6-21,58	0,6-2	0,027-1,98	0,28-11,85
Полупустынная / Semi-desert	212	2,9-22,5	1,0-4,0	0,01-2,7	0,17-16,59
Пустынная / Desert	95	1,8-13	0,36-3,2	0,02-1,46	0,16-9,52
Всего скважин – 301 / Total wells – 301					
Сухостепная / Dry Steppe	166	8,0-120,0	40-219	0,05-4,0	0,22-11,5
Полупустынная / Semi-desert	130	12,0-91,0	113-219	0,16-2,8	0,2-27,4
Пустынная / Desert	5	18,0-60,0	101,5-125	0,8-1,7	0,22-4,0

Таблица 3. Сведения о колодцах и скважинах в разрезе районов Западно-Казахстанской области

Table 3. Information about wells and boreholes in the districts of the West Kazakhstan Region

Районы / Districts	Количество, шт / Quantity, pcs	Глубина, м / Depth, m	Размеры / диаметр, мм / Dimensions / diameter, mm	Дебит, $\text{дм}^3/\text{с}$ / Debit, dm^3/s	Минерализация, $\text{г}/\text{дм}^3$ / Mineralization, g/dm^3
Всего колодцев – 387 / Total wells – 387					
Акжаикский / Akzhaiksky	50	3,9-13,5	1,0-2,0	0,04-1,0	0,28-11,85
Бокейординский / Bokeyordinsky	136	1,8-22,5	0,36-3,0	0,02-1,8	0,16-9,36
Бурлинский / Burlinsky	3	5,5-6,5	0,6-1,2	0,52-0,52	0,89-10,17
Жангалинский / Zhangalinsky	53	2,7-7,7	1,0-3,5	0,02-2,7	0,17-9,9
Жанибекский / Zhanibeksky	23	5,0-15,5	1,0-1,6	0,01-1,58	0,48-8,77
Казталовский / Kaztalovsky	75	4,0-21,58	1,0-2,0	0,07-1,38	0,34-10,51
Каратобинский / Karatobinsky	18	2,9-17,0	1,2-4,0	0,28-2,09	0,34-16,59
Сырымский / Syrymsky	22	3,8-9,9	1,2-1,5	0,16-0,94	0,28-9,87
Таскалинский / Taskalinsky	1	8,1	1,2	0,83	0,39
Теректинский / Terektinsky	4	5,4-6,3	1,2	0,18-1,98	0,34
Чингирлауский / Chingirlausky	2	4,3-5,0	1,2-1,5	0,28-0,3	0,46-2,39
Всего скважин – 301 / Total wells – 301					
Акжаикский / Akzhaiksky	23	18-38	40-127	0,16-2,4	0,6-9,3
Байтерекский / Baytereksky	10	12-80	114-168	0,05-4	0,7-3,6
Бокейординский / Bokeyordinsky	41	12-80	101-125	0,4-2,1	0,22-11,6
Бурлинский / Burlinsky	10	15-120	40-114	0,13-3	1,1-9,1
Жангалинский / Zhangalinsky	1	30	114	0,3	1,2
Жанибекский / Zhanibeksky	54	15-80	100-125	0,2-3	0,5-11,5
Казталовский / Kaztalovsky	82	20-93	114-202	0,4-3	0,4-27,4
Каратобинский / Karatobinsky	23	15-50	114-219	0,3-1,7	0,2-11,84
Сырымский / Syrymsky	14	20,5-60	40-125	0,2-3,5	0,38-7,1
Таскалинский / Taskalinsky	10	8-64	114-127	0,3-4	0,22-6,2
Теректинский / Terektinsky	27	21-91	40-219	0,06-4	0,39-7,2
Чингирлауский / Chingirlausky	6	25-50	114-168	0,3-1,1	0,35-6,8

Анализ конструкции колодцев показал, что из общего количества обследованных колодцев по области 319 – шахтные (82%), 68 (18%) – со сруба. Если учитывать географическое местоположение, то в сухостепной зоне находится 12%, в полупустынной – 34%, в пустынной – 54% колодцев соответственно. В сухостепной и полупустынной зонах преобладают колодцы шахтного типа – кольцо железобетонной конструкции диаметром 0,9-1,2 м. В пустынной зоне стенки колодцев укреплены деревом (досками), но встречаются также колодцы, для укрепления стен которых используются металлические цистерны объемом до 20 т.

Обследованные колодцы являются в основном малодебитными, то есть со слабым наполнением колодца водой до статического уровня. Время наполнения колодца составляет от 5 до 24 ч. В зависимости от вида и поголовья скота в некоторых пунктах отгонного животноводства (28%) выкапывают до 4-х колодцев различной глубины, а также осуществляют подвоз воды из открытых водоисточников либо с соседних пастбищных территорий.

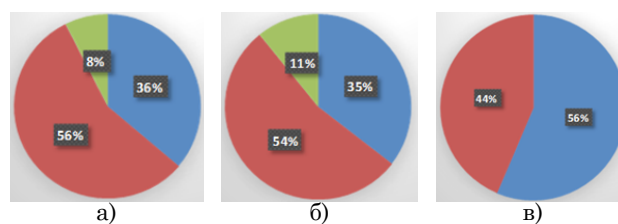


Рис. 1. Разделение подземных вод по категориям минерализации (синий цвет – пресная, красный цвет – солоноватые, зеленый цвет – соленые): а) сухостепная зона; б) полупустынная зона; в) пустынная зона

Fig. 1. Classification of groundwater by mineralization category (blue – fresh, red – brackish, green – salty): а) dry steppe zone; б) semi-desert zone; в) desert zone

Установлено, что из всех обследованных подземных водоисточников 56% составляют шахтные колодцы. Шахтные колодцы с уложенными железобетонными кольцами Ø 0,9-1,2 м и металлической конструкцией Ø 1,5-3,2 м составили 82%. Остальные 18% – это колодцы со сруба,

у которых стены укреплены досками или плетеными прутьями размером $1,0 \times 1,0-2,5 \times 2,5$ м.

Из общего количества обследованных скважин по области выяснилось, что в качестве обсадной трубы используются металлические трубы $\varnothing 40-219$ мм, но в последние годы стали применяться пластиковые трубы ПВХ $\varnothing 116-125$ мм.

Анализ оснащённости водоисточников показал, что 75% обследованных пунктов отгонного животноводства имеют современное оборудование для подъёма воды (глубинный насос – 49%, дренажный насос – 51%). В хозяйствах, где отсутствует электричество, что составляет 10% для подачи воды, используют бензиновые мотопомпы. Пункты, где воду поднимают с помощью ленточного водоподъёмника, составляют 5%, и только 10% крестьянских хозяйств поднимают воду с колодца вручную с помощью рычажного механизма «Журавль», используя ведро на веревке. В этих хозяйствах поголовье скота небольшое, а глубина колодцев составляет 2-4 м.

Обеспечение водными ресурсами крестьянских хозяйств, занимающихся отгонным разведением сельскохозяйственных животных, было и остается важной задачей. Высокие показатели минерализации подземных вод, маловодные и безводные пастбищные территории отгонного

животноводства являются основными негативными факторами, влияющими на возможности расширения и увеличения поголовья сельскохозяйственных животных. Для решения данной проблемы получен патент Республики Казахстан на полезную модель № 6915 [14].

Суть полезной модели заключается в сооружении наземных искусственных водоисточников для обеспечения дополнительными водными ресурсами маловодных, безводных и минерализованных пастбищных территорий отгонного животноводства (рис. 2).

Перед началом проектирования искусственных водоисточников на маловодных, безводных и минерализованных пастбищных территориях необходимо обследовать рельеф местности пунктов отгонного животноводства. Для этого нужно определить понижения рельефа местности, которые обеспечат наибольший сток талой и дождевой воды. Данную работу можно выполнить, используя спутниковую GIS-систему, либо провести ее в весеннее время года при обильном снеготаянии. После определения места расположения наземных искусственных водоисточников необходимо выкопать один основной с подземными водоисточниками и два дополнительных бассейна-прудокопани с 4-сторонним притоком для

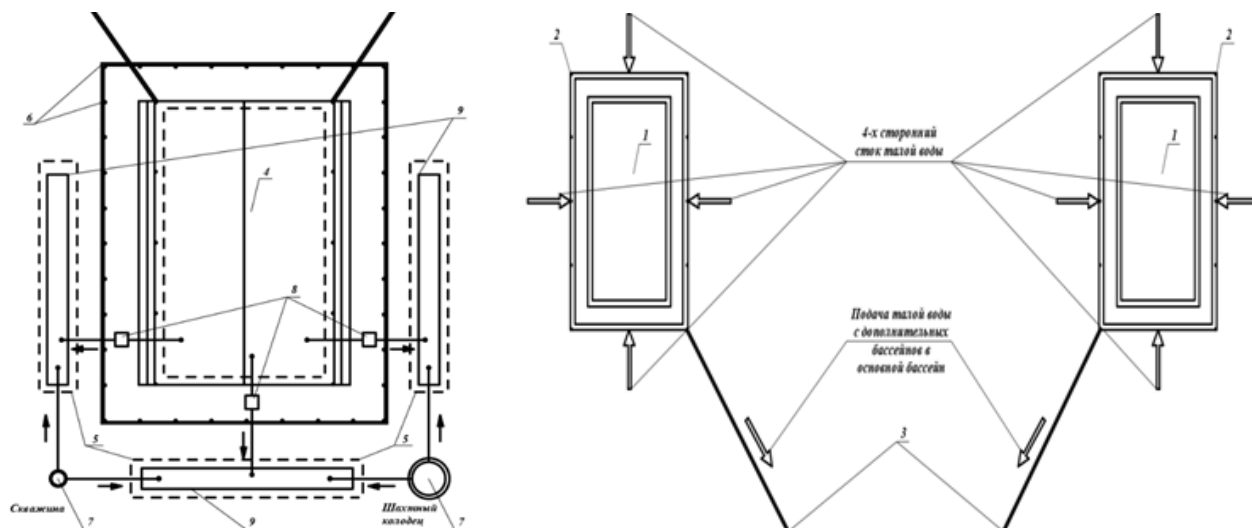


Рис. 2. Сооружение наземного искусственного водоисточника (бассейн-прудокопань) для обеспечения дополнительными водными ресурсами маловодных, безводных и минерализованных пастбищных территорий отгонного животноводства:

- 1 – дополнительные бассейны-прудокопани; 2 – металлическое ограждение дополнительных бассейнов-прудокопаней; 3 – водопроводные трубы из ПВХ; 4 – основной бассейн-прудокопань; 5 – поильные площадки; 6 – металлическое ограждение основного бассейна-прудокопани; 7 – подземные водоисточники (колодец, скважина); 8 – насосные станции (электрический насос или бензиновая мотопомпа); 9 – поильные корыта

Fig. 2. Construction of a ground-based artificial water source (pond) to provide additional water resources for low-water, waterless, and mineralized pasture areas in transhumant livestock farming:

- 1 – additional pools – ponds; 2 – metal fencing of additional pools – ponds; 3 – PVC water pipes; 4 – main pool – pond; 5 – watering areas; 6 – metal fencing of the main pool – pond; 7 – underground water sources (well, borehole); 8 – pumping stations (electric pump or gasoline motor pump); 9 – watering troughs

сбора талой воды со всех сторон во время обильного снеготаяния. Размеры бассейнов-прудокопаней устанавливаются с учетом требуемого объема воды, необходимого для обеспечения сельскохозяйственного скота в весенне-осенний период, находящегося в пункте отгонного животноводства. Сбор воды в основной и дополнительные бассейны-прудокопаны должен осуществляться при обильном таянии снега в весеннее время года, а также при выпадении осадков в виде дождя весной, летом и осенью. Для предотвращения доступа скота к открытым бассейнам-прудокопаням по всему периметру основного и дополнительных бассейнов-прудокопаней устанавливаются металлические ограждения. После проведения земляных работ по обустройству бассейнов-прудокопаней необходимо проложить водопроводные трубы из ПВХ от дополнительных бассейнов-прудокопаней к основному на глубину 1-1,5 м. Подача воды с дополнительных бассейнов-прудокопаней к основному предусматривается двумя способами: самотеком за счет разности отметок уровней воды и в принудительном режиме с применением насосной установки. Это нужно для поддержания необходимого объема воды в основном

бассейне-прудокопани с дополнительной возможностью снижения уровня минерализации в колодце и скважине при смешивании в основном бассейне-прудокопани минерализованной подземной воды.

Выводы

Положительный эффект от применения предлагаемого способа обводнения пастбищных территорий достигается за счет поддержания необходимого объема воды в основном бассейне-прудокопани. Это обеспечивается путем подачи определенного количества воды из дополнительных бассейнов-прудокопаней для ее смешивания с минерализованными подземными водами, поступающими из колодца и скважины, расположенных у основного бассейна-прудокопани. Использование предлагаемого искусственного водоисточника как способа обводнения позволит увеличить объемы пресной воды на маловодных, безводных и минерализованных пастбищных территориях отгонного животноводства, обеспечивая стабильное водоснабжение большого количества сельскохозяйственного скота на протяжении всего года.

Список использованных источников

1. Калиев Г.А., Сабирова А.И., Никитина Г.А. Природные ресурсы стран Центральной Азии, Кавказа, Казахстана и их региональная интеграция // Проблемы агрорынка. 2013. № 3.
2. Государственная программа «Агробизнес-2020». 2013.
3. Ongayev M., Sultanova Z., Denizbayev S., Ozhanov G., Abisheva S. Engineering and Process Infrastructure of the Agro-Industrial Complex // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2019. Vol. 7, № 12. Pp. 879-885.
4. Оңаев М.К., Ожанов Г.С., Денизбаев С.Е., Шадьяров Т.М. Батыс Қазақстан облысы жағдайында жайылымдық алқаптарды суландыру мәселесі // Ғылым және білім. 2020. № 2-2 (59). Б. 54-61.
5. Комплексное освоение кормовых угодий / Под ред. С.А. Абдильдина. Алма-Ата: Кайнар, 1986. 208 с.
6. Об утверждении Методики по разработке удельных норм водопотребления и водоотведения: Приказ заместителя Премьер-Министра Республики Казахстан – Министра сельского хозяйства Республики Казахстан от 30 декабря 2016 г. № 545.
7. Тажибаев Л.Е., Усенко В.С., Николадзе Г.И. и др.; Мелиорация и водное хозяйство. Сельскохозяйственное водоснабжение: Справочник. Т. 7 / Под ред. В.Н. Олейника. М.: Агропромиздат, 1992. – 287 с.
8. Тажибаев Л.Е. Основы водоснабжения и обводнения сельскохозяйственных районов Казахстана. Алма-Ата: Кайнар, 1969. 300 с.
9. Калиев Г.А., Сабирова А.И. Развитие пастбищного животноводства в Казахстане // Проблемы агрорынка. 2016. Январь-март. С. 7-14. EDN: WDFSVF
10. Муханова Г.К. Обводнение пастбищ в Казахстане: сложности и новые пути // Материалы Международной научно-практической конференции. Т. IV. Новая стратегия научно-образовательных приоритетов в контексте развития АПК. Алматы: КазНАУ, 2016. С. 150-153

References

1. Kaliev G.A., Sabirova A.I., Nikitina G.A. Natural Resources of Central Asian, Caucasian, and Kazakh Countries and Their Regional Integration // Problems of the Agro-Market. 2013. № 3.
2. State Program «Agribusiness 2020», 2013.
3. Ongayev M., Sultanova Z., Denizbayev S., Ozhanov G., Abisheva S. Engineering and Process Infrastructure of the Agro-Industrial Complex // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2019. Volume 7, No. 12. P. 879-885.
4. Ongayev M.K., Ozhanov G.S., Denizbayev S.E., Shadyarov T.M. The Issue of Pasture Irrigation under the Conditions of the West Kazakhstan Region // Science and Education. – 2020. No. 2-2 (59). – P. 54-61.
5. Comprehensive Development of Fodder Lands. Edited by S.A. Abdildin. Alma-Ata: Kainar, 1986. 208 p.
6. Order No. 545 of the Deputy Prime Minister of the Republic of Kazakhstan – Minister of Agriculture of the Republic of Kazakhstan dated December 30, 2016, “On Approval of the Methodology for Developing Specific Water Consumption and Water Disposal Rates”.
7. Land Reclamation and Water Management. Vol. 7. Agricultural Water Supply: Handbook / Tazhibayev L.E., Usenko V.S., Nikoladze G.I., et al.; Ed. Oleynik V.N. – Moscow: Agropromizdat, 1992. – 287 p.
8. Tazhibayev L.E. Fundamentals of water supply and irrigation of agricultural areas of Kazakhstan. Alma-Ata: Kainar, 1969. 300 p.
9. Kaliev G.A., Sabirova A.I. Development of Pastoral Livestock Farming in Kazakhstan // Problems of the Agro-Market. – 2016. – January – March. – P. 7-14.
10. Mukhanova G.K. Irrigation of Pastures in Kazakhstan: Difficulties and New Ways // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – Vol. IV: New Strategy of Scientific and Educational Priorities in the Context of Agricultural Development. Almaty: KazNAU, 2016. P. 150-153.

11. Сабирова А.И. Регулирование процессов использования приаульных пастбищ и вовлечение земель запаса на основе их обводнения с применением возобновляемых источников энергии // Материалы Международной научно-практической конференции. Т. IV. Новая стратегия научно-образовательных приоритетов в контексте развития АПК. Алматы: КазНАУ, 2016. С. 157-161

12. Сыдыков Ж.С., Джакелов А.К., Джабасов М.Х., Мухамеджанов М.А., Шлыгина В.Ф. Подземные воды Казахстана. Ресурсы, использование и проблемы охраны. Алматы, 1999. 284 с.

13. Разработать научно обоснованные решения по оптимальным условиям организации обводнения пастбищ Западно-Казахстанской области: Отчет по НИР (промежуточный) / НАО «ЗКАТУ им. Жангир хана», рук. М.К. Оңаев. Уральск, 2019. 168 с.

14. Оңаев М.К., Шадьяров Т.М., Денизбаев С.Е., Ожонов Г.С., Умбеткалиев Н.М. Способ обводнения пастбищ искусственным водоемчиком: Патент Республики Казахстан на полезную модель № 6915. Заявитель и патентообладатель Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана; заявл. № 2022/0070.2; Бюлл. № 9 от 04.03.2022 г.

Информация об авторах

Фярид Кинжаевич Абдразаков, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Гидромелиорация, природообустройство и строительство в АПК» Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; ORCID: 0000-0003-3247-5257; abdrzakov.fk@mail.ru

Талап Мназатович Шадьяров, соискатель Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; магистр техн. наук, эксперт-аналитик научной деятельности сектора по научной работе Департамента науки и коммерциализации технологий Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана; ORCID: 0000-0001-6541-9695; talap_mnazhatovich@mail.ru

Марат Кайрлыулы Оңаев, канд. техн. наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра «Гидротехника и мелиорация» Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана; ORCID: 0000-0001-5584-1948; maratonaev@mail.ru

Вклад авторов

Ф.К. Абдразаков – осуществлял формулирование концепции и основные направления исследования, разработку методологии экспериментальных исследований, обоснование актуальности проблемы, а также участвовал в формировании общих выводов и редактировании рукописи.

Т.М. Шадьяров – выполнил экспериментальные исследования, сбор, верификация и формальный анализ данных, обзор источников литературы, подготовку черновика рукописи, её доработку, графическое оформление и подготовку окончательной версии текста статьи.

М.К. Оңаев – осуществлял методологическое сопровождение и руководство проведением исследований, разработку и использование программного обеспечения, участие в интерпретации результатов, а также рецензирование и редактирование текста статьи.

Все авторы приняли участие в обсуждении результатов исследования и утвердили окончательную версию рукописи

Конфликт интересов / Criteria of authorship

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

Поступила в редакцию / Received 22.12.2025

Поступила после рецензирования / Received 14.04.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 17.04.2026

11. Sabirova A.I. Regulation of the processes of using pasturelands and the involvement of reserve lands based on their irrigation using renewable energy sources // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Vol. IV: New Strategy of Scientific and Educational Priorities in the Context of Agricultural Development. – Almaty: KazNAU, 2016. – P. 157-161.

12. Sydykov Zh.S., Dzhakelov A.K., Dzhabasov M.Kh., Mukhamedzhanov M.A., Shlygina V.F. Groundwater of Kazakhstan. Resources, Use and Problems of Protection. – Almaty, 1999. – 284 p.

13. Develop scientifically based solutions for optimal conditions for irrigation of pastures in the West Kazakhstan region: Research report (interim) / NAO «ZHKTU named after Zhangir Khan» ed. Ongayev M.K., – Uralsk, 2019. – 168 p.

14. Ongayev M.K., Shadyarov T.M., Denizbaev S.E., Ozhanov G.S., Umbetkaliev N.M. Method of watering pastures with an artificial water source // Patent of the Republic of Kazakhstan for utility model No. 6915. the applicant and the patent holder Zap. Kaz. agr. tech. univ-t named after Zhangir Khan., application No. 2022/0070.2., publ. Bulletin No. 9 dated 04.03.2022.

Information about the authors

Fyaryd K. Abdrzakov, DSs (Tech), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of the Department of Hydro-Melioration, Environmental Engineering, and Construction in the Agro-Industrial Complex of the N.I. Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology, and Engineering; ORCID: 0000-0003-3247-5257; abdrzakov.fk@mail.ru

Talap M. Shadyarov, Applicant at the N.I. Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology, and Engineering; Master of Technical Sciences, Expert Analyst of Scientific Activities in the Department of Science and Technology Commercialization at Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University; ORCID: 0000-0001-6541-9695; talap_mnazhatovich@mail.ru

Marat K. Ongayev, CSs (Tech), Professor, Head of the Scientific and Educational Center “Hydraulic Engineering and Land Reclamation” at Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University; ORCID: 0000-0001-5584-1948; maratonaev@mail.ru

Contribution of the authors

F.K. Abdrzakov – formulated the concept and main research directions, developed the methodology of experimental research, justified the relevance of the problem, and also participated in the formation of general conclusions and editing of the manuscript.

T.M. Shadyarov – performed experimental research, collection, verification and formal analysis of data, review of literature sources, preparation of a draft of the manuscript, its revision, graphic design and preparation of the final version of the text of the article.

M.K. Ongayev – provided methodological support and guidance for conducting research, developing and using software, participating in the interpretation of results, as well as reviewing and editing the text of the article.

All the authors participated in the discussion of the research results and approved the final version of the manuscript

Обзорная статья

УДК 631.4:551.583

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-40-46>

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА УПЛОТНЕНИЕ ПОЧВЫ

И.Н. Гаспарян¹, О.Н. Ивашова^{2✉}, Ш.В. Гаспарян³, Н.Ф. Денискина⁴

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова; г. Москва, 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

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Технологический институт; г. Москва, Российская Федерация

⁴ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Агробиотехнологий институт; г. Москва, Российская Федерация

¹ irina150170@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-4702-0095

² o.ivashova@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-9206-9862

³ gas_shag@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-7161-3654

⁴ ndeniskina@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3111-6869

Аннотация. В статье рассматривается влияние современных климатических изменений на процессы уплотнения почвы как одного из ключевых факторов снижения продуктивности агроэкосистем. Показано, что изменение климата в России проявляется не только в росте температуры (до 0,47°C за десятилетие), но и в трансформации гидротермического режима включая повышение частоты экстремальных осадков, изменение сезонности и рост климатической нестабильности. Установлено, что основным механизмом усиления уплотнения почвы является изменение водного режима почв: при увеличении доли ливневых осадков ухудшается инфильтрация влаги, усиливаются поверхностный сток и эрозия, формируется почвенная корка. Особое внимание уделено изменению физических свойств почвы. Уплотнение почвы сопровождается повышением плотности сложения (с 1,1-1,2 до 1,4-1,6 г/см³), снижением общей пористости (с 50-55 до 35-40%), ухудшением структуры и разрушением агрегатов. Это приводит к снижению водопроницаемости, ухудшению аэрации и нарушению газообмена, что ограничивает поступление кислорода к корням растений и почвенной биоте. Изменение соотношения твердой, жидкой и газовой фаз почвы ухудшает условия развития корневой системы и снижает эффективность использования влаги и элементов питания. Отмечается, что сочетание повышенной влажности почвы и роста массы сельскохозяйственной техники приводит к формированию устойчивых уплотненных горизонтов включая плужную подошву, что вызывает потери урожайности до 10-40%. Дополнительно рассматривается роль почвенной биоты, чувствительной к изменениям физического состояния почвы. В работе показано, что уплотнение почвы в условиях климатических изменений носит накопительный характер, формируя замкнутый цикл деградации, и требует комплексных мер адаптации сельского хозяйства.

Ключевые слова: изменение климатических условий, физические свойства, уплотнение почвы, плотность сложения, газообмен

Для цитирования: Гаспарян И.Н., Ивашова О.Н., Гаспарян О.Н., Денискина Н.Ф. Влияние изменения климата на уплотнение почвы. Природообустройство. 2026;Т.19(3):40-46. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-40-46>

Scientific article

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON SOIL COMPACTION

I.N. Gasparyan¹, O.N. Ivashova^{2✉}, Sh.V. Gasparyan³, N.F. Deniskina⁴

¹ FGBNU "All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov", Moscow, Russian Federation

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after Moscow, Russian Federation

³ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Institute of Technology, Moscow, Russian Federation

⁴ RGAU-MSHA named after K.A. Timiryazev N. Kostyakov, Institute of Agrobiotechnologies; Moscow, Russian Federation

¹ irina150170@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-4702-0095

² o.ivashova@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-9206-9862

³ gas_shag@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-7161-3654

⁴ ndeniskina@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3111-6869

Abstract. The article considers the impact of modern climate change on soil compaction processes as one of the key factors reducing the productivity of agroecosystems. It is shown that climate change in Russia

is manifested not only in the increase in temperature (up to 0.47°C per decade), but also in the transformation of the hydrothermal regime, including an increase in the frequency of extreme precipitation events, a change in seasonality, and an increase in climatic instability. It has been established that the main mechanism for increasing compaction is a change in the water regime of soils: with an increase in the proportion of heavy precipitation, moisture infiltration deteriorates, surface runoff and erosion increase, and a soil crust forms. Particular attention is paid to changes in the physical properties of the soil. Compaction is accompanied by an increase in bulk density (from 1.1-1.2 to 1.4-1.6 g/cm³), a decrease in total porosity (from 50-55% to 35-40%), deterioration of the structure, and the destruction of aggregates. This leads to decreased water permeability, impaired aeration, and disrupted gas exchange, limiting oxygen supply to plant roots and soil biota. Changes in the ratio of solid, liquid, and gas phases in the soil worsen the conditions for root development and reduce the efficiency of moisture and nutrient use. It is noted that the combination of increased soil moisture and increased agricultural machinery mass leads to the formation of stable compacted horizons, including plow pans, causing yield losses of up to 10-40%. The role of soil biota, which is sensitive to changes in the physical condition of the soil, is also considered. The study demonstrates that compaction under climate change is cumulative, creating a vicious cycle of degradation and requiring comprehensive agricultural adaptation measures.

Keywords: climate change, physical properties, compaction, bulk density, gas exchange

For citation: Gasparyan I.N., Ivashova O.N., Gasparyan O.N., Deniskina N.F. The impact of climate change on soil compaction. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):40-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-40-46>

Введение. В последние десятилетия на территории России наблюдается устойчивое изменение климатических условий, проявляющееся не только в росте температуры, но и в качественной трансформации гидротермического режима. Согласно данным Росгидромета скорость потепления в России составляет около 0,47°C за десятилетие, что существенно превышает среднемировые значения [1-3]. Однако более важным является не сам факт повышения температуры, а изменение структуры климатических факторов, определяющих продукционный процесс в агроэкосистемах.

Агроклиматические изменения приводят к трансформации земледелия. Так, удлинение вегетационного периода на 10-20 суток [1-3], зафиксированное в средней полосе России, создает предпосылки для увеличения продуктивности. Однако, как показывают исследования Hatfield & Prueger (2015), увеличение длительности вегетации является эффективным только при достаточном уровне влагообеспеченности и отсутствии температурного стресса [4]. Практические наблюдения в России подтверждают эту закономерность. Так, в ряде хозяйств Центрального федерального округа внедрение позднеспелых сортов зерновых и масличных культур позволило повысить урожайность на 8-12%, однако в засушливые годы этот эффект нивелируется [5].

Результаты исследований, опубликованные в международных журналах (например, Lobell et al., 2021; Asseng et al., 2019), показывают, что повышение температуры на 1°C при прочих равных условиях может приводить к снижению

урожайности зерновых культур на 5-7% вследствие ускорения фенологических фаз и сокращения периода наливания зерна [1-2]. Это подтверждает, что эффект потепления имеет нелинейный характер и зависит от взаимодействия температуры с водным режимом и состоянием почвы.

Особенно значимые изменения фиксируются в зимний период. Потепление зим на 2-3°C сопровождается учащением оттепелей и сокращением устойчивого снежного покрова [6]. По данным IPCC (2021), это приводит к увеличению частоты циклов «Замерзание-оттаивание», что вызывает разрушение почвенной структуры и снижение агрегатной устойчивости [7-10]. В условиях сельскохозяйственного использования это напрямую связано с повышением риска уплотнения почвы в весенний период.

Цель исследований: рассмотреть влияние современных климатических изменений на процессы уплотнения почвы как одного из ключевых факторов снижения продуктивности агроэкосистем.

Материалы и методы исследований. Почва является основным производственным ресурсом в растениеводстве. Ее физические, химические и биологические свойства определяют водный и воздушный режимы, доступность элементов питания и условия развития корневой системы растений. Нарушение структуры почвы вследствие переуплотнения приводит к деградации агроландшафтов и снижению эффективности применения удобрений и средств защиты растений [6].

В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства проблема уплотнения почвы приобретает системный характер особенно при изменении климата. Изменение климата усиливает процессы уплотнения почвы не напрямую, а через изменение водного режима, увеличение частоты экстремальных осадков и нарушение агротехнологических сроков, в связи с чем требует комплексного научного подхода, включающего в себя инженерные, агрономические и цифровые решения.

Оптимальное состояние пахотного слоя характеризуется определенным соотношением твердых частиц, воды и воздуха. Корневая система растений является одним из наиболее чувствительных элементов агроценоза к изменению физических свойств почвы. Глубина проникновения в почву корней растений в естественном ареале довольно глубокая – до 2-2,5 м [11]. При подготовке почвы стандартная глубина вспашки составляет около 20-25 см [12]. Многолетнее использование одинаковой глубины обработки привело к формированию плужной подошвы – плотного подпахотного горизонта. Повышенная плотность почвенного слоя ограничивает проникновение корней в глубь профиля, снижает объем доступной влаги и элементов питания [11]. Как следствие, на уплотненных участках почвы наблюдаются снижение урожайности зерновых культур, ухудшение структуры урожая и уменьшение массы зерна. Для корнеклубнеплодов характерными являются формирование деформированных органов, снижение товарных качеств и ухудшение условий хранения [13].

Наиболее опасным является сочетание повышенной влажности почвы в периоды проведения полевых работ с ростом массы сельскохозяйственной техники, что приводит к формированию устойчивых уплотненных горизонтов (рис. 1) и снижению продуктивности агроэкосистем.

Уплотнение почвы приводит также к повышению энергетических затрат при выполнении полевых работ. Возрастает тяговое сопротивление рабочих органов машин, увеличивается расход топлива и снижается производительность агрегатов [14].

Основным механизмом влияния изменения климата на уплотнение почвы является изменение ее влажностного режима. Несмотря на увеличение годового количества осадков на 5-10%, их агрономическая эффективность снижается [6, 12]. Исследования Fischer et al. (2020) показывают, что увеличение доли интенсивных осадков (ливней) приводит к таким последствиям, как снижение инфильтрации влаги в почву,

усиление поверхностного стока, рост водной эрозии, формирование плотной почвенной корки [16]. В результате формируется парадоксальная ситуация: при формальном увеличении осадков фактическая влагообеспеченность растений ухудшается. Это связано с ростом испаряемости, который, по оценкам Allen et al. (FAO), увеличивается на 2-4% при повышении температуры на 1°C [16].

Ключевой принцип заключается в том, что при повышении влажности почва становится более уязвимой к механическому воздействию. Это обусловлено тем, что вода снижает прочность почвенных агрегатов, повышает пластичность почвы и облегчает разрушение порового пространства под действием сельскохозяйственной техники.

Интенсивные осадки также способствуют формированию поверхностной корки вследствие разрушения структуры и заплывания почвы. Это ухудшает аэрацию, снижает полевую всхожесть культур и усиливает эрозионные процессы [17].

В условиях современных климатических изменений наблюдается рост доли ливневых осадков, характеризующихся высокой интенсивностью и кратковременностью. В результате почва быстро переувлажняется, а полевые работы зачастую осуществляются при избыточной влажности. Это приводит к формированию как поверхностного, так и подпочвенного уплотнения.

Исследования (Daryanto et al., 2017) показывают: засухи, даже кратковременные, в критические фазы развития растений (кущение, цветение) могут снижать урожайность на 20-50% [18], что коррелирует с наблюдаемыми тенденциями для Поволжья и Центрального региона.

Дополнительную опасность представляет чередование периодов избыточного увлажнения

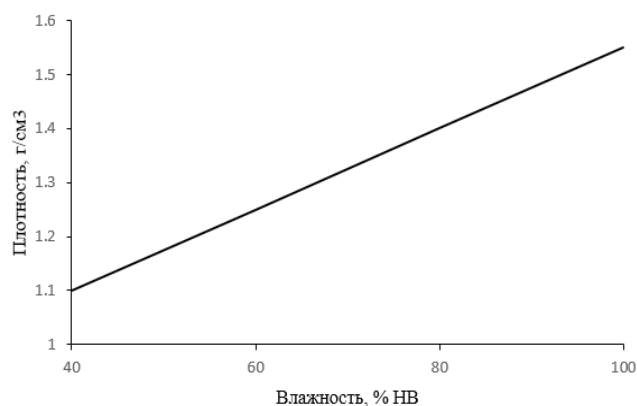


Рис. 1. Зависимость плотности почвы от влажности

Fig. 1. Dependence of soil density on moisture

и засухи. После насыщения влагой почва резко высыхает, ее структура разрушается, формируется плотная корка и происходит заплывание верхнего слоя, что усиливает процессы уплотнения почвы.

Засуха также влияет на уплотнение почвы и носит двойственный характер. С одной стороны, снижение влажности уменьшает непосредственную восприимчивость почвы к уплотнению, с другой – происходит деградация структуры почвы: уменьшается содержание органического вещества, снижается биологическая активность, ухудшаются агрегатная структура и устойчивость агрегатов. В результате последующего увлажнения такие почвы легко разрушаются и подвергаются вторичному уплотнению.

В условиях изменения климата, особенно при учащении засух, переувлажнения и резких колебаний температуры, ухудшаются условия существования дождевых червей, почвенной мезо- и микрофауны, а также микроорганизмов. По данным A. Beylich et al., уплотнение почвы негативно влияет не только на физические свойства, но и на почвенные организмы, дыхание почвы, нитрификацию и минерализацию органического вещества [19]. Дополнительно установлено, что уплотнение почвы ограничивает диффузию кислорода в почвенном профиле. Это приводит к подавлению аэробных микробиологических процессов включая нитрификацию и минерализацию органического вещества. В результате снижаются интенсивность почвенного дыхания и трансформация азота, что ухудшает обеспеченность растений доступными формами питательных элементов. Это важно, поскольку именно биота участвует в создании устойчивой поровой системы: дождевые черви формируют ходы и биопоры, улучшают водопроницаемость, а микроорганизмы участвуют в образовании органо-минеральных агрегатов. Например, в обзоре J. Whalen и соавторами показано, что дождевые черви обычно повышают структурную устойчивость почвы, увеличивают пористость и снижают поверхностный сток [20]. Экспериментальные данные Y. Carowicz et al. также подтверждают, что дождевые черви способны частично восстанавливать уплотненные зоны почв: вид *Lumbricus terrestris*, формирующий глубокие вертикальные ходы, проходил через плужную подошву и создавал каналы, которые могли использоваться корнями растений [19]. Следовательно, снижение численности дождевых червей уменьшает естественную способность почвы к разуплотнению.

Ослабление микробиологической активности также имеет принципиальное значение. Почвенные микроорганизмы обеспечивают минерализацию органического вещества, трансформацию азота, образование микробной биомассы и стабилизацию почвенных агрегатов. При нарушении порового пространства ухудшается аэрация, снижается доступность кислорода и изменяется водный режим, что ограничивает активность аэробных микроорганизмов. В результате уменьшается интенсивность биохимических процессов, связанных с питанием растений и восстановлением структуры почвы.

Снижение активности почвенной биоты является не вторичным, а одним из ключевых механизмов накопления эффектов уплотнения. При нормальном состоянии агроэкосистемы корни растений, дождевые черви и микроорганизмы частично компенсируют механическое воздействие техники за счет формирования биопор, агрегатов и органического вещества. Однако при климатической нестабильности эта способность ослабевает, поэтому последствия уплотнения почвы становятся более длительными и более трудно обратимыми.

Изменение климата проявляется в устойчивом потеплении, и прежде всего в зимний период, что сопровождается сокращением продолжительности устойчивого снежного покрова и учащением оттепелей [2]. Одновременно наблюдается смещение сезонных границ: весна наступает раньше, а осенний период становится более продолжительным и мягким [1-3]. Существенной особенностью является рост климатической нестабильности, при котором ранее редкие аномальные погодные условия становятся регулярным явлением [5]. Изменяется и водный режим территорий: сроки весеннего паводка смещаются на более ранние, а в летний период чаще формируется дефицит влаги [2]. Указанные процессы приводят к ухудшению почвенных условий, что выражается в пересыхании верхнего слоя почвы и усилении эрозионных процессов вследствие интенсивных ливневых осадков.

Климатические изменения также косвенно влияют на уплотнение почвы через изменение агротехнологий. Смещение сроков сезонных работ, связанное с ранним наступлением весны, приводит к тому, что техника выходит в поле до достижения оптимальной физической спелости почвы, и это вызывает глубокое ее уплотнение. Кроме того, сокращение устойчивых периодов с благоприятными условиями для обработки вынуждает проводить работы в ограниченные временные интервалы, зачастую

при неблагоприятной влажности, что увеличивает уровень техногенного уплотнения почвы.

Дополнительным фактором является увеличение массы сельскохозяйственной техники. В условиях климатической нестабильности возрастает необходимость оперативного проведения работ, что сопровождается использованием более тяжелых агрегатов. В советское время масса тракторов составляла около 6-8 т [12]. Современные колесные тракторы достигают массы 25-30 т, а зерноуборочные комбайны с полной загрузкой бункера – до 35 т [12]. Каждое прохождение такой техники создает значительное давление на почву.

Машины и трактора расплющивают и прессуют пахотный слой. Уплотняющее действие от колес и гусениц распространяется глубоко (до 1 м) и до 0,8 м в поперечном сечении, сохраняясь до следующего вегетационного сезона [15]. Разрушенная структура почвы полностью не восстанавливается, а на следующий год все повторяется. С течением времени почва деградирует. В сочетании с повышенной влажностью это приводит к росту давления на почву и формированию уплотненных горизонтов включая плужную подошву на глубине 20-40 см.

В совокупности перечисленные факторы формируют замкнутый цикл деградации почв: интенсивные осадки разрушают структуру, техника уплотняет почву, уплотнение ухудшает водопроницаемость, что в свою очередь усиливает негативное воздействие последующих осадков. Данный процесс носит накопительный характер и приводит к постепенному ухудшению агрофизических свойств почвы.

По данным агрономических исследований, уплотнение почвы сопровождается снижением общей пористости с 50-55 до 35-40% и увеличением плотности сложения с 1,1-1,2 до 1,4-1,6 г/см³ [21]. Это приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур: для зерновых культур потери составляют 10-30%, для пропашных – до 40% (рис. 2) [21].

Изменение климата усиливает процессы уплотнения почвы не напрямую, а через трансформацию водного режима, увеличение частоты экстремальных осадков и нарушение оптимальных сроков проведения агротехнических мероприятий. Наиболее опасным является сочетание повышенной влажности почвы в периоды проведения полевых работ с ростом массы сельскохозяйственной техники, что приводит к формированию устойчивых уплотненных горизонтов и снижению продуктивности агроэкосистем.

Для повышения продуктивности агроэкосистем необходимым является переход

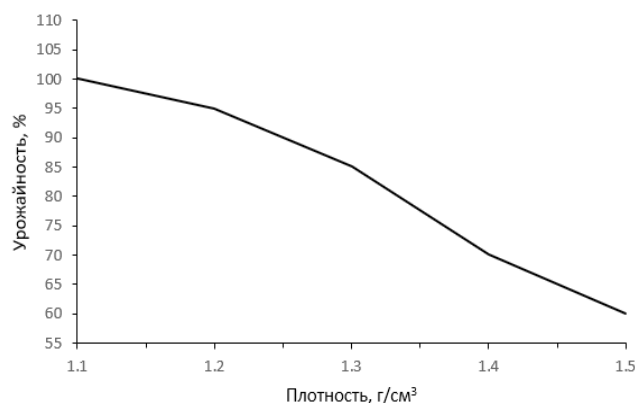


Рис. 2. Влияние уплотнения почвы на урожайность

Fig. 2. Effect of soil compaction on yield

к адаптивно-управляемым системам земледелия, а именно:

1. Необходим пересмотр системы обработки почвы. Использование постоянной глубины вспашки должно быть заменено дифференцированной системой обработки с периодическим глубоким рыхлением (чизелевание, глубокорыхление) для разрушения плужной подошвы. Возможно применение технологий минимальной и нулевой обработки, которое должно сопровождаться контролем плотности почвы, так как в условиях переувлажнения они не всегда предотвращают уплотнение подпахотных горизонтов.

2. Требуется внедрение технологий контролируемого движения техники. Ограничение зон проезда сельскохозяйственных машин позволит локализовать уплотнение почвы и сохранить большую часть поля в структурно стабильном состоянии. Необходимо снижать давление на почву за счет использования шин низкого давления, оптимизации массы сельскохозяйственных агрегатов, а также использования БПЛА на ряде технологических операций (примерно 15%).

3. Важным моментом является переход к управлению сроками полевых работ на основе фактического состояния почвы (физической спелости почвы), а не календарных дат. Использование датчиков влажности, цифровых моделей и систем мониторинга позволяет избегать проведения работ в условиях переувлажнения.

4. Введение покровных культур, увеличение доли органического вещества, применение сидеральных культур усилят биологизацию земледелия и будет способствовать восстановлению почвенной структуры. Для достижения устойчивой поровой системы и повышения естественной способности почвы к разуплотнению необходимо поддержание активности дождевых червей и микроорганизмов.

5. Совершенствование водного режима агроландшафтов: развитие систем поверхностного и внутрипочвенного дренажа, применение агроприемов, повышающих инфильтрацию (мульчирование, сохранение растительных остатков), а также мероприятия по снижению поверхностного стока и эрозии. В условиях учащения ливневых осадков это становится ключевым фактором сохранения продуктивной влаги.

6. Адаптация структуры посевных площадей и сортовой состав культур. Следует сочетать использование более позднеспелых высокопродуктивных сортов с засухо- и стрессоустойчивыми формами, включение культур с различной глубиной корневой системы, что позволит снизить риски в условиях климатической нестабильности.

Список использованных источников

1. Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980 // *Science*. 2011. Vol. 333, № 6042. Pp. 616-620. DOI: 10.1126/science.1204531
2. Росгидромет. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации. М., 2022. 104 с.
3. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC). Изменение климата 2021: Физическая научная основа. Женева: IPCC, 2021. 2391 с.
4. Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development // *Weather and Climate Extremes*. 2015. Vol. 10. Pp. 4-10. DOI: 10.1016/j.wace.2015.08.001
5. Порфирьев Б.Н., Катцов В.М., Рогинко С.А. и др. Экономические эффекты изменения климата в России // *Экономика региона*. 2017. Т. 13, № 2. С. 431-444 EDN: DRXHWS
6. Иванов А.Л., Кирюшин В.И. Адаптация сельского хозяйства к изменениям климата. М.: Росинформагротех, 2019. 384 с.
7. Oztas T., Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability // *Soil & Tillage Research*. 2003. Vol. 72, № 1. P. 1. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00015-9
8. Cheng Y., Wang J., Li X., Zhang H. et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil structure and physical properties // *Agriculture*. 2025. Vol. 15, № 22. P. 2369. DOI: 10.3390/agriculture15222369
9. Qin Y., Zhang H., Liu Z., Wang X. et al. Freeze-thaw effects on soil structure and pore system: A review // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16, № 5. P. 2589. DOI: 10.3390/app16052589
10. Ge Z., Peng X., Horn R. Impact of freeze-thaw cycles on soil aggregation and pore structure // *Geoderma*. 2025. Vol. 448. P. 116865. DOI: 10.1016/j.geoderma.2025.116865
11. Colombi T., Torres L.C., Walter A., Keller T. Root growth in compacted soils: A review // *Plant and Soil*. 2018. Vol. 423. Pp. 1-17. DOI: 10.1007/s11104-017-3514-2
12. Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Голубев И.Г. Развитие мобильной энергетики с учетом агротехнологических ограничений // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 4. С. 26-32. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-26-32 EDN: BGHYWD
13. Li T., Zhang Y., Wang X. et al. From soil health to agricultural productivity: The critical role of soil constraints // *Agricultural Systems*. 2025. Vol. 210. P. 103789. DOI: 10.1016/j.agry.2025.103789
14. Zhang B., Jia Y., Fan H., Guo C., Fu J., Li S. et al. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic

7. Возрастает роль точного земледелия. Карты плотности почвы, урожайности и влажности позволяют дифференцированно применять агротехнические приемы, локализовать проблемные зоны и оптимизировать нагрузку на почву.

Таким образом, в условиях изменения климата устойчивость сельскохозяйственного производства определяется способностью управлять почвенными процессами и адаптировать технологии к возрастающей вариативности природных условий. Игнорирование проблемы уплотнения почвы приведет к накоплению деградационных эффектов и снижению продуктивности, тогда как внедрение комплексных адаптивных решений позволит не только стабилизировать урожайность, но и повысить эффективность использования природных ресурсов.

References

1. Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980 // *Science*. 2011. Vol. 333. No. 6042. P. 616-620. DOI: 10.1126/science.1204531.
2. Roshydromet. Report on the peculiarities of the climate on the territory of the Russian Federation. Moscow: 2022. 104 p.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Geneva: IPCC, 2021. 2391 p.
4. Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development // *Weather and Climate Extremes*. 2015. Vol. 10. P. 4-10. DOI: 10.1016/j.wace.2015.08.001.
5. Porfiriev B.N., Kattsov V.M., Roginko S.A., et al. Economic effects of climate change in Russia. 2017. Porfiriev B.N., Kattsov V.M., Roginko S.A., et al. Economic effects of climate change in Russia // *Economy of the region*. 2017. V. 13. № 2. P. 431-444. EDN: DRXHWS
6. Ivanov A.L., Kiryushin V.I. Adaptation of agriculture to climate change. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2019. 384 p.
7. Oztas T., Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability // *Soil & Tillage Research*. 2003. Vol. 72. No. 1. P. 1. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00015-9.
8. Cheng Y., Wang J., Li X., Zhang H. et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil structure and physical properties // *Agriculture*. 2025. Vol. 15. No. 22. P. 2369. DOI: 10.3390/agriculture15222369.
9. Qin Y., Zhang H., Liu Z., Wang X. et al. Freeze-thaw effects on soil structure and pore system: A review // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16. No. 5. P. 2589. DOI: 10.3390/app16052589.
10. Ge Z., Peng X., Horn R. Impact of freeze-thaw cycles on soil aggregation and pore structure // *Geoderma*. 2025. Vol. 448. – P. 116865. DOI: 10.1016/j.geoderma.2025.116865.
11. Colombi T., Torres L.C., Walter A., Keller T. Root growth in compacted soils: A review // *Plant and Soil*. 2018. Vol. 423. P. 1-17. DOI: 10.1007/s11104-017-3514-2.
12. Levshin A.G., Gasparyan I.N., Golubev I.G. Development of mobile energy taking into account agrotechnological restrictions // *Agricultural engineering*. 2023. V. 25. № 4. P. 26-32. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-26-32. EDN: BGHYWD
13. Li T., Zhang Y., Wang X. et al. From soil health to agricultural productivity: The critical role of soil constraints // *Agricultural Systems*. 2025. Vol. 210. P. 103789. DOI: 10.1016/j.agry.2025.103789.
14. Zhang B., Jia Y., Fan H., Guo C., Fu J., Li S. et al. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic

review // *Land Degradation & Development*. 2024. Vol. 35, № 3. Pp. 945-962. DOI: 10.1002/ldr.4765

15. Fischer G., Tubiello F.N., van Velthuisen H., Wiberg D. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080 // *Global Environmental Change*. 2007. Vol. 17, № 3-4. Pp. 485-497. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002

16. Ahmad N.F.A., Nasir N.M., Yusop Z. Sensitivity analysis of FAO Penman-Monteith reference evapotranspiration to climatic variables // *Jurnal Teknologi*. 2017. Vol. 79, № 6. Pp. 63-69. DOI: 10.11113/jt.v79.8377

17. Horn R., Domžal H., Słowińska-Jurkiewicz A., van Ouwerkerk C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils // *Soil & Tillage Research*. 1995. Vol. 35, № 1-2. Pp. 23-36. DOI: 10.1016/0167-1987(95)00479-C

18. Daryanto S., Wang L., Jacinthe P.A. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review // *Agricultural Water Management*. 2017. Vol. 179. Pp. 18-33. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.04.022

19. Longepierre M., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction // *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. Vol. 160. P. 108349. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108349

20. Whalen J.K., Hamel C. Effects of key soil organisms on nutrient dynamics in temperate agroecosystems // *Journal of Crop Improvement*. 2008. Vol. 22, № 1. Pp. 1-28. DOI: 10.1080/15427520801911397

21. Asseng S., Ewert F., Martre P. et al. Rising temperatures reduce global wheat production // *Nature Climate Change*. 2015. Vol. 5. Pp. 143-147. DOI: 10.1038/nclimate2470

review // *Land Degradation & Development*. 2024. Vol. 35, No. 3. P. 945-962. DOI: 10.1002/ldr.4765.

15. Fischer G., Tubiello F.N., van Velthuisen H., Wiberg D. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080 // *Global Environmental Change*. 2007. Vol. 17, No. 3-4. P. 485-497. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002.

16. Ahmad N.F.A., Nasir N.M., Yusop Z. Sensitivity analysis of FAO Penman-Monteith reference evapotranspiration to climatic variables // *Jurnal Teknologi*. 2017. Vol. 79, No. 6. P. 63-69. DOI: 10.11113/jt.v79.8377.

17. Horn R., Domžal H., Słowińska-Jurkiewicz A., van Ouwerkerk C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils // *Soil & Tillage Research*. 1995. Vol. 35, No. 1-2. P. 23-36. DOI: 10.1016/0167-1987(95)00479-C.

18. Daryanto S., Wang L., Jacinthe P.A. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review // *Agricultural Water Management*. 2017. Vol. 179. P. 18-33. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.04.022.

19. Longepierre M., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction // *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. Vol. 160. P. 108349. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108349.

20. Whalen J.K., Hamel C. Effects of key soil organisms on nutrient dynamics in temperate agroecosystems // *Journal of Crop Improvement*. 2008. Vol. 22, No. 1. P. 1-28. DOI: 10.1080/15427520801911397.

21. Asseng S., Ewert F., Martre P. et al. Rising temperatures reduce global wheat production // *Nature Climate Change*. 2015. Vol. 5. P. 143-147. DOI: 10.1038/nclimate2470.

Информация об авторах

Ирина Николаевна Гаспарян, д-р с.-х. наук, профессор, гл. научный сотрудник лаборатории Географической сети опытов и цифровых агротехнологий, SPIN-код: 3354-1594, AuthorID: 362785, ORCID: 0000-0003-4702-0095; irina150170@yandex.ru

Ольга Николаевна Ивашова, канд. с.-х. наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; SPIN-код: 7080-8591, AuthorID: 705761, ORCID: 0000-0001-9206-9862, o.ivashova@rgau-msha.ru

Шаген Вагенович Гаспарян, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры технологии хранения и переработки плодово-овощной и растениеводческой продукции Технологического института РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; SPIN-код: 9014-5774, AuthorID: 756518, ORCID: 0000-0001-7161-3654, gas_shag@rgau-msha.ru

Наталья Федоровна Денискина, канд. биол. наук, доцент кафедры защиты растений Агробиотехнологического института РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; SPIN-код: 8642-6850, AuthorID: 767574, ORCID: 0000-0003-3111-6869, ndeniskina@rgau-msha.ru

Information about the authors

Irina N. Gasparyan, DScs (Agro), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Geographic Network of Experiments and Digital Agricultural Technologies, SPIN code: 3354-1594, AuthorID: 362785, ORCID: 0000-0003-4702-0095; irina150170@yandex.ru

Olga N. Ivashova, CSs (Agro), Associate Professor, Department of Computer-Aided Design Systems and Engineering Calculations, A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; SPIN code: 7080-8591, AuthorID: 705761, ORCID: 0000-0001-9206-9862, o.ivashova@rgau-msha.ru

Shagen V. Gasparyan, CSs (Agro), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Storage and Processing of Fruit and Vegetable and Plant Products, Technological Institute of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; SPIN code: 9014-5774, AuthorID: 756518, ORCID: 0000-0001-7161-3654, gas_shag@rgau-msha.ru

Natalia F. Deniskina, CSs (Biology), Associate Professor of the Department of Plant Protection, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; SPIN code: 8642-6850, AuthorID: 767574, ORCID: 0000-0003-3111-6869, ndeniskina@rgau-msha.ru

Заявленный вклад авторов

Вклад всех авторов равнозначен и охватывает все этапы работы над обзором: разработку концепции и структуры статьи, проведение библиографического поиска, критический анализ публикаций, обобщение результатов и написание текста.

Конфликт интересов / Criteria of authorship

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

Поступила в редакцию / Received 12.03.2026

Поступила после рецензирования / Received 14.04.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 17.04.2026

Declared contribution of the authors

The contributions of all authors are equal and encompass all stages of the review process: developing the article's concept and structure, conducting the literature search, critically analyzing publications, synthesizing the results, and writing the text.

Оригинальная статья

УДК 633.34:621.3

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-47-54>

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ РОСТА И РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

М.Е. Бельшкينا

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

vimsoya@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-2876-1031

Аннотация. Рассмотрены вопросы воздействия электромагнитного облучения семян на дальнейший рост и развитие растений сельскохозяйственных культур. При помощи электромагнитного облучения исследователи пытаются достичь ускорения ростовых процессов, а также сокращения периода вегетации и повышения урожая. Цель исследований – оценить влияние предпосевной подготовки посевного материала сельскохозяйственных культур: яровой пшеницы, ярового ячменя, озимой ржи и озимой пшеницы – посредством воздействия электромагнитного облучения на параметры роста, развития и фотосинтетическую деятельность растений, структуру урожая и биохимический состав зерна. Установлено, что воздействие электромагнитного облучения оказывает влияние на ускорение перехода к генеративному развитию у сортов яровых и озимых зерновых культур. Продолжительность вегетационного периода в вариантах с облучением сокращалась в среднем у яровых зерновых культур на 3-5 дней, у озимых – на 10-16 дней. При анализе основных показателей фотосинтетической деятельности была выявлена тенденция более высоких значений показателей в некоторых вариантах с облучением семян в электромагнитном поле. Облучение оказало влияние также на параметры структуры урожая по некоторым вариантам, а также на биохимический состав семян. В результате анализа биохимического состава зерна изучаемых культур были выявлены достоверные различия по содержанию белка в некоторых вариантах с облучением в электромагнитном поле; превышение в варианте с облучением составляло 0,5-4,5%.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0016.

Ключевые слова: электромагнитное воздействие, фотосинтетическая деятельность, яровая пшеница, яровой ячмень, озимая рожь, озимая пшеница, структура урожая, биохимический состав

Формат цитирования: Бельшкينا М.Е. Оценка влияния экзогенных факторов на параметры роста и развития сельскохозяйственных культур. Природообустройство. 2026;Т.19(3):47-54. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-47-54>

Scientific article

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF EXOGENOUS PHYSICAL FACTORS ON THE PARAMETERS OF GROWTH AND DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL CROPS

M.E. Belyshkina

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

vimsoya@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-2876-1031

Abstract. The article discusses the effects of electromagnetic irradiation of seeds on the further growth and development of plants grain crops. With the help of electromagnetic radiation, researchers are trying to accelerate growth processes, as well as shorten the growing season and increase yields. The purpose of this study was to evaluate the impact of pre-sowing preparation of grain crops: spring wheat, spring barley, winter rye and winter wheat, through exposure to electromagnetic radiation, the parameters of plant growth, development and photosynthetic activity, crop structure and biochemical composition of grain. It was found that the effect of electromagnetic radiation has an effect on accelerating the transition to generative development in spring and winter grain varieties, the duration of the growing season in the irradiated variants was reduced in spring crops by an average of 3-5 days, in winter crops – by an average of 10-16 days.

When analyzing the main indicators of photosynthetic activity, a tendency of higher values of indicators was revealed in some variants with irradiation of seeds in an electromagnetic field. Irradiation also affected the parameters of the crop structure in some variants, as well as the biochemical composition of seeds. As a result of the analysis of the biochemical composition of the grain of the studied crops, significant differences in protein content were revealed in some variants with irradiation in an electromagnetic field, the excess in the irradiated variant was 0.5-4.5%.

The work was carried out with the support of the Russian Ministry of Education and Science as part of the state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center VIM FGUN-2025-0016.

Keywords: spring wheat, spring barley, winter rye, winter wheat, electromagnetic effect, photosynthetic activity, crop structure, biochemical composition

For citation: Belyshkina M.E. Assessment of the influence of exogenous physical factors on the parameters of growth and development of agricultural crops. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(3):47-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-47-54>

Введение. Одним из способов повышения экономической эффективности выращивания сельскохозяйственных культур является предпосевное облучение семян. Целью этого агроприема является ускорение роста и развития растений, сокращение периода вегетации и повышение урожая. Однако ввиду нестабильности стимулирующего эффекта в полевых и лабораторных условиях технология предпосевого облучения семян так и не стала широко распространенной. В связи с этим требуются исследования для анализа механизмов стимуляции и обоснования применения технологии предпосевого облучения семян [1, 2].

Многими исследователями доказаны высокая эффективность и экологичность предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур [3, 4]. Магнитобиологический эффект предпосевной обработки семян зависит от вида и сорта культуры, активации в клетке биологического комплекса, инициирующего развитие проростка, качества и влажности семян, наличия на поверхности микроорганизмов, в том числе патогенных, источников и энергетических параметров облучения [5, 6].

Цель исследований: оценить влияние предпосевной подготовки посевного материала сельскохозяйственных культур: яровой пшеницы, ярового ячменя, озимой ржи и озимой пшеницы – посредством воздействия электромагнитного облучения на посевные качества семян, параметры роста, развития и фотосинтетическую деятельность растений, структуру урожая и биохимический состав зерна.

Материалы и методы исследований. Исследования по агроэкологическому испытанию сортов яровых и озимых зерновых сельскохозяйственных культур проводились в 2023-2024 гг. на экспериментальной базе Института

семеноводства и агротехнологий – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», расположенного в с. Подвязье Рязанского района.

Почва опытного участка – темно-серая лесная, тяжелосуглинистая. Реакция почвенного раствора pH_{сол}. (ГОСТ 26483) – 5,2; содержание гумуса по методу Тюрина (ГОСТ 26213) – 5,8%; содержание подвижного фосфора по методу Кирсанова (ГОСТ Р 54650-2011) – 191,4 мг/кг, содержание обменного калия по Масловой (ГОСТ 26210) – 108,5 мг/кг, азота нитратного – 8,4 мг/кг (ГОСТ 26951-86), азота аммонийного – 1,57 мг/кг почвы (ГОСТ 26489-85).

Исследования проводились с сортами яровых и озимых зерновых сельскохозяйственных культур [7, 8]. Яровая пшеница была представлена сортами Эстер, Радмира и Рима, яровой ячмень – сортами Надежный и Знатный, озимая рожь – сортами Московская 12 и Московская 18, озимая пшеница – сортами Немчиновская 85, Поволжская Нива и Московская 39. Все изучаемые сорта относятся к группе среднеспелых с продолжительностью вегетационного периода от 71-107 дней у яровых и 263-337 дней у озимых зерновых культур.

Облучение проводилось посредством оборудования для электромагнитного воздействия, которое является собственной разработкой ФНАЦ ВИМ. Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ 12036-85 «Семена сельскохозяйственных культур. Правила приемки и методы отбора проб». Для облучения отобранные пробы семян засыпались в отсеки опытного образца установки (рис. 1).

Установлено, что оптимальная толщина слоя семян, при которой остается способность клеточных структур сохранять стабильность после электромагнитного воздействия, составляет



Рис. 1. Исследуемый семенной материал в бункере установки

Fig. 1. The studied seed material in the bunker of the installation

70 мм. Тогда, учитывая встречное воздействие электромагнитного поля на слой семян между двух облучателей, толщину такого слоя приняли равной 150 мм.

Режим облучения семян имел следующие параметры: частота колебаний электромагнитного поля (F) – 16 Гц; индукция магнитного поля (B) – 10 мТл. Период облучения (T) был разным: у яровых зерновых культур он составлял 25 мин, у озимых зерновых культур – 10 и 25 мин. Контрольный вариант у всех видов изучаемых культур – без облучения.

Закладка полевых опытов, выполнение биометрических исследований, учетов и обработка полученных данных выполнялись в соответствии с требованиями методики полевого опыта [9-11].

Посев озимых культур проводился в сентябре 2023 г. при температуре почвы на глубине заделки семян на уровне +10...+12°C сеялкой навесной СН-16. Способ посева – обычный рядовой с шириной междурядий 15 см, повторность – четырехкратная, норма высева – 5 млн всхожих семян на 1 га, размещение делянок – систематическое, площадь учетной делянки – 18 м². В опыте были следующие варианты: озимая рожь – сорт Московская 12, сорт Московская 18; озимая пшеница – сорт Немчиновская 85, сорт Поволжская Нива и сорт Московская 39.

Посев яровых культур проводился в мае 2024 г. при прогревании почвы на глубине заделки семян на уровне 12-15°C сеялкой навесной СН-16. Способ посева – обычный рядовой с шириной междурядий 15 см; повторность – четырехкратная; норма высева яровой пшеницы – 6 млн всхожих семян на 1 га, ярового ячменя – 5 млн всхожих семян на 1 га; размещение

делянок – систематическое; площадь учетной делянки – 18 м². В опыте были следующие варианты: яровая пшеница – сорт Эстер, сорт Радмира и сорт Рима; яровой ячмень – сорт Надежный и сорт Знатный.

Определение лабораторной всхожести, выполнение биометрических наблюдений, учет структуры урожая и биологической урожайности, а также биохимический анализ семян осуществлялись в лаборатории ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Массу 1000 семян определяли по ГОСТ 12042-80 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения массы 1000 семян». Площадь листьев определялась на фотопланиметре Li-3100. Элементы структуры урожая определялись по пробным снопам из 25 растений с каждой делянки опыта. Содержание сухого вещества определялось весовым методом при температуре 105°C (ГОСТ 31640-2012). Учет структуры урожая производился в лабораторных условиях с определением биологической урожайности. Биохимический анализ выполнялся на анализаторе кормов FOSS NIRS DS2500. Статистический анализ результатов выполняли с применением лицензионных математических программных пакетов для ПЭВМ: «Microsoft Excel», «STATISTICA-6.0», MathCAD14.0.

Результаты и их обсуждение. В результате анализа агроклиматических условий за период с 1981 по 2024 гг. была установлена тенденция локального потепления климата на фоне его аридизации на территории Центрального района Нечерноземной зоны. В частности, в Рязанской области значения сумм активных температур возросли до 2200-2400°C. При этом сократилось количество выпадающих осадков за вегетационный период в среднем на 20-40 мм, не превышая 190-230 мм; гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) в среднем снизился на 0,3-0,4 пункта, и его значение находится в диапазоне 0,8-1,4 [12].

Посев озимых зерновых культур проводился в третьей декаде сентября 2023 г. В этот период сложились благоприятные температурные условия для прорастания семян. Среднемесячная температура в сентябре составила +17,8°C, превышая среднемноголетнюю на 6,6°C. Однако в этом месяце практически не было осадков, что впоследствии сказалось на «дружности» всходов. В последующем, в октябре, осадков выпало значительно больше нормы при достаточно высоких температурах для этого месяца, что в целом способствовало хорошему развитию всходов.

Метеорологические условия 2024 г. в период посева яровых зерновых культур были

достаточно неблагоприятными. В первые две декады мая среднесуточная температура воздуха не превышала $+10^{\circ}\text{C}$, что ниже среднееголетних значений на 2°C . При этом в первой декаде мая было зафиксировано большое количество выпавших осадков, которое превысило норму на 32,5 мм. При пониженных температурах наблюдались осадки в виде мокрого снега. Посев яровой пшеницы и ярового ячменя пришлось на первую декаду мая и сопровождался неблагоприятными климатическими условиями, что в последующем привело к задержке появления всходов. Метеорологические условия летнего периода 2024 г. были достаточно благоприятными для роста и развития яровых и озимых зерновых культур. Среднемесячные температуры превышали среднееголетние на $2,0...2,8^{\circ}\text{C}$.

В процессе фотосинтетической деятельности посевов образуется сухое вещество растений и формируется потенциальная урожайность [13]. В то же время следует отметить, что данная взаимосвязь не является прямой. Поэтому большую роль при проведении полевых исследований играет оценка продукционного процесса, а именно показатели, характеризующих фотосинтетическую деятельность растений в посевах [14, 15].

У всех исследуемых сортов яровых и озимых зерновых культур продолжительность вегетационного периода в вариантах с облучением сокращалась: в среднем у яровых зерновых культур – на 3-5 дней, у озимых – на 10-16 дней. Сокращение вегетационного периода было обусловлено сокращением периода кущения-выхода в трубку в вариантах с электромагнитным воздействием.

Продолжительность периода кущения-выхода в трубку в вариантах без облучения у яровых зерновых культур составила в среднем 24 дня, у озимой ржи – 192 дня, у озимой

пшеницы – 198 дней. В то же время в вариантах с облучением продолжительность этого периода составила в среднем у яровых зерновых культур 21 день, у озимой ржи – 182 дня при обоих вариантах облучения, а у озимой пшеницы – 184 дня при облучении в течение 10 мин и 182 дня при облучении в течение 25 мин.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что воздействие электромагнитного облучения оказывает влияние на ускорение перехода к генеративному развитию у сортов яровых и озимых зерновых культур.

Прогностическим показателем потенциальной продуктивности растений в период вегетации является площадь листовой поверхности отдельного растения и агроценоза. В целом динамика формирования листовой поверхности агроценоза соответствовала формированию ассимиляционного аппарата одного растения, и максимальных значений она достигала в фазу колошения, составив у яровой пшеницы 20,5-22,1 тыс. $\text{м}^2/\text{га}$, у ярового ячменя – 17,9-18,4 тыс. $\text{м}^2/\text{га}$ (рис. 2).

Максимальные значения площади листовой поверхности в агроценозе среди исследуемых вариантов сформировали сорта яровой пшеницы Рима (21,9-22,1 тыс. $\text{м}^2/\text{га}$) и озимой пшеницы Немчиновская 85 (23,8-24,6 тыс. $\text{м}^2/\text{га}$). При этом у вариантов достоверных различий по динамике нарастания листовой поверхности в зависимости от электромагнитного воздействия не выявлено. В вариантах с яровым ячменем и озимой рожью не было выявлено достоверных различий; площадь листовой поверхности в агроценозе составила 17,9-18,4 и 20,1-20,6 тыс. $\text{м}^2/\text{га}$ соответственно.

Накопление общей сухой биомассы сортами яровых и озимых зерновых культур происходило в соответствии с формированием фотосинтетического аппарата (рис. 3). Максимальных значений

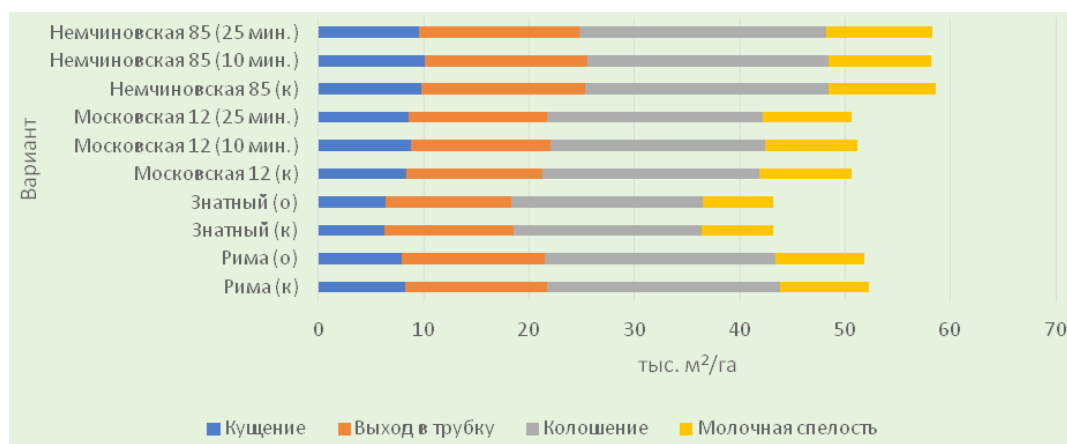


Рис. 2. Динамика нарастания площади листовой поверхности растений в агроценозе

Fig. 2. Dynamics of the increase in the leaf surface area of plants in the agrocenosis

сухая биомасса достигала к фазе молочной спелости, составив в среднем по вариантам 3-5 т/га. Максимальную сухую биомассу сформировали следующие варианты: яровая пшеница – сорт Рима (5,34-5,38 т/га); яровой ячмень – сорт Знатный (4,08-4,12 т/га); озимая пшеница – сорт Немчиновская 85 (5,87-5,96 т/га). Относительно озимой ржи между вариантами существенных различий не выявлено; максимальная сухая биомасса составила 4,62-4,72 т/га. Наименьшая сухая биомасса была сформирована в варианте с яровым ячменем сорта Надежный, составив 3,88-3,96 т/га.

В исследованиях были проанализированы основные показатели фотосинтетической деятельности посева. Максимальные значения основных показателей фотосинтетической деятельности были зафиксированы среди яровых зерновых культур у яровой пшеницы сорта Рима (780-820 тыс. м² дней/га и 6,8-6,5 г/м² в сутки), среди озимых зерновых культур – у сорта озимой пшеницы Немчиновская 85 (1840-1860 тыс. м² дней/га и 3,2 г/м² в сутки).

Наименьший фотосинтетический потенциал был зафиксирован у сортов ярового ячменя, составив 600-640 тыс. м² дней/га. При этом чистая продуктивность фотосинтеза была достаточно высокой и составила 6,1-6,7 г/м² в сутки. В результате анализа основных показателей фотосинтетической деятельности была выявлена тенденция более высоких значений показателей в некоторых вариантах с облучением семян в электромагнитном поле.

Среди яровых зерновых культур наилучшие значения показателей структуры урожая были зафиксированы у яровой пшеницы сорта

Рима в контрольном варианте без облучения: масса зерен с растения составила 0,82 г, масса 1000 зерен – 32,4 г, биологическая урожайность – 3,38 т/га; у ярового ячменя сорта Знатный в варианте с облучением масса зерен с растения составила 0,83 г, масса 1000 зерен – 46,5 г, биологическая урожайность – 2,80 т/га (табл. 1).

Среди озимых зерновых культур наилучшие значения показателей структуры урожая были зафиксированы у озимой ржи сорта Московская 12 в варианте с облучением и интервалом 25 мин, когда масса зерен с растения составила 1,38 г, масса 1000 зерен – 42,4 г, биологическая урожайность – 4,90 т/га. У озимой пшеницы сорта Немчиновская 85 в варианте с облучением и интервалом 10 мин масса зерен с растения составила 1,18 г, масса 1000 зерен – 39,2 г, биологическая урожайность – 4,15 т/га; масса зерен с растения сорта Поволжская Нива в варианте с облучением и интервалом 25 мин составила 1,26 г, масса 1000 зерен – 42,4 г, биологическая урожайность – 4,58 т/га (табл. 2).

Наименьшие значения показателей структуры урожая были зафиксированы у ярового ячменя сорта Надежный в варианте с облучением: масса зерен с растения составила 0,54 г, масса 1000 зерен – 34,6 г, биологическая урожайность – 1,77 т/га; у озимой пшеницы сорта Московская 39 в варианте без облучения масса зерен с растения составила 0,98 г, масса 1000 зерен – 37,5 г, биологическая урожайность – 3,22 т/га.

В результате анализа биохимического состава зерна изучаемых культур были выявлены достоверные различия по содержанию белка в некоторых вариантах с облучением в электромагнитном поле; превышение в варианте с облучением составляло 0,5-4,5%. Наибольшее

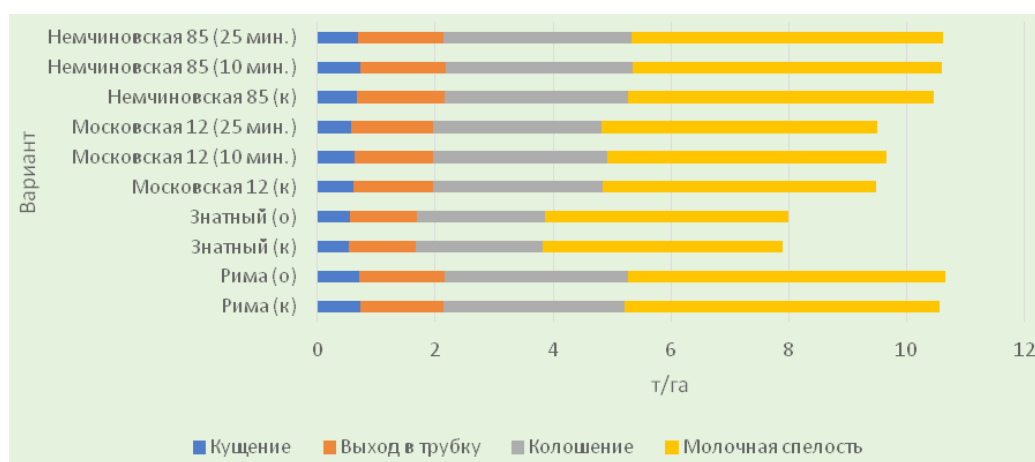


Рис. 3. Динамика накопления сухой биомассы сортами яровых и озимых зерновых культур по фазам роста и развития

Fig. 3. Dynamics of accumulation of dry biomass by varieties of spring and winter grain crops by growth and development phases

Таблица 1. Элементы структуры урожая и урожайность сортов яровых зерновых культур

Table 1. Elements of the crop structure and yield of spring grain varieties

Культура / Crop	Вариант / Variant	Высота растений, см / Plant height, cm	Число колосьев, шт./раст. / Number of ears, pcs / plant	Число зерен в колосе, шт./раст. / Number of grains per ear, pcs / plant	Масса зерен, г/раст. / Grain weight, g / plant	Масса 1000 зерен, г / Weight of 1000 grains, g	Биологическая урожайность, т/га / Biological yield, t / ha
Яровая пшеница / Spring wheat	Эстер (к) / Ester (c)	92	1,1	22,8	0,44	22,3	1,83
	Эстер (о) / Ester (o)	76	1,2	24,4	0,49	24,8	2,07
	Радмира (к) / Radmira (c)	84	1,0	29,3	0,82	28,2	2,95
	Радмира (о) / Radmira (o)	90	1,1	24,9	0,71	29,6	2,59
	Рима (к) / Rima (c)	83	1,0	26,7	0,82	32,4	3,38
	Рима (о) / Rima (o)	94	1,2	25,8	0,64	25,8	2,54
Яровой ячмень / Spring barley	Надежный(к) / Nadezhny(c)	39	1,0	15,8	0,65	40,4	2,37
	Надежный(о) / Nadezhny (o)	32	1,1	15,9	0,54	34,6	1,77
	Знатный (к) / Znatny (c)	37	1,2	18,0	0,87	48,6	2,66
	Знатный (о) / Znatny (o)	44	1,2	18,1	0,83	46,5	2,80
НСР ₀₅ / LSD ₀₅		3,6	0,04	0,8	0,04	1,8	0,14

Таблица 2. Элементы структуры урожая и урожайность сортов озимых зерновых культур

Table 2. Elements of the crop structure and yield of winter grain varieties

Культура / Crop	Вариант / Variant	Высота растений, см / Plant height, cm	Число колосьев, шт./раст. / Number of ears, pcs / plant	Число зерен в колосе, шт./раст. / Number of grains per ear, pcs / plant	Масса зерен, г/раст. / Grain weight, g / plant	Масса 1000 зерен, г / Weight of 1000 grains, g	Биологическая урожайность, т/га / Biological yield, t / ha
Озимая рожь / Winter rye	Московская 12 (контроль) / Moskovskaya 12 (control)	113	1,5	29,8	1,38	43,5	4,55
	Московская 12 (10 мин.) / Moskovskaya 12 (10 min.)	121	1,3	32,8	1,12	36,5	4,00
	Московская 12 (25 мин.) / Moskovskaya 12 (25 min.)	117	1,5	30,4	1,38	42,4	4,90
	Московская 18 (контроль) / Moskovskaya 18 (control)	105	1,6	32,4	1,38	39,8	4,34
	Московская 18 (10 мин.) / Moskovskaya 18 (10 min.)	109	1,5	31,8	1,12	36,2	3,56
	Московская 18 (25 мин.) / Moskovskaya 18 (25 min.)	115	1,3	29,6	0,94	33,4	3,24
Озимая пшеница / Winter wheat	Немчиновская 85 (контроль) / Nemchinovskaya 85 (control)	96	1,1	28,4	1,08	37,6	3,81
	Немчиновская 85 (10 мин.) / Nemchinovskaya 85 (10 min.)	84	1,0	31,1	1,18	39,2	4,15
	Немчиновская 85 (25 мин.) / Nemchinovskaya 85 (25 min.)	93	1,1	30,2	1,14	37,8	3,54
	Поволжская Нива (контроль) / Povolzhskaya Niva (control)	98	1,3	27,2	1,05	38,8	3,83
	Поволжская Нива (10 мин.) / Povolzhskaya Niva (10 min.)	100	1,3	27,8	1,03	37,4	3,63
	Поволжская Нива (25 мин.) / Povolzhskaya Niva (25 min.)	107	1,3	30,2	1,26	42,4	4,58
	Московская 39 (контроль) / Moskovskaya 39 (control)	98	1,1	26,4	0,98	37,5	3,22
	Московская 39 (10 мин.) / Moskovskaya 39 (10 min.)	95	1,2	28,3	1,12	40,2	3,54
	Московская 39 (25 мин.) / Moskovskaya 39 (25 min.)	90	1,3	30,3	1,10	38,6	3,63
НСР ₀₅ / LSD ₀₅		5,1	0,05	1,3	0,04	1,9	0,21

содержание белка в зерне было выявлено у яровой пшеницы сортов Эстер и Рима в вариантах с облучением, составив 13,6 и 13,41% соответственно, у ярового ячменя сорта Надежный в варианте без облучения и сорта Знатный в варианте с облучением – 14,34 и 14,84% соответственно. Среди озимых зерновых культур наибольшее содержание белка было зафиксировано у озимой ржи сорта Московская 18 в варианте с облучением и интервалом 10 мин, а также у озимой пшеницы сорта Московская 39 в варианте без облучения – 13,15%.

По содержанию жира среди всех анализируемых вариантов можно выделить яровой ячмень со значениями показателя в интервале 3,11-3,23%. Содержание жира у сортов яровой пшеницы находилось в интервале 2,55-2,89%, в то время как у озимых культур значение показателя составило только 1,52-1,74%.

Содержание крахмала было наименьшим у сортов ярового ячменя, составив 43,28-49,10%. У остальных изучаемых яровых и озимых зерновых культур значение показателя находилось в интервале 61,13-67,38%; достоверных различий в зависимости от варианта облучения выявлено не было.

Выводы

Выявлена тенденция более высоких значений показателей в некоторых вариантах с облучением семян в электромагнитном поле.

Список использованных источников

- Афони́на С.О., Атамановская Г.А., Комарова Л.Н. Исследование влияния гамма-облучения на морфологические и генетические показатели ячменя обыкновенного // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2024. № 3. С. 166-174
- Касаткина Н.И., Нелюбина Ж.С., Кондратьева Н.П., Руденок В.А. Влияние предпосевной обработки семян многолетних бобовых культур на их прорастание // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020. № 5. С. 30-33
- Савченко В.В., Синявский А.Ю. Влияние магнитного поля на концентрацию кислорода в клетках семян сельскохозяйственных культур // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 2 (31). С. 238-243. EDN: ZZLZMD
- Трифонов М.Ф., Бляндур О.В., Соловьев А.М., Фирсов И.П. и др. Физические факторы в растениеводстве. М.: Колос, 1998. 352 с.
- Аксенов А.Г., Бельшклина М.Е., Чаплыгин М.Е., Серебрякова О.В., Шаабан М. Анализ влияния экзогенных факторов на посевные качества и ростовые процессы семян сельскохозяйственных культур // Аграрная Россия. 2024. № 1. С. 25-29. EDN: CXIJHN
- Дорохов А.С., Чаплыгин М.Е., Аксенов А.Г., Шибряева Л.С. и др. Обработка семян зерновых культур в низкочастотном электромагнитном поле // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 4. С. 4411. EDN: SLKEWQ

Максимальные значения основных показателей фотосинтетической деятельности: фотосинтетического потенциала и чистой продуктивности фотосинтеза – были зафиксированы среди яровых зерновых культур: у яровой пшеницы сорта Рима (780-820 тыс. м² дней/га и 6,8-6,5 г/м² в сутки), среди озимых зерновых культур – у сорта озимой пшеницы Немчиновская 85 (1840-1860 тыс. м² дней/га и 3,2 г/м² в сутки).

Наилучшие значения показателей структуры урожая были зафиксированы у яровой пшеницы сорта Рима в контрольном варианте без облучения: биологическая урожайность составила 3,38 т/га; у ярового ячменя сорта Знатный в варианте с облучением этот показатель составил 2,80 т/га. Среди озимых зерновых культур наилучшие значения показателей структуры урожая были зафиксированы у озимой ржи сорта Московская 12 в варианте с облучением и интервалом 25 мин, когда биологическая урожайность составила 4,90 т/га; у озимой пшеницы сорта Немчиновская 85 в варианте с облучением и интервалом 10 мин – 4,15 т/га, сорта Поволжская Нива в варианте с облучением и интервалом 25 мин – 4,58 т/га.

В результате анализа биохимического состава зерна изучаемых культур были выявлены достоверные различия по содержанию белка в некоторых вариантах с облучением в электромагнитном поле; превышение в варианте с облучением составляло 0,5-4,5%.

References

- Afonina S.O., Atamanovskaya G.A., Komarova L.N. Investigation of the effect of gamma radiation on morphological and genetic parameters of common barley // Nuclear power engineering. 2024. No. 3. P. 166-174.
- Kasatkina N.I., Nelyubina Zh.S., Kondratieva N.P., Rudenok V.A. The influence of pre-sowing treatment of seeds of perennial legumes on their germination // Bulletin of Russian Agricultural Science. 2020. No. 5. P. 30-33.
- Savchenko V.V., Sinyavsky A.Yu. The influence of a magnetic field on the oxygen concentration in the cells of agricultural seeds // Innovations in agriculture. 2019. No. 2 (31). P. 238-243. EDN: ZZLZMD
- Trifonova M.F., Blyandur O.V., Solovyov A.M., Firsov I.P., Sirotin A.A., Sirotina L.B. Physical factors in crop production. Moscow: Kolos, 1998. 352 p.
- Aksenov A.G., Belyshkina M.E., Chaplygin M.E., Serebryakova O.V., Shaaban M. Analysis of the influence of exogenous factors on the sowing qualities and growth processes of agricultural seeds // Agrarian Russia. 2024. No. 1. P. 25-29. EDN: CXIJHN
- Dorokhov A.S., Chaplygin M.E., Aksenov A.G., Shibryayeva L.S., Blinov N.D., Chulkov A.S., Podzorov A.V. Processing of grain seeds in a low-frequency electromagnetic field // Agricultural machinery and technologies. 2023. Vol. 17. No. 4. P. 4-11. EDN: SLKEWQ
- Alt V.V., Isakova S.P. Planning of work in the cultivation of grain crops: software components // Agricultural machinery and technology. 2023. Vol. 17. No. 4. P. 12-18. EDN: GQRORK

7. Альт В.В., Исакова С.П. Планирование работ при возделывании зерновых культур: программные компоненты // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 4. С. 12-18. EDN: GQRORK

8. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. Сорта растений // Электронный ресурс: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektcionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/> (дата обращения: 11.10.2023)

9. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1989. 335 с.

10. Бельшклина М.Е. Биология и морфология полевых культур: Учебное пособие. Иркутск: Изд-во ООО «Мегапринт», 2018. 139 с. EDN: RURIIN

11. Шитикова А.В., Бельшклина М.Е., Мельников В.Н. Технология производства продукции растениеводства: Учебное пособие. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2018. 150 с. EDN: DGFVZV

12. Бельшклина М.Е. Анализ изменения агроклиматических условий в Центральном районе Нечерноземной зоны и оценка возможности интродукции сои в новые регионы возделывания // Природообустройство. 2023. № 4. С. 21-27. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-21-27

13. Бугаев П.Д., Абдельхамид С.Э.А. Влияние протравителя Поларис и микроудобрения Силиплант на фотосинтетическую активность и урожайность ярового ячменя // Плодородие. 2019. № 4 (109). С. 11-15. EDN: CPTNBW

14. Чаплыгин М.Е., Жалнин Э.В., Шибряева Л.С., Подзоров А.В. Закономерности влияния густоты посева озимой пшеницы на ее урожайность // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 490-507. EDN: SBDAKV

15. Сафаралихоннов А.Б. Динамика дневного и сезонного хода интенсивности транспирации листьев растений пшеницы при предпосевном УФ-облучении семян // Субтропическое и декоративное садоводство. 2017. № 60. С. 123-130. EDN: YKRQTD

Сведения об авторе

Марина Евгеньевна Бельшклина, д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник, ORCID: 0000-0003-2876-1031, WoS Resercher ID: AAI-7539-2021, Scopus ID: 57221306773, РИНЦ AuthorID: 675431; vimsoya@yandex.ru

8. The State Register of breeding achievements approved for use. Volume 1. Plant varieties // Electronic resource: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektcionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/> (Date of request: 10/11/2023)

9. Dospekhov B.A. Methodology of field experience. Moscow: Kolos, 1989. 335 p.

10. Belyshkina M.E. Biology and morphology of field crops. The training manual. Irkutsk: Publishing house of Megaprint LLC. 2018. 139 p.

11. Shitikova A.V., Belyshkina M.E., Melnikov V.N. Technology of crop production: textbook. Moscow: Publishing house of the Russian State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2018. 150 p. EDN: DGFVZV

12. Belyshkina M.E. Analysis of changes in agro-climatic conditions in the Central region of the Non-Chernozem zone and assessment of the possibility of introducing soybeans into new cultivation regions // Prirodoobustroystvo. 2023. No. 4. P. 21-27.

13. Bugaev P.D., Abdelhamid S.E.A. The effect of Polaris mordant and Siliplant micronutrient on photosynthetic activity and yield of spring barley // Fertility. 2019. No. 4 (109). P. 11-15. EDN: CPTNBW

14. Chaplygin M.E., Zhalnin E.V., Shibryaeva L.S., Podzоров A.V. Patterns of influence of winter wheat sowing density on its yield // Engineering technologies and systems. 2023. Vol. 33. No. 4. P. 490-507. EDN: SBDAKV

15. Safaralikhonov A.B. Dynamics of the daily and seasonal course of transpiration intensity of wheat plant leaves under pre-sowing UV irradiation of seeds // Subtropical and decorative gardening. 2017. No. 60. P. 123-130. EDN: YKRQTD

Information about the author

Marina E. Belyshkina, DSs (Agro), chief researcher, ORCID: 0000-0003-2876-1031, WoS Resercher ID: AAI-7539-2021, Scopus ID: 57221306773, RSCI AuthorID: 675431; vimsoya@yandex.ru

Поступила в редакцию / 15.11.2025

Поступила после рецензирования / Received 20.03.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 25.05.2026

Оригинальная статья

УДК 631.4: 633.39:581.524:62

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-55-61>

АВТОНОМНЫЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ УДАЛЕНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО

Н.С. Севрюгина^{1✉}, А.Ю. Фомин², А.С. Апатенко³

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

¹ sevruginans@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3494-1437>

² sachafomin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>

³ a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>

Аннотация. Выявлена проблема неконтролируемого нарушения агроэкосистемы через засорение территорий инвазивными растениями, в частности борщевиком Сосновского. Предложена концепция контроля территорий от засорения инвазивными растениями на длительном временном периоде с привлечением автономных средств малой механизации. Цель исследований – разработка концепции управления агрофизическими процессами неконтролируемого нарушения экосистемы территорий от засорения инвазивными растениями (на примере борщевика Сосновского) на длительном временном периоде, путем создания многофункционального комплекса автономного действия. Разработана конструкция колаборативного робота с встроенной автономной системой удаления инвазивных растений (робота АКИР). Технологическая комплектность рабочего оборудования по удалению борщевика Сосновского и автономность управления исключает опасные контактные воздействия человека с листвой растения. Цифровой модуль с банком данных в режиме реального времени позволяет контролировать разрастание борщевика Сосновского и составлять план по удалению на всех этапах его роста. Дано обоснование пятилетнего периода сбора данных и картирования местности для управления положительной динамикой очистки зоны от инвазивного воздействия. Дополнительно рассмотрены биохимические характеристики борщевика Сосновского для получения из зеленой массы различных продуктов – в частности, биотоплива.

Ключевые слова: борщевик Сосновского, инвазивность, риски, удаление, технология, колаборативный робот, автономность, регулирование

Для цитирования: Севрюгина Н.С., Фомин А.Ю., Апатенко А.С. Автономный многофункциональный комплекс для удаления и утилизации борщевика Сосновского. Природообустройство. 2026;Т.19(3):55-61. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-55-61>

Scientific article

AUTONOMOUS MULTIFUNCTIONAL COMPLEX FOR THE REMOVAL AND DISPOSAL OF SOSNOVSKY HOGWEED

N.S. Sevrugina^{1✉}, A.Y. Fomin², A.S. Apatenko³

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

¹ sevruginans@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3494-1437>

² sachafomin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>

³ a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>

Abstract. The problem of uncontrolled disruption of the agroecosystem through the contamination of territories with invasive plants has been identified. The assessment of agrophysical processes of agroecosystem management is given in terms of the feasibility of innovative technologies and their provision with technical support facilities. To implement the objectives of the strategic programs for the development of the agro-industrial complex, the concept of controlling territories from infestation by invasive plants for a long time period with the involvement of a technical multifunctional complex of autonomous action is proposed. A collaborative robot design with an integrated autonomous system for removing invasive plants (AKIR kobot) has been developed. The technological completeness of the working equipment for removing Sosnovsky hogweed and the autonomy of control eliminate dangerous human contact with the plant's foliage. A digital module with a real-time data bank allows for monitoring the growth of Sosnovsky

hogweed and creating a removal plan at all stages of its growth. A five-year data collection and mapping period has been justified to manage the positive dynamics of clearing the area from invasive effects. Additionally, the biochemical characteristics of hogweed are considered for obtaining various products from the green mass, in particular, biofuels.

Keywords: Sosnovsky's hogweed, invasiveness, risks, removal, technology, collaborative robot, autonomy, regulation

For citation: Sevryugina N.S., Fomin A.Yu., Apatenko A.S. An autonomous multifunctional complex for the removal and utilization of Sosnovsky hogweed. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):55-61. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-55-61>

Введение. Программы развития АПК на государственном уровне предполагают решение ряда ключевых задач. Выявлена проблема сохранения природной идентичности через создание механизма оценки согласованности ведения работ по развитию технологий и техники эффективного ведения сельского хозяйства в контексте природообустройства [1].

Исследования показывают значимость решения задач достижения высокого качества жизни человека при разработке адаптивных инновационных технологий ведения сельскохозяйственной деятельности к изменениям климата, сохранению и рациональному использованию природных ресурсов [2]. Так, выращивание в промышленном масштабе борщевика Сосновского, привели не только к переводу данного растения в категорию инвазивного, но и к акцентированию в настоящее время борьбы с его разрастанием на государственном уровне [3].

В настоящее время выделена тенденция создания «регулируемой агроэкосистем», в рамках чего рассматривается разработка высокоэффективных методов создания перспективных форм растений с прогнозируемым комплексом хозяйственной полезных свойств. В тоже время, при всем широкомасштабном развитии инновационных технологий оставляет открытым вопрос о наличии эффективных, природо-сохраняющих технических средств их реализации [4].

Выделена проблема широкомасштабного загрязнения территорий инвазивными

растениями, среди которых борщевик Сосновского вошел в категорию наиболее проблемных ввиду опасности для здоровья человека [5].

Цель исследований: разработка концепции управления агрофизическими процессами неконтролируемого нарушения экосистемы территорий от засорения инвазивными растениями (на примере борщевика Сосновского) на длительном временном периоде, путем создания многофункционального комплекса автономного действия (робота АКИР).

Материалы и методы исследований. Визуально борщевик можно встретить на различных территориях (рис. 1), для которых имеются четкие инструкции содержания. Это стало создавать агрофизические проблемы в случае использования многолетних классических технологий удаления сорняков, зачастую не учитывающих опасности для человека, выполняющего данные работы.

Агрофизическую историю борщевика Сосновского можно исследовать с середины XX в., когда в сельском хозяйстве СССР он был введен как сельскохозяйственная кормовая культура (рис. 2). Например, в период с 1964 по 1980 гг. в Коми АССР посевные площади борщевика Сосновского составляли 4 тыс. га [6].

В качестве кормовой культуры в борщевике особую ценность представляла его объемная составляющая: крупные листья, высота стебля от 70 до 180 см, многоцветное цветение за сезон, что позволяло выделить его медоносность.



Рис. 1. Примеры мест загрязнения территорий инвазивным растением – борщевиком Сосновского:

a – вдоль железнодорожного полотна; *b* – залежные земли; *c* – придорожные полосы

Fig. 1. Examples of areas contaminated by the invasive plant – Sosnovsky hogweed:

a – along the railway track; *b* – fallow lands; *c* – roadside strips



Рис. 2. Карта использования сельскохозяйственных угодий для выращивания борщевика Сосновского как кормовой культуры (1980 г.)

Fig. 2. Map of agricultural land used for growing Sosnovsky hogweed as a fodder crop (1980)

Дополнительными качествами считались высокая зимнестойкость и кормовая ценность, что способствовало расширению его использования в качестве силосной культуры.

С течением времени проявились отрицательные стороны селекции борщевика Сосновского: в частности, были выявлены токсические для человека свойства. В соке растения содержатся фурукумарины, обладающие фотодинамической активностью и резко повышающие чувствительность кожи к ультрафиолетовому излучению.

Опыт использования борщевика в качестве силоса для корма животных показал, что животные при выпасе на полях с удовольствием употребляли его благодаря сочным и массивным стеблям и листьям, хотя позже было доказано их отрицательное действие на молоко: они придавали ему горьковатый привкус и запах эфирных масел [5].

В контексте управления агрофизическими процессами системы «Почва – растение – атмосфера» распространение борщевика снижает ценность земельных ресурсов и наносит вред окружающей среде. Статистические данные показывают, что борщевик ежегодно может увеличивать занятую им площадь на 5-10% и более [7].

Для исправления ситуации 20 апреля 2012 г. борщевик Сосновского выведен из Государственного реестра селекционных достижений, допущенных к использованию на территории Российской Федерации, как утративший хозяйственную полезность [7-9].

Агрофизические процессы управления комплексом защитных мер разрастания инвазивных растений. Имеющийся опыт борьбы с борщевиком предусматривает комплекс защитных мер, включающих в себя механические (рис. 3а), химические мероприятия (рис. 3б) и агротехнические (рис. 3с).

Химические мероприятия. Целью обработки является полное уничтожение вегетативной массы и предупреждение плодоношения растений борщевика.

Выбор гербицида зависит от назначения участка. Применение гербицидов возможно в разные фазы развития борщевика вплоть до цветения. Но оптимальными сроками для проведения обработки являются конец мая, начало июня при отрастании растений борщевика на 10-20 см.

Во время реализации химических мероприятий необходимо учитывать выявленные ограничения, а также условия снижения рисков. При вовлечении залежных земель в оборот после обработки от борщевика с использованием различных типов гербицидов имеются ограничения по дальнейшему севообороту, что требует предварительной проработки условий дальнейшего использования сельскохозяйственных земель с планом контроля выращиваемых культур.

Для земель населенных пунктов проблемным является удаление из почвы семян борщевика, на которые гербициды не оказывают влияния, что влечет планомерное уничтожение растений, ежегодно появляющихся из почвенного запаса семян. Это длительный трудоемкий процесс, который продолжается в течение не менее 5 лет при условии пространственной изоляции обрабатываемого участка от мест расположения очагов с цветущими растениями борщевика Сосновского.



Рис. 3. Мероприятия и средства борьбы с борщевиком Сосновского: а – ручное удаление; б – химическая обработка; с – механическое удаление

Fig. 3. Measures and means of controlling Sosnovsky's hogweed: а – manual removal; б – chemical treatment; с – mechanical removal

Механические мероприятия используются широко как наиболее эффективный способ борьбы с борщевиком. В число операций включаются выкапывание и скашивание, глубокая вспашка и укрывные (пленкой или геополотном) мероприятия.

Агротехнические мероприятия сочетают в себе химические и механические мероприятия, причем существует условие широкого их применения с использованием сельскохозяйственной техники.

По результатам анализа, рассмотренного выше, можно установить, что в настоящее время основные мероприятия по борьбе с борщевиком проводятся человеком вручную, и это провоцирует случаи получения ожогов независимо от качества защитных систем.

С учетом того, что каждый комплекс мероприятий требует специальных средств защиты человека, а также их масштабы, предлагается рассмотреть концепцию применения автономных средств механизации основных операций.

Для создания средств механизации следует установить функциональные характеристики рабочего оборудования, обеспечивающего выполнение всего перечня операций по удалению и утилизации борщевика [10].

Результаты и их обсуждение. Для реализации задач стратегических программ развития АПК предложена концепция контроля территорий от засорения инвазивными растениями на длительном временном периоде с привлечением технического многофункционального комплекса автономного действия.

В основу автономности легла разработка коллаборативного ротизированного модуля (Кобот АКИР). Концепция включает в себя как реализуемые в настоящее время методы и механизмы контроля разрастания борщевика с привлечением беспилотных средств картирования, так

и инновационные технологии зачистки территорий с использованием современных автономных средств.

В ходе исследований для технического задания авторами рассмотрены технические и технологические аналоги, конструктивные решения которых могут быть заимствованы для реализации типовых технологий в разрабатываемом модуле, – в частности, устройства для извлечения корневой системы, технология размещения укрывной пленки, аналоги мини-техники с различным навесным оборудованием.

Задачи исследований включали в себя не только удаление, но и утилизацию, за основу которой взяты процесс создания полезного продукта из борщевика, механизация его измельчения, гранулирование и прочие продукты формования.

Комплексность разрабатываемого автономного модуля заключается в том, чтобы использовать современные достижения позиционирования рабочего блока с использованием БПЛА, формирующего рабочие зоны комплекса по периметру зон размещения борщевика [11].

Мониторинг состояния засоренности территорий борщевиком Сосновского осуществляется регулярно. Карты можно просматривать и анализировать на Геопортале. Регулярный контроль площади заражения борщевиком по Московской области позволил определить зоны заражения, которые составляют 34 тыс. га (рис. 4).

Следует отметить, что для БПЛА разработано приложение распознавания именно борщевика с использованием машинного зрения по мультиспектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона.

Масштабность задачи показала интерес многих исследователей к разработке автономных модулей удаления борщевика. В частности, имеются типовые решения: Юго-Западный университет – Робот оснащен СВЧ-излучателем,

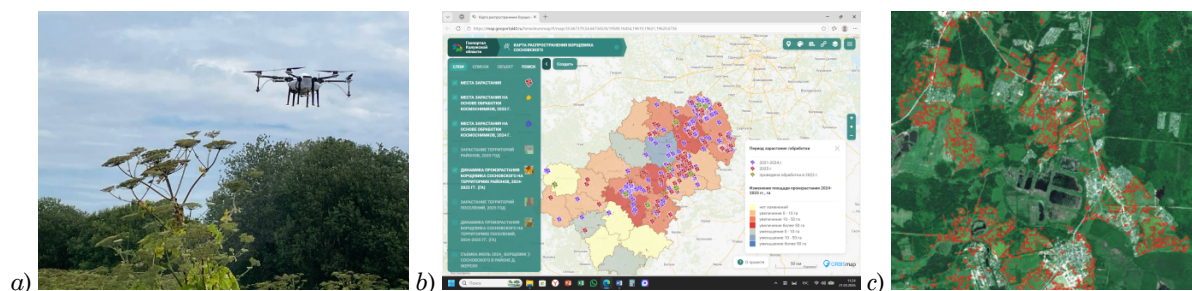


Рис. 4. Аэросъемки территорий по контролю уровня засорения борщевиком Сосновского:
 а – БПЛА с фото-видео оборудованием; б – геолокационное картирование;
 с – цифровая модель (URL: <https://map.geoportal40.ru/heracleummap/#/map>)

Fig. 4. Aerial surveys of areas to control the level of hogweed infestation:
 а – UAV with photo and video equipment; б – geolocation mapping; с – digital model
 (Electronic resource: <https://map.geoportal40.ru/heracleummap/#/map> (open access))

исключена химическая обработка, дистанционное управление; Вятский ГАТУ – Роботизированная гусеничная платформа, мульчер для обработки химикатами с помощью пульта, дистанционное управление – 100 м; Пермская краевая дорожно-эксплуатационная служба – Многофункциональный комплекс с опрыскивателем и измельчителем и прочие разработки [11].

На следующем этапе исследований выявлены имеющиеся разработки технологий получения различных продуктов из борщевика – в частности, целлюлозно-бумажное производство, что реализуется в технологии разработанной Институтом проблемы химической физики РАН [12].

Также следует выделить развитие направления технологического процесса выработки топлива из зеленой массы борщевика, так как со своему составу он имеет большой потенциал. В частности, по представленному патентному решению можно получить биоэтанол: от 79 (дикорастущий борщевик) до 145 л/т (культивируемый) и от 3950 до 36250 л/га в зависимости от урожайности и процентного содержание сахарозы [13].

На основании вышеизложенного разработан алгоритм технологической комплексности, в основе которого взят коллаборативный робот с встроенной автономной системой управления, включающей в себя цифровой модуль контроля засоренности участка (робот АКИР): комплект камер наблюдения, GPS трекеров и датчиков [14].

В качестве базового рабочего органа используются грейферный зуб, шнек, двухсекционный захват и прочее рабочее оборудование.



Рис. 5. Алгоритм получения из зеленой массы борщевика Сосновского биопродуктов: а – алгоритм; б – гранулы, порошок, топливо

Fig. 5. Algorithm for obtaining bioproducts Sosnovsky from the green mass of hogweed: а – algorithm; б – granules, powder, fuel

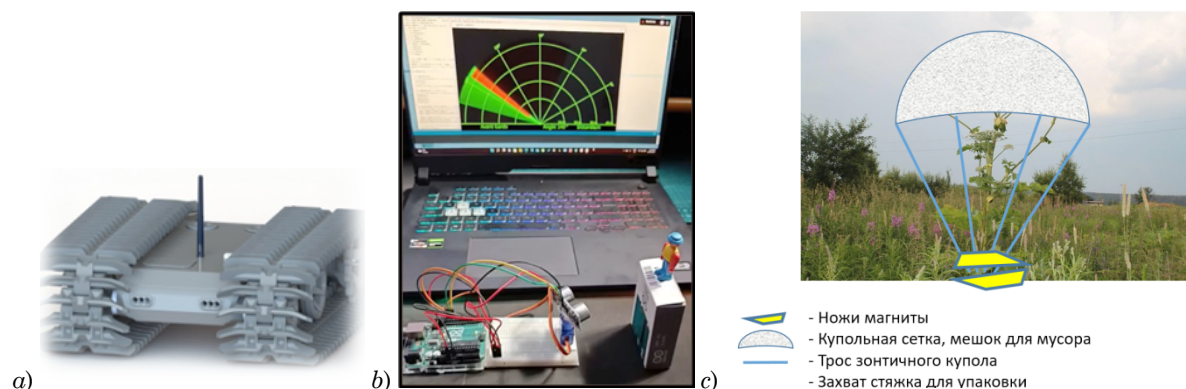


Рис. 6. Автономный многофункциональный комплекс для удаления и утилизации борщевика Сосновского (концептуальное решение): а – базовая станция; б – цифровой блок управления; с – схема удаления борщевика [14]

Fig. 6. Autonomous multifunctional complex for the removal and disposal of Sosnovsky hogweed (conceptual solution): а – base station; б – digital control unit; с – scheme for removing hogweed [14]

Выводы

Выявлена проблема неконтролируемого нарушения экосистемы через засорение территорий инвазивными растениями, среди которых борщевик Сосновский считается наиболее агрессивным и опасным для человека.

Обоснована низкая эффективность предлагаемых технических решений по борьбе с инвазивными растениями на примере борщевика Сосновского.

Предложена концепция контроля территорий от засорения инвазивными растениями

на примере борщевика Сосновского на длительном временном периоде с привлечением технического многофункционального комплекса автономного действия (Кобот АКИР).

При проектировании автономного многофункционального комплекса управления засорения территорий борщевиком Сосновским обеспечена согласованность технических требований – таких, как требования к рабочему органу; сезонность работы комплекса, объем работы комплекса, контроль засоренности участка.

Список использованных источников

1. Голубев И.Г., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. Состояние и перспективы вовлечения залежных земель в оборот // Мелиорация. 2021. № 3 (97). С. 67-74. EDN: SYRHE
2. Голубев И.Г., Мишуров Н.П., Голубев В.В. и др. Переходные практики введения залежных земель в оборот. Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2021. 80 с. EDN: PFVVEL
3. Севрюгина Н.С., Фомин А.Ю., Ахилбеков М.Н. Согласованность технологий содержания защитных лесополос и мелиоративных каналов // Природообустройство. 2025. № 3. С. 101-107. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-3-101-107. EDN: CMSIJW
4. Севрюгина Н.С., Загородный Н.А., Модина М.А. и др. Моделирование устойчивого управления ресурсами окружающей среды на основе принципов экологической кибернетики // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2025. № 2. С. 37-42. EDN: HQUTPN
5. Лунева Н.Н. Борщевик Сосновского heracleum sosnowskyi (apiaceae): уничтожение или рациональное использование растительного сырья? // Растительные ресурсы. 2024. Т. 60, № 1. С. 54-68. DOI: 10.31857/S0033994624010031. EDN: HGMWII
6. Шемякина А.В. Борщевик – медоносное растение Дальнего Востока // Пчеловодство. 2021. № 7. С. 27-28. EDN: MVCAUS
7. Фадеев Н.Б., Симонов Д.А. Использование дистанционных методов для дешифрирования площадей, занятых опасным инвазивным видом – борщевиком Сосновского (Heracleum sosnowskyi Manden., Apiaceae) // Доклады ТСХА, Москва, 3-5 декабря 2019 г. Вып. 292, Ч. II. Москва: Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. С. 559-563. EDN: QFIYXO
8. Медведева А. БПЛА в Новгородской области ищут борщевик Сосновского и осматривают посевы // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2025. № 2. С. 62-63. EDN: ZRKXOL
9. Шулятьева Г.М. Обоснование технологии контроля ареала распространения борщевика Сосновского в аспекте управления земельными ресурсами // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2024. № 2. С. 55-61. DOI: 10.31442/0235-2494-2024-0-2-55-61. EDN: EWKGJZ
10. Родичева Т.В., Ивахнова О.Ф. Физические свойства дерново-слабоподзолистых почв разного гранулометрического состава под борщевиком Сосновского // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2025. № 4 (82). С. 56-68. DOI: 10.24411/2078-1318-2025-4-56-68. EDN: OKFHQN
11. Ипатов Д.Д. Беспилотные летательные аппараты в сельском хозяйстве, эффективность работы и ограничения

Коллаборативный робот с встроенной автономной системой управления (кобота АКИР), включает в себя цифровой модуль контроля засоренности участка: комплект камер наблюдения, GPS трекеров и датчиков.

Дополнительно рассмотрены биохимические характеристики борщевика для получения из зеленой массы различных продуктов – в частности, биотоплива.

References

1. Golubev I.G., Apatenko A.S., Sevryugina N.S. The state and prospects of the fallow lands involvement in the circulation // Melioration. 2021. No. 3(97). P. 67-74. EDN: SYRHE
2. Golubev I.G., Mishurov N.P., Golubev V.V. [et al.] Best practices for introducing fallow lands into circulation. – Moscow: Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support for the Agro-Industrial Complex, 2021. 80 p. EDN: PFVVEL
3. Sevryugina N.S., Fomin A.Yu., and Akhilbekov M.N. Coordination of Technologies for Maintaining Protective Forest belts and Reclamation Canals // Prirodoobustroystvo. 2025. No. 3. P. 101-107. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-3-101-107. EDN: CMSIJW
4. Sevryugina N.S., Zagorodny N.A., Modina M.A. [et al.] Modeling Sustainable Environmental Resource Management Based on the Principles of Environmental Cybernetics // Izvestiya of Tula State University. Earth Sciences. 2025. No. 2. P. 37-42. EDN: HQUTPN
5. Luneva N.N. Heracleum sosnowskyi (Apiaceae): Destruction or Rational Use of Plant Raw Materials? // Plant Resources. 2024. Vol. 60, No. 1. P. 54-68. DOI: 10.31857/S0033994624010031. EDN: HGMWII
6. Shemyakina A.V. Cow parsnip is a honey plant of the Far East // Beekeeping. 2021. No. 7. P. 27-28. EDN: MVCAUS
7. Fadeev N.B., Simonov D.A. Use of remote methods for the interpretation of areas occupied by a dangerous invasive species – hogweed (Heracleum sosnowskyi Manden., Apiaceae) // Reports of the TSSA, Moscow, December 03-05, 2019. Volume Issue 292, Part II. – Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2020. P. 559-563. EDN: QFIYXO
8. Medvedeva A. UAVs in the Novgorod Region Search for Sosnowsky's Cow parsnip and Inspect Crops // Agricultural Machinery: Maintenance and Repair. – 2025. No. 2. P. 62-63. EDN: ZRKXOL
9. Shulyatyeva G.M. Justification of the technology for controlling the spread of Sosnowsky's hogweed in the aspect of land resource management // Economics of Agricultural and Processing Enterprises. 2024. No. 2. P. 55-61. DOI: 10.31442/0235-2494-2024-0-2-55-61. EDN: EWKGJZ
10. Rodicheva T.V., Ivakhnova O.F. Physical Properties of Sod-Weakly Podzolic Soils of Different Granulometric Composition under Sosnowsky's Cow parsnip // Izvestiya of the St. Petersburg State Agrarian University. – 2025. – No. 4(82). P. 56-68. DOI: 10.24411/2078-1318-2025-4-56-68. EDN: OKFHQN
11. Ipatov D.D. Unmanned aerial vehicles in agriculture, work efficiency and limitations // Scientific Forum: Economics, Management and Digital Technologies in the Agro-industrial complex-2024: A COLLECTION of PAPERS dedicated to the International Scientific and Practical Student Conference, Moscow,

// Научный форум: Экономика, управление и цифровые технологии в АПК-2024: Сборник трудов, приуроченных к Международной научно-практической студенческой конференции, Москва, 20 ноября 2024 г. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. С. 255-259. EDN: INJWNS

12. Мусорина Т.А., Наумова Е.А., Шонина Е.В. и др. Теплотехнические свойства энергоэффективного материала на основе растительной добавки (сухой борщевик) // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, № 12. С. 1555-1571. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1555-1571. EDN: JWTJIZ

13. Sevryugina N.S., Dragulenko V.V., Sukhanov D.S. et al. Biogas as a solution to the problem of waste utilisation in agriculture // BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES2024), Kazan, 28-29 ноября 2024 г. Kazan: EDP Sciences, 2025. P. 00009. DOI: 10.1051/bioconf/202516100009. EDN: JKQVJA

14. Устройство для очистки водных и прибрежных объектов от загрязнений: Патент № 2820689 C1 Российская Федерация, МПК E02B15/00, E02B3/02, B60F 3/00; № 2023107234; заявл. 27.03.2023; Опубл. 07.06.2024 / А.Ю. Фомин, Н.С. Севрюгина, А.С. Апатенко и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». EDN: KESIPF

Информация об авторах

Надежда Савельевна Севрюгина, д-р техн. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; AuthorID: 144506; <https://orcid.org/0000-0002-3494-1437>; sevruginans@rgau-msha.ru

Александр Юрьевич Фомин, канд. техн. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; AuthorID: 804021; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>; sachafomin@mail.ru

Алексей Сергеевич Апатенко, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; AuthorID: 261571; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; a.apatenko@rgau-msha.ru

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare that there are no conflicts of interests

Поступила в редакцию / Received 15.03.2026

Одобрена после рецензирования / Approved 03.06.2026

Принята к публикации / Accepted 10.06.2026

November 20, 2024. – Moscow: Russian State Agrarian University, 2024. P. 255-259. EDN: INJWNS

12. Musorina T.A., Naumova E.A., Shonina E.V. [et al.] Thermal properties of an energy-efficient material based on a plant additive (dry hogweed) // Vestnik MGSU. 2019. Vol. 14, No. 12. P. 1555-1571. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1555-1571. EDN: JWTJIZ

13. Sevryugina N.S., Dragulenko V.V., Sukhanov D.S. [et al.] Biogas as a solution to the problem of waste utilization in agriculture // BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES2024), Kazan, 28-29 ноября 2024 года. – Kazan: EDP Sciences, 2025. P. 00009. DOI: 10.1051/bioconf/202516100009. EDN: JKQVJA

14. Fomin A.Yu., Sevryugina N.S., Apatenko A.S. [et al.] Patent No. 2820689 C1, Russian Federation, IPC E02B15/00, E02B3/02, B60F 3/00. Device for cleaning water and coastal objects from pollution: No. 2023107234: filed on March 27, 2023; published on June 7, 2024; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev». EDN: KESIPF

Information about the authors

Nadezhda S. Sevryugina, DSs (Tech), Associate Professor, Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy; AuthorID: 144506; <https://orcid.org/0000-0002-3494-1437>; sevruginans@rgau-msha.ru

Alexander Yu. Fomin, CSs (Tech), Associate Professor, Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy; AuthorID: 804021; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>; sachafomin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>; sachafomin@mail.ru

Alexey S. Apatenko, DSs (Tech), Professor, Head of Department, Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy; AuthorID: 261571; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; a.apatenko@rgau-msha.ru

Declared contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Оригинальная статья

УДК 631.67:633.15(574.1)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-62-71>

РАСЧЕТ РЕЖИМА ОРОШЕНИЯ КУКУРУЗЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОЧВ АГРОКЛИМАТИЧЕСКОГО РЕГИОНА ИМБО (РЕСПУБЛИКА БУРУНДИ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ FAO CROPWAT

И. Ичигетсе

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

citegetseinnocent@gmail.com; ORCID: 0009-0004-5052-4803

Аннотация. Рациональное использование водных ресурсов имеет критическое значение для устойчивого сельскохозяйственного производства в регионах с выраженной сезонностью осадков, к которым относится Республика Бурунди. Исследования направлены на определение потребности в воде кукурузы и разработку оптимального режима орошения с использованием методологии ФАО, реализованной в модели CROPWAT 8.0, применительно к трем расчетным участкам агроклиматического региона Имбо с различными типами почв. Участки I, II и III соответствуют почвам типа Солончаки (SCgl), Глейсоли (GLmo) и Камбисоли (CMdy) соответственно. Климатические данные получены с метеостанции Бужумбура. Дата посева – 1 июля, дата уборки – 28 октября, продолжительность вегетационного периода – 120 суток. Эталонная эвапотранспирация рассчитана по методу Пенмана-Монтейта. Суммарное водопотребление кукурузы ETc составило 434.8 мм; эффективные осадки в вегетационный период – 127.2 мм (29.2%); теоретическая потребность кукурузы в воде по методу CWR (Crop Water Requirement) – 312.0 мм – одинакова для всех трех участков. Графики поливов, сформированные с учетом реальных почвенных параметров каждого участка, существенно различаются: участок I (Солончаки, продуктивные влагозапасы (Total Available Water, TAW) = 120 мм/м) – 8 поливов нормой 38 мм, брутто – 337.8 мм, эффективность графика орошения (Efficiency irrigation schedule) – 97.9%; участок II (Глейсоли, TAW = 120 мм/м) – 11 поливов нормой 35 мм, брутто 427.8 мм, эффективность графика орошения составила 99.7%; участок III (Камбисоли, TAW = 80 мм/м) – 14 поливов нормой 32 мм, брутто – 497.8 мм, эффективность графика орошения составила 85.6%. Предложены практические рекомендации по оптимизации режима орошения кукурузы для каждого типа почв.

Ключевые слова: CROPWAT, потребность в воде, режим орошения, кукуруза, регион Имбо, Бурунди, Солончаки, Глейсоли, Камбисоли, эвапотранспирация

Для цитирования: Ичигетсе И. Расчет режима орошения кукурузы для различных типов почв агроклиматического региона ИМБО (Республика Бурунди) с использованием модели FAO CROPWAT. Природообустройство. 2026;Т.19(3):62-71. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-62-71>

Scientific article

CALCULATION OF IRRIGATION REGIME FOR MAIZE ON DIFFERENT SOIL TYPES OF THE IMBO AGRO-CLIMATIC REGION (REPUBLIC OF BURUNDI) USING THE FAO CROPWAT MODEL

I. Icitetse

A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Russian Federation

ORCID: 0009-0004-5052-4803, citegetseinnocent@gmail.com

Abstract. Rational use of water resources is critical for sustainable agricultural production in regions with pronounced rainfall seasonality, such as the Republic of Burundi. This study aims to determine the water requirements of maize and develop an optimal irrigation regime using the FAO methodology implemented in the CROPWAT 8.0 model for three calculation plots in the Imbo agro-climatic region with different soil types. Plots I, II and III correspond to Solonchaks (SCgl), Gleysols (GLmo) and Cambisols (CMdy) soils, respectively. Climatic data were obtained from the Bujumbura meteorological station. Planting date: 1 July; harvest: 28 October; growing season: 120 days. Reference evapotranspiration

was calculated using the Penman-Monteith method. Total maize ET_c was 434.8 mm; effective rainfall during the growing season – 127.2 mm (29.2%); the theoretical crop water requirement (CWR) of maize – 312.0 mm – is identical for all three plots. Irrigation schedules generated with actual soil parameters differ substantially: Plot I (Solonchaks, total available water (TAW) = 120 mm/m) – 8 irrigations at 38 mm net, gross 337.8 mm, efficiency 97.9%; Plot II (Gleysols, TAW = 120 mm/m) – 11 irrigations at 35 mm net, gross 427.8 mm, efficiency 99.7%; Plot III (Cambisols, TAW = 80 mm/m) – 14 irrigations at 32 mm net, gross 497.8 mm, efficiency 85.6%. Practical recommendations for optimising the maize irrigation regime for each soil type are proposed.

Keywords: CROPWAT, water requirement, irrigation regime, maize, Imbo region, Burundi, Solonchaks, Gleysols, Cambisols, evapotranspirati

For citation: Icitetse I. Calculation of irrigation regime for maize on different soil types of the Imbo agro-climatic region (republic of Burundi) using the FAO CROPWAT model. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):62-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-62-71>

Введение. Кукуруза (*Zea mays* L.) является в Республике Бурунди одной из основных продовольственных культур, играющей ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности страны [1, 2]. Развитие орошаемого земледелия в Бурунди осложнено экономическими, технологическими и природными факторами. Неравномерность и сезонность распределения осадков, продолжительность засушливых периодов обуславливают необходимость применения научно обоснованных методов орошения [3].

Агроклиматический регион Имбо, расположенный в Западной рифтовой долине Бурунди вдоль реки Русизи и озера Танганьика, характеризуется значительным разнообразием почвенного покрова. На отдельных участках равнины встречаются Солончаки (SCgl) с близким залеганием минерализованных грунтовых вод, Глейсоли (GLmo) с периодическим переувлажнением, а также Камбисоли (CMdy) – умеренно развитые почвы на первых надпойменных террасах. Это разнообразие, пространственная и генетическая неоднородность определяют существенные различия гидрофизических свойств почв и, следовательно, режимов орошения [10, 11, 13].

Методология ФАО, реализованная в модели CROPWAT 8.0 [7, 8], является стандартным международным инструментом для расчета потребности культур в воде и планирования орошения. Модель широко применяется в условиях тропического и субтропического климата [9, 16-18] и обеспечивает систематический подход к оценке водопотребления растений на основе климатических, почвенных и биологических данных.

Вместе с тем для условий агроклиматического региона Имбо расчеты водопотребления кукурузы с дифференциацией по типам почв ранее не производились, что определяет актуальность работы.

Цель исследований: расчет водопотребления кукурузы в агроклиматическом регионе

Имбо Республики Бурунди и разработка оптимального режима орошения методом FAO CROPWAT 8.0 для трех расчетных участков с различными типами почв (Солончаки, Глейсоли, Камбисоли).

Материалы и методы исследований.

1. Место исследования. Район исследований – равнина Имбо в западной части Республики Бурунди (высота 775-1000 м н.у.м.). Регион простирается вдоль озера Танганьика и реки Русизи. Среднегодовое количество осадков составляет около 800 мм, среднегодовая температура – 23°C. Для расчетов выделены три участка с различными типами почв, характерными для данного региона:

Участок I – Солончаки глеевые (Solonchaks SCgl). Почвы с высоким содержанием легкорастворимых солей, формирующиеся в условиях высокой испаряемости при неглубоком залегании минерализованных грунтовых вод, характеризуются ограниченной глубиной корнеобитаемого слоя (60 см) и небольшим коэффициентом фильтрации (10 мм/сут.).

Участок II – Глейсоли молликовые (Gleysols GLmo), формирующиеся в условиях периодического переувлажнения. Диагностическим признаком является глеевый горизонт. Характеризуются значением общедоступной для растения влаги – TAW = 120 мм/м, крайне малыми коэффициентами фильтрации (около 2 мм/сут.), глубиной корнеобитаемого слоя 60 см.

Участок III – Камбисоли дистрические (Cambisols CMdy). Умеренно развитые почвы со слабой дифференциацией профиля, обладают умеренным плодородием. TAW = 80 мм/м, глубина корнеобитаемого слоя – 60 см, коэффициент фильтрации – 4 мм/сут.

2. Методология CROPWAT 8.0

Методологический подход основан на использовании модели CROPWAT 8.0, разработанной Отделом развития земельных и водных

ресурсов ФАО [7, 8]. Расчет включает в себя следующие основные компоненты.

1. Расчет эталонной эвапотранспирации (ET_o) по методу Пенмана-Монтейта:

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T}\right) \cdot u_2 \cdot \delta e}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}, \quad (1)$$

где ET_o – эталонная эвапотранспирация (мм/сут.); Δ – скорость изменения давления насыщенного пара (кПа/°C); R_n – чистая радиация поверхности (МДж/м²/сут.); G – тепловой поток в почве (МДж/м²/сут.); T – температура воздуха на высоте 2 м (°C); u_2 – скорость ветра на высоте 2 м (м/с); δe – дефицит давления пара (кПа); γ – психрометрическая постоянная (кПа/°C).

2. Определение потребности культуры в воде (ETc):

$$ETc = ET_o \times Kc, \quad (2)$$

где ET_o – эталонная эвапотранспирация по формуле (1); Kc – коэффициент культуры, зависящий от фазы развития.

3. Расчет потребности в орошении (IR):

$$IR = ETc - Peff, \quad (3)$$

где IR – потребность в орошении (мм); $Peff$ – эффективные осадки (мм).

4. Формирование графика поливов с учетом ежедневного водного баланса почвы, параметров фильтрации и пороговых значений истощения влаги в корнеобитаемом слое.

Для расчета водопотребления кукурузы использованы климатические данные метеостанции Бужумбура (3.32° ю.ш., 29.32° в.д., высота – 783 м н.у.м.).

Климат региона исследований характеризуется относительно стабильным температурным

режимом в течение года (табл. 1): средняя минимальная температура – 19.0°C, максимальная – 29.7°C. Среднегодовая $ET_o = 4.39$ мм/сут. Сухой период (июнь-август) отличается повышенными значениями ET_o (4.44-4.99 мм/сут.) при минимальных осадках, что определяет необходимость орошения кукурузы в летний сезон.

Эффективные осадки ($Peff$) определены методом Службы охраны почв США (USDA Soil Conservation Service), реализованным в CROPWAT 8.0 (табл. 2):

$$Peff = Pmon (125 - 0.2 Pmon) / 125 \text{ при } Pmon \leq 250 \text{ мм};$$

$$Peff = 125 + 0.1 Pmon \text{ при } Pmon > 250 \text{ мм}, \quad (4)$$

где $Pmon$ – суммарные месячные осадки (мм/мес.).

Суммарные годовые осадки – 775.9 мм, эффективные – 641.2 мм. В вегетационный период (июль-октябрь – 120 суток) эффективные осадки составили 127.2 мм: июль – 4.5, август – 28.8, сентябрь – 54.3, октябрь – 44.5 мм. Крайне малое количество осадков в июле-августе обуславливает высокую потребность в орошении в начале вегетации.

Параметры, характеризующие биологические свойства кукурузы, приняты по стандартному файлу ФАО «MAIZE (Grain)» с датой посева 01.07 и уборки 28.10. Коэффициенты культуры Kc приняты по ФАО-56 [7].

Динамика коэффициента культуры Kc отражает физиологические особенности развития кукурузы: минимальное водопотребление в начальной фазе ($Kc = 0.15$) обусловлено малой листовой поверхностью и слабым транспирационным потоком; нарастание Kc в фазе развития соответствует интенсивному

Таблица 1. Климатические параметры региона исследований (ст. Бужумбура)

Table 1. Climatic parameters of the study region (Bujumbura station)

Месяц / Month	Мин. т-ра, °C / Min temperature	Макс. т-ра, °C / Max temperature	Влажн., % / Moisture, %	Ветер, м/с / Wind, m/s	Солнце, ч / Sun, h	Рад., МДж/м²/сут / Rad., MJ/m²/day	ET_o , мм/сут / ET_o , mm/day
Январь / January	19.4	29.4	73	2.0	5.2	17.4	4.08
Февраль / February	20.1	31.2	70	1.7	5.2	17.7	4.32
Март / March	19.6	29.3	75	2.2	5.5	18.1	4.24
Апрель / April	19.4	29.3	74	2.2	5.3	17.0	4.04
Май / May	19.1	30.4	70	2.4	6.2	17.2	4.29
Июнь / June	17.8	30.0	66	2.3	7.6	18.4	4.44
Июль / July	17.1	29.4	61	2.9	8.2	19.5	4.95
Август / August	19.1	29.2	64	3.0	7.6	19.9	4.99
Сентябрь / September	19.1	30.0	68	2.4	6.7	19.6	4.75
Октябрь / October	18.7	30.3	68	2.6	5.6	18.2	4.71
Ноябрь / November	19.1	28.8	75	2.1	4.9	16.9	3.95
Декабрь / December	19.2	29.2	75	2.1	5.0	16.8	3.96
Среднее / Average	19.0	29.7	70	2.3	6.1	18.1	4.39

росту вегетативной массы; максимум в средней фазе ($K_c = 1.15$) совпадает с периодом цветения и формирования зерна, когда суммарное водопотребление культуры достигает наибольших значений; снижение в позднюю фазу ($K_c = 0.15$) отражает постепенное отмирание листового аппарата и уменьшение транспирации в период созревания.

Таблица 2. Среднемесячные осадки и эффективные осадки (ст. Бужумбура)

Table 2. Average monthly precipitation and effective precipitation (Bujumbura station)

Месяц / Month	Осадки, мм / Precipitation, mm	Эфф. осадки, мм / Effective precipitation, mm
Январь / January	65.8	58.9
Февраль / February	13.9	13.6
Март / March	147.1	112.5
Апрель / April	92.5	78.8
Май / May	25.3	24.3
Июнь / June	0.3	0.3
Июль / July	4.5	4.5
Август / August	30.3	28.8
Сентябрь / September	60.1	54.3
Октябрь / October	48.2	44.5
Ноябрь / November	128.3	102.0
Декабрь / December	159.6	118.8
Итого / Total	775.9	641.2

Критическое истощение и фактор реакции урожайности (K_y) характеризуют чувствительность кукурузы к водному дефициту. Критическое истощение определяет допустимую долю продуктивных влагозапасов (TAW), которую культура может использовать без снижения водопотребления: значение $p = 0.55$ в начальной и средней фазах означает, что полив назначается при расходе 55% TAW, тогда как в позднюю фазу допускается более глубокое иссушение ($p = 0.80$): в период созревания кукуруза менее требовательна к влагообеспеченности. Фактор реакции урожайности K_y показывает, насколько снижается урожайность при возникновении водного дефицита в каждой фазе: низкие значения в начальной фазе и фазе развития ($K_y = 0.40$) указывают на относительную устойчивость кукурузы к умеренному дефициту воды на ранних этапах, тогда как максимальное значение $K_y = 1.30$ в средней фазе подтверждает, что период цветения и налива зерна является критическим: даже кратковременный водный стресс в это время ведет к существенному снижению урожайности. В позднюю фазу $K_y = 0.50$, что отражает умеренную чувствительность при созревании. Суммарный K_y за сезон составляет 1.25.

Высота растения (2.00 м) задается в CROPWAT как единый параметр культуры для расчета аэродинамического сопротивления посева и не зависит от фазы развития.

Таблица 3. Фенологические параметры кукурузы в CROPWAT 8.0 (MAIZE FAO Book.CRO)

Table 3. Phenological parameters of maize in CROPWAT 8.0 (MAIZE FAO Book.CRO)

Параметр / Parameter	Нач. Фаза / Initial phase	Фаза развития / Developmental phase	Сред. фаза (цветение и налив зерна) / Middle phase (flowering and ripening of grain)	Поздн. фаза (созревание) / Late phase (maturation)
Длительность, дней / Duration, days	15	35	60	30
K_c	0.15	0.15 → 1.15	1.15	0.15
Глубина корней, м / Root depth, m	0.30	0.30 → 1.00	1.00	1.00
Критич. Истощение / Critical exhaustion	0.55	0.55	0.55	0.80
Фактор реакции урожайности / Yield response factor	0.40	0.40	1.30	0.50
Высота растения, м / Plant height, m	2.00			

Таблица 4. Почвенные параметры расчётных участков (входные данные CROPWAT 8.0)

Table 4. Soil parameters of the calculated plots (input data of CROPWAT 8.0)

Параметр / Parameter	Участок I / Plot I	Участок II / Plot II	Участок III / Plot III
Тип почвы / Soil type	Solonchaks (SCgl)	Gleysols (GLmo)	Cambisols (CMdy)
TAW (ПВ – ВЗ), мм/метр / TAW (SM – MR), mm / meter	120	120	80
Глубина корнеобитаемого слоя, см / Depth of the root layer, cm	60	60	60
Начальная влажность почвы, % / Initial soil moisture, %	55	50	50
Нач. величина доступной влаги, мм/метр / Initial available moisture value, mm / meter	54	60	40

Для ввода почвенных параметров расчетных участков в CROPWAT 8.0 использован формат: TAW (мм/м), максимальная скорость фильтрации (мм/сут.), максимальная глубина корнеобитания (см), начальное истощение влаги (%).

Начальная влажность почвы, определяемая к моменту посева (начало июля): 55% для участка I (Солончаки) соответствует более сухим условиям пойменного участка в начале сухого сезона; 50% для участков II и III отражает умеренное иссушение почвы к началу вегетации. Ограничение глубины корнеобитания 60 см, отраженное в таблице 4 (при биологическом потенциале культуры 100 см по таблице 3), обусловлено почвенными свойствами каждого участка: засоленным горизонтом на участке I, глеевым горизонтом на участке II и плотным камбиковым горизонтом на участке III.

Планирование режима орошения для всех трех участков выполнено в CROPWAT 8.0 со следующими настройками: время полива – при достижении 100% критического допустимого истощения; норма подачи – фиксированная (38 мм для участка I, 35 мм – для участка II, 32 мм – для участка III). В настройках CROPWAT задан параметр Field efficiency (КПД техники полива) – 90% для всех участков: это отношение поливной нормы нетто к брутто, характеризующее потери при транспортировке и распределении воды. Отдельно CROPWAT рассчитывает Efficiency irrigation schedule (эффективность графика орошения) – показатель, отражающий долю оросительной воды, реально использованной культурой с учетом потерь на глубокий дренаж

и поверхностный сток. Значения Efficiency irrigation schedule приведены в итоговых строках таблиц 6-8. Различие в фиксированных поливных нормах нетто определяется емкостью корнеобитаемого слоя каждого типа почвы.

Результаты и их обсуждение.

1. Водопотребление кукурузы. Суммарное водопотребление ET_c и потребность по методу CWR рассчитаны на основе климатических данных и параметров культуры и не зависят от типа почвы, поэтому одинаковы для всех трех участков.

Анализ результатов позволяет выделить следующие особенности. В начальной фазе (1-15 сутки) водопотребление является минимальным: 0.72 мм/сут. при $K_s = 0.15$, что обусловлено малой листовой поверхностью. В фазе развития (16-50 сутки) K_s линейно возрастает от 0.15 до 1.15, ET_c достигает 3.78 мм/сут. к концу фазы. В средней фазе (51-90 сутки) водопотребление является максимальным: $ET_c = 5.20-5.61$ мм/сут. при $K_s = 1.04-1.14$ – период формирования урожая, наиболее критичный к водному стрессу. В позднюю фазу (91-120 сутки) ET_c снижается до 1.18 мм/сут.

Суммарное ET_c за 120-суточный период составляет 434.8 мм, эффективные осадки за вегетацию – 127.2 мм (29.2% от ET_c). Теоретическая потребность в орошении по CWR составляет 312.

2. Режим орошения. Для всех трех расчетных участков коэффициент водного стресса $K_s = 1.00$ и относительная эвапотранспирация $ET_a/ET_c = 100\%$ на протяжении всего вегетационного периода. Данный результат закономерен и обусловлен выбранной стратегией орошения: в модели FAO-56 K_s остается равным единице

Таблица 5. Потребность кукурузы в воде по декадам вегетационного периода (идентично для участков I, II, III)

Table 5. Water demand for maize by decades of the growing season (identical for plots I, II, III)

Месяц / Month	Дек. / Decade	Фаза / Phase	K_s	ET_c , мм/сут. / ET_c , mm / day	ET_c , мм/дек. / ET_c , mm / dec.	Эфф. ос., мм/дек. / Effective precipitation, mm / dec.	Потр. орош., мм/дек. / Cons. irrigation, mm / dec
Июль / July	1	Нач. / Initial	0.15	0.72	7.2	0.4	6.7
Июль / July	2	Разв. / Develop.	0.19	0.95	9.5	0.6	8.9
Июль / July	3	Разв. / Develop.	0.46	2.29	25.2	3.6	21.6
Август / August	1	Разв. / Develop.	0.76	3.78	37.8	6.9	30.9
Август / August	2	Сред. / Middle	1.04	5.20	52.0	9.6	42.4
Август / August	3	Сред. / Middle	1.14	5.61	61.8	12.4	49.3
Сентябрь / September	1	Сред. / Middle	1.14	5.52	55.2	16.4	38.8
Сентябрь / September	2	Сред. / Middle	1.14	5.43	54.3	19.8	34.5
Сентябрь / September	3	Поздн. / Late	1.13	5.36	53.6	18.1	35.5
Октябрь / October	1	Поздн. / Late	0.89	4.22	42.2	13.8	28.4
Октябрь / October	2	Поздн. / Late	0.56	2.65	26.5	11.7	14.8
Октябрь / October	3	Поздн. / Late	0.27	1.18	9.5	13.9	0.0
Итого / Total					434.8	127.2	312.0

до тех пор, пока фактическое истощение почвенной влаги не превышает порога критического истощения. Поскольку полив в CROPWAT назначается в момент достижения этого порога, истощение никогда не переходит в зону стресса, и фактическая эвапотранспирация E_{Ta} совпадает с потенциальной E_{Ts} . Таким образом, $K_s = 1.00$ подтверждает, что разработанные режимы орошения полностью обеспечивают потребности кукурузы в воде на всех трех участках, снижение урожайности не прогнозируется.

2.1. Участок I – Солончаки SCgl

Расчет показал 8 поливов с постоянной нормой 38 мм нетто (42.2 мм брутто при КПД техники полива 90%). Первый полив назначен на 1 июля, первый день вегетации, в связи с начальным дефицитом почвенной влаги, составившим 57% TAW. Интервалы между поливами варьируют от 9 до 27 суток: наибольшие значения характерны для начальной фазы, когда водопотребление культуры является минимальным, наименьшие приходятся на среднюю фазу, совпадающую с максимальными значениями E_{Ts} . Суммарная оросительная норма нетто составила 304.0 мм, брутто – 337.8 мм.

Потери при орошении являются незначительными и составляют 6.3 мм. Все осадки вегетационного периода оказались эффективными, потери осадков на поверхностный сток отсутствуют. Эффективность графика орошения составила 97.9%. Дефицит влаги в почве к моменту уборки составил 36.4 мм. Снижения урожайности не прогнозируется: на протяжении всего вегетационного периода коэффициент водного стресса $K_s = 1.00$, что свидетельствует об отсутствии водного стресса и полном удовлетворении потребностей культуры в воде.

2.2. Участок II – Глейсоли GLmo

Для участка II расчет показал 11 поливов с постоянной нормой 35 мм нетто (38.9 мм брутто при КПД техники полива 90%). Первый полив назначен на 3 июля в связи с начальным истощением почвенной влаги 55% TAW. Интервалы между поливами варьируют от 6 до 26 суток: наибольшие в начальную фазу при малом водопотреблении, наименьшие в среднюю фазу при максимальных значениях E_{Ts} . Суммарная оросительная норма нетто составила 385.0 мм, брутто – 427.8 мм.

Потери при орошении составили 1.2 мм, что объясняется крайне малой скоростью вертикальной фильтрации почвы, ограничивающей влагоперенос ниже корнеобитаемого слоя. Все осадки вегетационного периода оказались эффективными: суммарные эффективные осадки совпадают с фактическими и составили 143.2 мм. Эффективность графика орошения составила 99.7%. Дефицит влаги в почве к моменту уборки составил 45.3 мм. Снижения урожайности не прогнозируется: коэффициент водного стресса $K_s = 1.00$ на протяжении всего вегетационного периода.

2.3. Участок III – Камбисоли CMdy

Для участка III (Камбисоли) расчет показал 14 поливов с постоянной нормой 32 мм нетто (35.6 мм брутто при КПД техники полива 90%). Первый полив назначен на 2 июля в связи с начальным истощением почвенной влаги 56% TAW. Наименьший запас доступной влаги среди трех участков обуславливает наиболее высокую частоту поливов: интервалы между поливами составляют от 5 до 20 суток, наименьшие – в среднюю фазу при максимальных значениях E_{Ts} . Суммарная оросительная норма нетто составила 448.0 мм, брутто – 497.8 мм.

Таблица 6. Режим орошения кукурузы – участок I

Table 6. Maize irrigation regime – plot I

Дата / Date	Фаза / Phase	K_s	E_{Ta} , %	Истощ., % / Exhaust., %	Нетто, мм / Net, mm	Брутто, мм / Gross, mm	Расход, л/с/га / Consumption, l/s/ha
1 июля / July, 1	Нач. / Initial	1.00	100	57	38.0	42.2	4.89
28 июля / July, 28	Разв. / Develop.	1.00	100	55	38.0	42.2	0.18
10 авг. / Aug., 10	Разв. / Develop.	1.00	100	57	38.0	42.2	0.38
20 авг. / Aug., 20	Сред. / Middle	1.00	100	58	38.0	42.2	0.49
29 авг. / Aug., 29	Сред. / Middle	1.00	100	57	38.0	42.2	0.54
8 сент. / Sept., 8	Сред. / Middle	1.00	100	56	38.0	42.2	0.49
19 сент. / Sept., 19	Сред. / Middle	1.00	100	59	38.0	42.2	0.44
30 сент. / Sept., 30	Поздн. / Late	1.00	100	61	38.0	42.2	0.44
Нетто: 304.0 мм Брутто: 337.8 мм Потери: 6.3 мм Эфф. осадки: 143.2 мм КПД техники полива: 90% Эфф. графика орошения: 97.9% <i>Net: 304.0 mm Gross: 337.8 mm Loss: 6.3 mm Eff. precipitation: 143.2 mm </i> <i>Efficiency of watering technique: 90% Eff. irrigation schedule: 97.9%</i>							

Таблица 7. Режим орошения кукурузы – участок II

Table 7. Maize irrigation regime – plot II

Дата / Date	Фаза / Phase	Ks	ETa, %	Истощ., % / Exhaust., %	Нетто, мм / Net, mm	Брутто, мм / Gross, mm	Расход, л/с/га / Consumption, l/s/ha
3 июля / July, 3	Нач. / Initial	1.00	100	55	35.0	38.9	1.50
29 июля / July, 29	Разв. / Develop.	1.00	100	57	35.0	38.9	0.17
10 авг. / Aug., 10	Разв. / Develop.	1.00	100	59	35.0	38.9	0.38
18 авг. / Aug., 18	Разв. / Develop.	1.00	100	58	35.0	38.9	0.56
25 авг. / Aug., 25	Сред. / Middle	1.00	100	59	35.0	38.9	0.64
1 сент. / Sep., 1	Сред. / Middle	1.00	100	62	35.0	38.9	0.64
8 сент. / Sep., 8	Сред. / Middle	1.00	100	62	35.0	38.9	0.64
14 сент. / Sep., 14	Сред. / Middle	1.00	100	56	35.0	38.9	0.75
21 сент. / Sep., 21	Сред. / Middle	1.00	100	57	35.0	38.9	0.64
29 сент. / Sep., 29	Поздн. / Late	1.00	100	62	35.0	38.9	0.56
9 окт. / Oct., 9	Поздн. / Late	1.00	100	68	35.0	38.9	0.45
Нетто: 385.0 мм Брутто: 427.8 мм Потери: 1.2 мм Эфф. осадки: 143.2 мм КПД техники полива: 90% Эфф. графика орошения: 99.7% <i>Net: 385.0 mm Gross: 427.8 mm Loss: 1.2 mm Eff. Rainfall: 143.2 mm </i> <i>Efficiency of irrigation technique: 90% Eff. irrigation schedule: 99.7%</i>							

Таблица 8. Режим орошения кукурузы – участок III

Table 8. Maize irrigation regime – plot III

Дата / Date	Фаза / Phase	Ks	ETa, %	Истощ., % / Exhaust., %	Нетто, мм / Net, mm	Брутто, мм / Gross, mm	Расход, л/с/га / Consumption, l/s/ha
2 июля / July, 2	Нач. / Initial	1.00	100	56	32.0	35.6	2.06
22 июля / July, 22	Разв. / Develop.	1.00	100	55	32.0	35.6	0.21
1 авг. / Aug., 1	Разв. / Develop.	1.00	100	57	32.0	35.6	0.41
10 авг. / Aug., 10	Разв. / Develop.	1.00	100	62	32.0	35.6	0.46
16 авг. / Aug., 16	Разв. / Develop.	1.00	100	58	32.0	35.6	0.69
21 авг. / Aug., 21	Сред. / Middle	1.00	100	55	32.0	35.6	0.82
28 авг. / Aug., 28	Сред. / Middle	1.00	100	65	32.0	35.6	0.59
2 сент. / Sept., 2	Сред. / Middle	1.00	100	58	32.0	35.6	0.82
8 сент. / Sept., 8	Сред. / Middle	1.00	100	61	32.0	35.6	0.69
14 сент. / Sept., 14	Сред. / Middle	1.00	100	60	32.0	35.6	0.69
20 сент. / Sept. 20	Сред. / Middle	1.00	100	60	32.0	35.6	0.69
26 сент. / Sept. 26	Сред. / Middle	1.00	100	59	32.0	35.6	0.69
2 окт. / Oct., 2	Поздн. / Middle	1.00	100	62	32.0	35.6	0.69
11 окт. / Oct., 11	Поздн. / Middle	1.00	100	68	32.0	35.6	0.46
Нетто: 448.0 мм Брутто: 497.8 мм Потери: 64.6 мм Эфф. осадки: 107.2 мм КПД техники полива: 90% Эфф. графика орошения: 85.6% <i>Net: 448.0 mm Gross: 497.8 mm Loss: 64.6 mm Eff. Precipitation: 107.2 mm </i> <i>Efficiency of irrigation technique: 90% Eff. irrigation schedule: 85.6%</i>							

Потери при орошении составили 64.6 мм, что обусловлено превышением интенсивности подачи воды над скоростью впитывания почвы, приводящим к потерям на глубокий дренаж ниже корнеобитаемого слоя. Фактические эффективные осадки составили 107.2 мм при суммарных осадках 143.2 мм; потери осадков на поверхностный сток – 36.0 мм. Эффективность графика орошения составила 85.6% – наименьшее значение среди трех участков, что отражает наибольшее относительные потери воды на данном типе почвы. Дефицит влаги в почве к моменту уборки составил 17.5 мм. Снижения урожайности

не прогнозируется: коэффициент водного стресса $K_s = 1.00$ на протяжении всего вегетационного периода.

3. Сравнительный анализ

Идентичность водопотребления ET_c (434.8 мм) и теоретической потребности по CWR (312.0 мм) для всех трех участков подтверждает фундаментальное свойство модели CROPWAT: тип почвы не влияет на расчет водопотребления культуры – только на формирование графика поливов через параметры TAW, фильтрации и глубины корней.

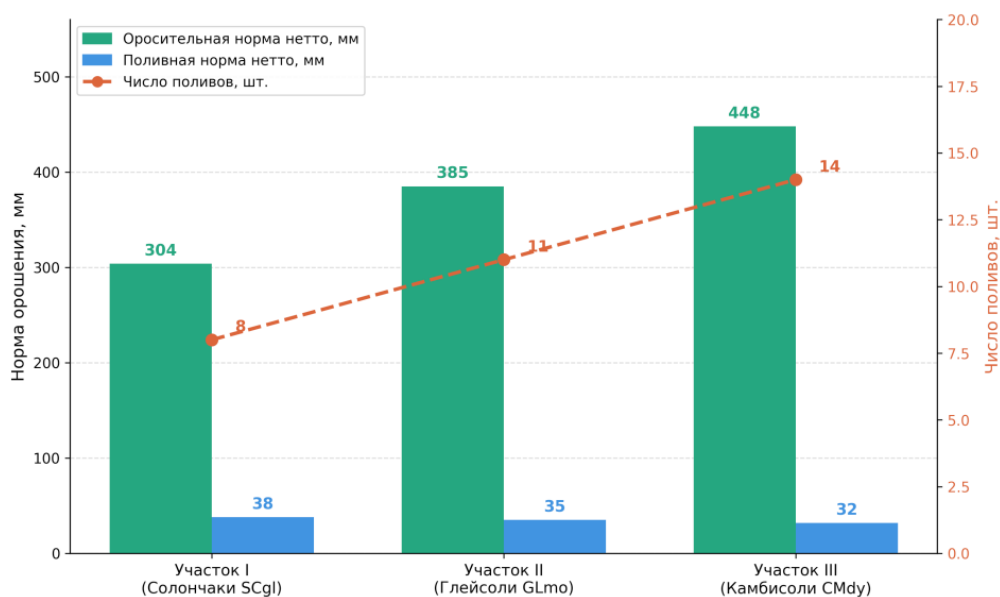


Рис. Оросительная норма нетто, мм, поливная норма нетто, мм, и число поливов, шт., для трех типов почв агроклиматического региона Имбо Республики Бурунди

Fig. Net irrigation rate (mm), net watering rate (mm) and number of waterings (pcs) for three soil types of the Imbo agro-climatic region of the Republic of Burundi

Различия в оросительных нормах грунто между участками (от 337.8 мм для участка I до 497.8 мм для участка III) определяются в данной методике главным образом величиной TAW. Участок III (Камбисоли) демонстрирует наибольшую грунто-норму вследствие низкого TAW (80 мм/м), что приводит к малому запасу доступной влаги (48 мм), и как следствие – к высокой частоте поливов и значительным суммарным потерям (64.6 мм). Участок II (Глейсоли) характеризуется наиболее высокой эффективностью графика орошения (99.7%) благодаря минимальным инфильтрационным потерям при высоком TAW (120 мм/м). Следует отметить, что оросительная норма грунто в реальных условиях определяется также техникой полива и уклонами поверхности поля, которые в модели CROP-WAT не учитываются.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения модели CROP-WAT 8.0 для дифференцированного расчета режима орошения при различных почвенных условиях. Вместе с тем модель не учитывает эффект капиллярного подпитывания из грунтовых вод, что в условиях мелкого их залегания на участке I (Солончаки) может приводить к завышению расчетных оросительных норм. Существенное влияние TAW и глубины корнеобитаемого слоя на формируемый режим орошения обосновывает необходимость детального почвенного обследования при проектировании ирригационных систем в агроклиматическом районе Имбо.

4. Практические рекомендации

На основе проведенных исследований сформулированы следующие практические рекомендации по оптимизации режима орошения кукурузы в условиях агроклиматического района Имбо.

1. Для участков с почвами типа Солончаки (участок I): применение режима 8 поливов с нормой 38 мм нетто обеспечивает эффективность графика орошения 97.9% и полное удовлетворение водных потребностей без водного стресса. Рекомендуется использование дождевания или капельного орошения для равномерного распределения поливной нормы; необходим регулярный контроль солеобменных процессов. При данной оросительной норме целесообразно рассмотреть переход на более частые поливы с меньшей поливной нормой, что позволит предотвратить подъем уровня солончатых грунтовых вод.

2. Для участков с почвами типа Глейсоли (участок II): режим 11 поливов с нормой 35 мм нетто обеспечивает эффективность графика орошения 99.7%. Рекомендуется применение бороздкового орошения или дождевания с малой интенсивностью подачи воды для предотвращения поверхностного стока при поливе, что особенно актуально при относительно больших уклонах поверхности поля на трансальлювиальной фации.

3. Для участков с почвами типа Камбисоли (участок III): режим 14 поливов с нормой 32 мм нетто является вынужденным – при низком TAW (80 мм/м) и глубине корнеобитаемого

слоя 60 см более редкие поливы невозможны без возникновения водного стресса культуры. При выборе способа орошения и проектировании оросительной сети необходимо принять меры по минимизации потерь воды (64.6 мм) на испарение, поверхностный и подземный сток.

4. Сроки посева: планирование вегетационного периода с 1 июля по 28 октября обеспечивает совпадение максимального водопотребления (средняя фаза, август-сентябрь) с наиболее жарким периодом при надежном обеспечении орошением.

5. Мониторинг агро- и метеопараметров, влажности почвы: установка датчиков влажности на глубине 20-40 см позволит корректировать расчетный режим орошения с учетом фактических условий увлажнения.

Выводы

Расчет потребности в воде кукурузы и режима орошения методом FAO CROPWAT 8.0 выполнен для трех расчетных участков с различными типами почв (Солончаки, Глейсоли, Камбисоли) в агроклиматическом районе Имбо Республики Бурунди.

1. Суммарное водопотребление кукурузы ET_c за вегетационный период (01.07-28.10, 120 сут.) составило 434.8 мм; эффективные осадки – 127.2 мм (29.2%); теоретическая потребность в орошении (потребность культуры в воде, CWR) – 312.0 мм. Данные значения одинаковы для всех трех участков и определяются климатическими данными и параметрами культуры.

2. Режимы орошения существенно дифференцированы по типам почв:

участок I (Солончаки, продуктивные влагозапасы TAW = 120 мм/м) – 8 поливов нормой 38 мм нетто, брутто 337.8 мм, эффективность графика орошения – 97.9%; участок II (Глейсоли, TAW = 120 мм/м) – 11 поливов нормой 35 мм нетто, брутто 427.8 мм, эффективность графика орошения – 99.7%; участок III (Камбисоли, TAW = 80 мм/м) – 14 поливов нормой 32 мм нетто, брутто 497.8 мм, эффективность графика орошения – 85.6%.

3. Наибольшая брутто-норма на участке III (Камбисоли, 497.8 мм) обусловлена сочетанием низкого TAW (80 мм/м) и малой глубины корнеобитаемого слоя (60 см), что приводит к высокой частоте поливов и значительным потерям воды (64.6 мм). Наиболее высокая эффективность графика орошения достигается на участке II (Глейсоли) (99.7%) вследствие минимальных инфильтрационных потерь.

4. Полученные результаты подтверждают необходимость дифференцированного подхода к проектированию систем орошения в агроклиматическом районе Имбо с учетом гидрофизических свойств конкретных типов почв и контроля метеопараметров. Методология FAO CROPWAT 8.0 обеспечивает надежный расчетный инструмент при условии корректной параметризации почвенных характеристик, однако имеет ряд ограничений: не учитывается водообмен между корнеобитаемым слоем и подстилающими горизонтами, что исключает возможность учета капиллярного подпитывания при неглубоком залегании грунтовых вод; расчет сроков и норм поливов выполняется по ретроспективным климатическим данным без учета прогноза осадков.

Список использованных источников

1. Gilbert N., Ivanovich S.A. Maize cropping system among small farmers in the agroecological zone in central Burundi and its advantages // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. 2021. № 174. С. 70-78
2. FAO. Analyse des incitations par les prix pour le maïs au Burundi, par Ndikumana R. et al. Série de notes techniques, SAPAA. Rome: FAO, 2016
3. Manasa P., Maitra S., Reddy M.D. Effect of Summer Maize-Legume ICS on Growth, Productivity and Competitive Ability of Crops // Int J Manage Technol Engg. 2018. Vol. 8(12). Pp. 2871-2875
4. George B., Shende S., Raghuwanshi N. Development and testing of an irrigation scheduling model // Agricultural Water Management. 2000. Vol. 46 (2). Pp. 121-136
5. Bhat S.A., Pandit B.A., Khan J.N. et al. Water Requirements and Irrigation Scheduling of Maize Crop using CROPWAT Model // International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 2017. Vol. 6 (11). Pp. 1-9.
6. Mondo J.M., Chuma G.B., Matiti H.M. et al. Crop calendar optimization for climate change adaptation in yam farming in South-Kivu, eastern DR Congo // PLoS ONE. 2024. Vol. 19 (9). e0309775

References

1. Gilbert N., Ivanovich S.A. Maize cropping system among small farmers in the agroecological zone in central Burundi and its advantages // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. 2021. № 174. С. 70-78.
2. FAO. Analyse des incitations par les prix pour le maïs au Burundi, par Ndikumana R. et al. Série de notes techniques, SAPAA. Rome: FAO, 2016.
3. Manasa P., Maitra S., Reddy M.D. Effect of Summer Maize-Legume ICS on Growth, Productivity and Competitive Ability of Crops // Int J Manage Technol Engg. 2018. Vol. 8(12). P. 2871-2875.
4. George B., Shende S., Raghuwanshi N. Development and testing of an irrigation scheduling model // Agricultural Water Management. 2000. Vol. 46(2). P. 121-136.
5. Bhat S.A., Pandit B.A., Khan J.N. et al. Water Requirements and Irrigation Scheduling of Maize Crop using CROPWAT Model // International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 2017. Vol. 6(11). P. 1-9.
6. Mondo J.M., Chuma G.B., Matiti H.M. et al. Crop calendar optimization for climate change adaptation in yam farming in South-Kivu, eastern DR Congo // PLoS ONE. – 2024. Vol. 19(9). – e0309775.

7. FAO. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper. Rome: FAO, 1998. № 56. 300 p.

8. FAO. CROPWAT 8.0 Software. Food and Agriculture Organization, Land and Water Division. Rome: FAO, 2009. URL: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

9. Ичитегетсе И., Максимов С.А. Текущее состояние и перспективы развития орошаемого земледелия в Республике Бурунди // Природообустройство. 2025. № 5. С. 39-46. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-5-39-46

10. Шабанов В.В., Нийонзима Н. Возможное изменение климата и сельское хозяйство Республики Бурунди. Деп. в ВИНТИ. от 20 июля 2012 г. № 313-B2012. 64 с.

11. Шабанов В.В., Нийонзима Н. Оценка изменения факторов внешней среды в бассейне реки Русизи на территории Республики Бурунди // Природообустройство. 2012. № 3. С. 30-35

12. Костяков А.Н. Основы мелиорации. М.: Сельхозиздат, 1960.

13. FAO. Irrigation in Africa in Figures. AQUASTAT Survey-2005. FAO Water Reports 29. Rome: FAO, 2005. 74 p.

14. Megerle H.E., Niragira S. The Challenge of Food Security and the Water-Energy-Food Nexus: Burundi Case Study // World Review of Nutrition and Dietetics. Karger AG, 2020. Vol. 121. Pp. 183-192

15. Нийонзима Н. Биоклиматическое обоснование необходимости орошения и осушения земель бассейна реки Русизи (Республика Бурунди): Дис. ... канд. техн. наук. М., 2013

16. Gabr M.E.S. Management of irrigation requirements using FAO-CROPWAT 8.0 model: A case study of Egypt // Modeling Earth Systems and Environment. 2022. Vol. 8 (3). Pp. 3127-3142

17. Yetik A.K., Şen B. Evaluation of the impacts of climate change on irrigation requirements of maize by CROPWAT Model // Gesunde Pflanzen. 2023. Vol. 75 (4). Pp. 1297-1305

18. Roja M., Deepthi C., Devender Reddy M. Estimation of crop water requirement of maize crop using FAO CROPWAT 8.0 model // Indian J Pure Appl Biosci. 2020. Vol. 8. Pp. 222-228

7. FAO. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper, No. 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.

8. FAO. CROPWAT 8.0 Software. Food and Agriculture Organization, Land and Water Division. – Rome: FAO, 2009. URL: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

9. Icitetse I., Maksimov S.A. Current state and prospects for the development of irrigated agriculture in the Republic of Burundi. 2025. – № 5. P. 39-46. // Prirodoobustrojstvo. 2025. – № 5. P. 39-46. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-5-39-46.

10. Shabanov V.V., Niyonzima N. Possible climate change and agriculture in the Republic of Burundi. Dep. in VINITI. No 313-B2012 of 20.07.2012. – 64 p..

11. Shabanov V.V., Niyonzima N. Assessment of changes in the factors of the external environment in the basin of the Rusizi River in the territory of the Republic of Burundi // Prirodoobustrojstvo. 2012. № 3. P. 30-35.

12. Kostyakov A.N. Foundations of land reclamation. M.: Selkhozizdat, 1960.

13. FAO. Irrigation in Africa in Figures. AQUASTAT Survey – 2005. FAO Water Reports 29. – Rome: FAO, 2005. 74 p.

14. Megerle H.E., Niragira S. The Challenge of Food Security and the Water-Energy-Food Nexus: Burundi Case Study // World Review of Nutrition and Dietetics. – Karger AG, 2020. Vol. 121. P. 183-192.

15. Niyonzima N. Bioclimatic substantiation of the need for irrigation and drainage of the lands of the Rusizi river basin (Republic of Burundi): diss. ... candidate of technical sciences. Moscow, 2013.

16. Gabr M.E.S. Management of irrigation requirements using FAO-CROPWAT 8.0 model: A case study of Egypt // Modeling Earth Systems and Environment. 2022. – Vol. 8(3). – P. 3127-3142.

17. Yetik A.K., Şen B. Evaluation of the impacts of climate change on irrigation requirements of maize by CROPWAT Model // Gesunde Pflanzen. – 2023. – Vol. 75(4). P. 1297-1305.

18. Roja M., Deepthi C., Devender Reddy M. Estimation of crop water requirement of maize crop using FAO CROPWAT 8.0 model // Indian J Pure Appl Biosci. 2020. Vol. 8. P. 222-228.

Информация об авторе

Ичитегетсе Инносент, 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 author

Icitetse Innocent, 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

Поступила в редакцию / Received 08.04.2026

Поступила после рецензирования / Received 04.06.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 16.06.2026

Оригинальная статья

УДК 631.67:628.358

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-72-79>

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДООЧИЩЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД МОЛОКОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ЗАВОДОВ НА ОРОШЕНИЕ

Т.И. Дрововозова^{1✉}, С.А. Марьяш², М.В. Власов³, Д.В. Мильченкова⁴, Н.Н. Красовская⁵

^{1,2,3,4,5} Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»; г. Новочеркасск, Российская Федерация

¹ tid70.drovovozova@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-8724-7799

² smar-78@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5561-9714

³ m_vlasov@bk.ru, ORCID: 0000-0002-9103-1958

⁴ milchenkova.darya@mail.ru, ORCID: 0009-0001-7665-1366

⁵ panya-86@mail.ru ORCID: 0000-0003-4426-7762

Аннотация. Цель работы – изучить химический состав сточных вод молокоперерабатывающего завода, расположенного в сельской местности, выполнить их эколого-мелиоративную оценку и разработать технологическую схему очистки стока, обеспечивающую возможность его применения на орошение. Особенностью химического состава сточных вод вышеуказанного предприятия являются высокие значения БПК, ХПК, содержания жиров, взвешенных веществ, ионов натрия, хлоридов, поскольку в производстве сыров предусмотрено использование рассолов. На действующих предприятиях для очистки сточных вод применяются жирословители, сооружаются биологические пруды, в которых в результате поступления минерализованных сточных вод развиваются пурпурные бактерии, окрашивающие поверхность водоема в характерный красно-розовый цвет. Применение таких вод для орошения приведет к натриевому осолонцеванию, хлоридному засолению почв и содообразованию. Оценка сточных вод после такой биологической очистки по ирригационному коэффициенту Стеблера ($K_a = 2,37$) показала их неудовлетворительное качество. Разработана технология очистки сточных вод на молокоперерабатывающем заводе, рекомендовано размещение очистного оборудования в блок-контейнере на территории предприятия. Представлена общая принципиальная схема подачи очищенных сточных вод в оросительную систему, указаны конструктивные особенности водовыпускного сооружения и канала-усреднителя.

Ключевые слова: сточные воды, молокоперерабатывающий завод, очистка, оросительная система, канал-усреднитель, пруд-накопитель

Формат цитирования: Дрововозова Т.И., Марьяш С.А., Власов М.В., Мильченкова Д.В., Красовская Н.Н. Возможности применения доочищенных сточных вод молокоперерабатывающих заводов на орошение. Природообустройство. 2026;Т.19(3):72-79. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-72-79>

Scientific article

POSSIBILITIES FOR USING TREATED WASTEWATER FROM DAIRY PROCESSING PLANTS FOR IRRIGATION

T.I. Drovovozova^{1✉}, S.A. Maryash², Vlasov M.V.³, D.V. Milchenkova⁴, N.N.⁵

^{1,2,3,4,5} Federal State Budgetary Scientific Institution «Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems»; Novocherkassk, Russian Federation

¹ tid70.drovovozova@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-8724-7799

² smar-78@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5561-9714

³ m_vlasov@bk.ru, ORCID: 0000-0002-9103-1958

⁴ milchenkova.darya@mail.ru, ORCID: 0009-0001-7665-1366

⁵ panya-86@mail.ru ORCID: 0000-0003-4426-7762

Abstract. The purpose of the work is to study the chemical composition of wastewater from a dairy processing plant located in rural areas, conduct an environmental and reclamation assessment of it and develop a technological scheme for wastewater treatment that makes it possible to use it for irrigation. A special feature of the chemical composition of wastewater from the above-mentioned enterprise is the high values of BOC, ChOC, fat content, suspended solids, sodium ions and chlorides, since the use of brines is provided for in cheese production. At existing enterprises for wastewater treatment grease traps are used, biological ponds are being built, in which, as a result of the intake of mineralized wastewater, purple bacteria

are developing, staining the surface of the reservoir in a characteristic red-pink color. The use of such waters for irrigation will lead to sodium ions, chloride ions of soils and soda formation. The assessment of wastewater after such biological treatment by the Stebler irrigation coefficient ($K_a = 2,37$) showed its unsatisfactory quality. A wastewater treatment technology has been developed at a milk processing plant, and it is recommended to place the treatment equipment in a block container on the territory of the enterprise. The general schematic diagram of the treated wastewater supply to the irrigation system, the design features of the water outlet and the averaging channel are presented.

Keywords: wastewater, milk processing plant, purification, irrigation system, averaging channel, storage pond

Format of citation: Drovovozova T.I., Maryash S.A., Vlasov M.V., Milchenkova D.V., Krasovskaya N.N. Possibilities for using treated wastewater from dairy processing plants for irrigation. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):72-79. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-72-79>

Введение. В настоящее время имеется большой опыт применения хозяйственно-бытовых сточных вод и стоков животноводческих комплексов при орошении сельскохозяйственных земель [1-5]. Доказан экологический и экономический эффект от их применения, особенно в регионах, испытывающих дефицит водных ресурсов [4-9]. Обязательным условием применения таких вод при орошении является их санитарно-эпидемиологическая и токсикологическая безопасность [10]. Однако существует не менее важная проблема в сельскохозяйственном производстве – это использование сточных вод от перерабатывающих сельскохозяйственную продукцию предприятий – в частности, предприятий, производящих сыро-молочную продукцию. Как правило, такие предприятия территориально расположены в сельской местности, ближе к сырьевой базе. При этом сельские населенные пункты, в которых они находятся, в большинстве своем не имеют централизованную канализацию. Следовательно, образующийся неочищенный производственный сток собирается в пруды-накопители, и возникает проблема их дальнейшей утилизации. Решением данной проблемы могло бы стать использование этих вод на орошение земель, однако при этом необходимо обратить внимание на химический состав стоков и степень их очистки.

Неочищенный производственный сток с молокоперерабатывающих и сыродельных предприятий характеризуется высоким содержанием жира, белка, взвешенных веществ, колеблющимся рН. Кроме того, поскольку в производстве сырной продукции используются рассолы, производственный сток имеет высокие значения минерализации, концентраций ионов натрия и хлорид-ионов. На большинстве молочных и сыродельных заводов в локальных очистных сооружениях ограничиваются очисткой на жировом, что существенно снижает концентрации жира, белка, взвешенных веществ, нейтрализует

рН среды. Но такие методы очистки не решают проблему снижения минерализации, и прежде всего – содержания хлорид- и натрий-ионов. Минерализованный производственный сток после вышеуказанной очистки отправляется в пруды-накопители, где под действием специфической микрофлоры протекают анаэробные процессы жизнедеятельности микроорганизмов, в результате которых начинается «цветение» водоемов. Соответственно такую воду использовать при орошении опасно.

Цель исследований: изучить химический состав сточных вод молокоперерабатывающего завода, расположенного в сельской местности, выполнить их эколого-мелиоративную оценку и разработать технологическую схему очистки стока, обеспечивающую возможность его применения на орошение.

Материалы и методы исследований. При проведении исследований использовались эмпирические и общелогические методы, основанные на выполнении экспериментов и натурных наблюдений, а также на анализе полученных результатов. Исследования выполнены в аккредитованной лаборатории ФГБНУ «РосНИИПМ» на современном оборудовании, зарегистрированном в Государственной системе обеспечения единства измерений (ГСИ) по аттестованным методикам.

Результаты и их обсуждение. Объектом исследований являлись сточные воды молокоперерабатывающего завода, основным видом деятельности которого является производство сливочного, топленого масла, спредов, а также мягких и полутвердых сыров.

Особенностью химического состава сточных вод завода, производящего вышеуказанную продукцию, являются высокие значения БПК, ХПК, содержания жиров, взвешенных веществ, ионов натрия, хлоридов, поскольку в производстве сыров предусмотрено использование рассолов, которые после кратного применения сбрасываются

во внутризаводскую канализационную систему. Образующиеся на предприятии сточные воды подаются в приемную камеру, представляющую собой колодец, включающий в себя сточные трубы от различных цехов, по которым осуществляется транспортировка и смешение стока (рис. 1).

После приемной камеры сточные воды поступают на жиролоуловитель, предназначенный для удаления из сточной жидкости крупных немультгированных жировых частиц, после чего она подается в усреднитель, где происходит усреднение по объему и составу загрязняющих веществ. После усреднителя сточная жидкость под напором транспортируется по канализационному коллектору и выходит в открытый канализационный канал, по которому поступает на пруды биологической очистки в земляном русле. Существенным недостатком доочистки сточных вод завода на биологических прудах является протекание нежелательных процессов под действием

бактерий, особенно в водах, содержащих высокие концентрации ионов натрия и хлорид-ионов, а также нитрат-ионов. Химический состав воды в различных точках отбора проб представлен в таблице 1.



Рис. 1. Приемная камера

Fig. 1. Reception chamber

Таблица 1. Сводные данные химического анализа проб сточной воды, отобранной в разных точках

Table 1. Summary data of chemical analysis of wastewater samples taken at different points

Показатель / Indicator	Ед. изм. / Unit of measurement	Приемная камера / Reception chamber	Колодец после жиролоуловки / The well after grease trap	Пруд накопитель-усреднитель / Pond storage averager	Пруд осветлитель № 1 / Pond clarifier No. 1	Пруд осветлитель № 2 / Pond clarifier No. 2	ПДК _{хн} / MPC _{had}
рН	Ед. рН / Un. pH	10,8	6,3	7,5	8,0	8,1	6-9
Взвеш. вещества / Suspended solids	мг/дм ³ / mg / l	334	555	960	1190	170	1,5
БПК ₅ / BOC ₅	мгО ₂ /дм ³ / mgO ₂ /l	1109	1094	232	95,5	24	2
БПК _{полн} / BOC _{full}	мгО ₂ /дм ³ / mgO ₂ /l	1472	1454	307	128	37	3,0
ХПК / ChOC	мгО/дм ³ / mgO/l	2070,02	1990,40	1472,9	1074,82	358,27	15
Азот общий / Total nitrogen	мг/дм ³ / mg / l	47,65	17,50	111,4	139,3	167,2	–
Ионы аммония / Ammonium ions	мг/дм ³ / mg / l	1,99	17,1	63	46,8	76	1,5
АСПАВ / ASPAV	мг/дм ³ / mg / l	1,6	2,5	3,8	1,7	0,31	0,5
Гидрокарбонаты / Hydrogen carbonates	мг/дм ³ / mg / l	148,23	204,35	1293	1031	1112	400
Кальций / Calcium	мг/дм ³ / mg / l	55,08	102,20	92,18	84,13	72,11	–
Магний / Magnesium	мг/дм ³ / mg / l	18,85	19,44	34,02	24,32	15,82	50
Жесткость / Water hardness	ммоль/дм ³ / mmoles / l	4,32	6,73	7,44	6,23	4,92	7,0
Калий общий / Total potassium	мг/дм ³ / mg / l	17	23	83	97	49,5	–
Натрий / Sodium	мг/дм ³ / mg / l	228	317	471	509	311	200
Нитрат-ион / Nitrate ion	мг/дм ³ / mg / l	2,56	34,25	0,9	0,26	0,28	45
Сульфаты / Sulfates	мг/дм ³ / mg / l	183,9	212,8	63,63	127,3	55,68	500
Сухой остаток / Dry residue	мг/дм ³ / mg / l	1180	1570	2830	2700	2140	1500
Фосфат-ионы / Phosphates ions	мг/дм ³ / mg / l	7,14	8,3	10,5	10,1	7,92	–
Хлориды / Chlorides	мг/дм ³ / mg / l	351	503	1212	1203	861	350

Внешний вид прудов – накопителя (рис. 2) и осветлителей (рис. 3, 4) – свидетельствует о массовом накоплении и жизнедеятельности грамотрицательных пурпурных бактерий, пигментированных каротиноидами, придающих оттенок от розового до красного, характерных для биопрудов со сточными водами пищевых производств. Цвет воды в первых двух прудах ярко-розовый, причем в пруду-осветлителе № 1 цвет воды наиболее яркий (рис. 3); цвет воды в пруду-осветлителе № 2 менее яркий и более прозрачный (рис. 4).

Вода во всех прудах мутная без тенденции осаждения, имеет отчетливый гнилостный запах. Кислород в воде полностью отсутствует; анаэробные условия являются благоприятной средой для развития грамотрицательных пурпурных бактерий.

Пурпурные бактерии интенсивно развиваются в соленой воде с повышенной минерализацией, что подтверждается результатами химического анализа. Вода, поступающая в пруды из канализационного коллектора, имеет минерализацию 1870 мг/дм³, концентрацию ионов натрия 347 мг/дм³, хлорид-ионов – 588 мг/дм³. В процессе жизнедеятельности пурпурные бактерии поглощают нитрат-ионы, что подтверждается результатами химического анализа; концентрация нитрат-ионов в прудах-осветлителях № 1 и № 2 снижается примерно в 250 раз (с 74,47 мг/дм³ в воде, поступающей из канализационного коллектора в пруды, до 0,26-0,28 мг/дм³ в прудах-осветлителях). Резкое падение концентрации нитрат-ионов в пруду накопителе-усреднителе по сравнению с трубой из канализационного коллектора с 74,47 до 0,9 мг/дм³ свидетельствует о высокой интенсивности размножения пурпурных бактерий в пруду-накопителе, которым в процессе жизнедеятельности начинает не хватать питания, что приводит к частичному их отмиранию. Клетки бактерий, наполненные раствором NaCl, разрушаются при отмирании бактерий, что приводит к его поступлению в водную среду прудов. Поэтому наблюдается резкий скачок минерализации, концентрации ионов натрия и хлорид-анионов в первых двух прудах; затем происходит частичное отстаивание воды, часть отмерших бактерий оседает в третьем пруду, поэтому значения показателей снижаются.

Вышеуказанное свидетельствует о том, что сточные воды с высоким содержанием ионов натрия и хлорид-ионов нельзя направлять для очистки на биологические пруды. Кроме того, такую воду после очистки на биологических прудах нельзя использовать на орошение, поскольку



Рис. 2. Пруд накопитель-усреднитель
Fig. 2. Storage-averaging pond



Рис. 3. Пруд-осветлитель № 1
Fig. 3. Pond clarifier No. 1



Рис. 4. Пруд-осветлитель № 2
Fig. 4. Pond clarifier No. 2

это может привести к засолению и осолонцеванию почв.

Для подтверждения данного высказывания была выполнена оценка пригодности использования сточных вод на орошение после существующего цикла отстаивания на биосооружениях

завода по ирригационному коэффициенту (K_a) Стеблера.

Исходя из условий ионного обмена ($Cl^- > Na^+$) вода после биологического пруда № 2 отнесена к III типу, ирригационный коэффициент K_a составляет 2,37, то есть вода имеет неудовлетворительное качество. Результаты мелиоративной оценки воды из пруда-осветлителя № 2, как финишного этапа биологической очистки, представлены в таблице 2.

Из данных таблицы 2 следует, что использование воды на орошение приведет к натриево-му осолонцеванию, хлоридному засолению почв и содообразованию. Опасность осолонцевания почв по уровню SAR – средняя. Следовательно, использовать воду на орошение после биологической очистки на предприятии без корректировки ее химического состава не допускается.

Для решения вышеуказанной проблемы необходимо разместить на производственной площадке завода сооружение локальной очистки сточных вод, что позволит направлять очищенные воды на орошение.

При компоновке локальных очистных сооружений (ЛОС) завода в усреднителе рекомендуется установить всасывающий оголовок с сетчатым фильтром, предотвращающим попадание масложировых частиц, подачу в него сжатого воздуха (аэрация) для окисления содержащихся в стоке органических веществ. Для контроля показателя pH стока необходимо установить анализатор pH и устройства дозирования реагентов при необходимости корректировки pH. Для отделения взвешенных и высокодисперсных частиц от жидкости и их осаждения необходимо установить электрофлотатор; для сбора шлама, образующегося в нем, устанавливается шламонакопитель, объем которого должен быть пропорционален суточному объему образовавшихся сточных вод. Образовавшийся шлам передается как жидкий отход по договору передачи организации,

имеющей соответствующую лицензию. После электрофлотатора для обеззараживания осветленной воды необходимо предусмотреть установку УФ-ламп. В связи с колебаниями концентраций солеобразующих ионов в стоке необходимо предусмотреть перед УФ-обеззараживанием размещение мембранных фильтров. Для компактного размещения оборудования на территории предприятия рекомендуется выполнить ЛОС в виде блок-контейнера. Общая принципиальная схема очистки производственного стока с молокоперерабатывающего завода представлена на рисунке 5.

Действующие пруды на предприятии должны быть реконструированы таким образом, чтобы в них был предусмотрен противоточный экран. Также необходимо учесть сооружение ограждающих или разделительных дамб, внутренние откосы которых закрепляются их перекрытием в виде сборных железобетонных плит либо укрепляются слоем каменно-щебеночной смеси полосой в 0,5 м выше уровня воды.

Размещение локальных очистных сооружений на территории молокоперерабатывающего завода и реконструкция прудов-накопителей и осветлителей позволят устранить негативное воздействие биологических прудов, эксплуатируемых предприятием, на окружающую среду.

При поступлении очищенного стока с молокоперерабатывающего завода в оросительную систему необходимо иметь в виду, что сток с предприятия образуется круглогодично, а потребность в оросительной воде носит сезонный характер. В таком случае необходимо заложить комплекс сооружений в оросительной системе либо с круглогодичным приемом сточных вод в пруды-накопители и последующим использованием их для орошения только в вегетационный период, либо с круглогодичным приемом и круглогодичным поливом – в зависимости от региона расположения завода и оросительной

Таблица 2. Результаты мелиоративной оценки воды из пруда-осветлителя № 2

Table 2. Results of the reclamation assessment of water from the clarifier pond No. 2

Критерии качества воды / Water quality criteria	Мелиоративные показатели / Reclamation indicators				
	Минерализация / Mineralization	SAR	Хлоридное засоление / Chloride salinization	Магниевое осолонцевание / Magnesium salinization	Содо- образование / Soda formation
Значения мелиоративных показателей / Values of land reclamation indicators	2140	8,53	24,25	0,37	3,58
Характеристика воды / Water characteristics	Опасность засоления высокая / The danger of salinization is high		Очень высокое / Very high	Отсутствует / Absent	Очень высокое / Very high
Класс качества / Quality class	–	–	IV	I	IV

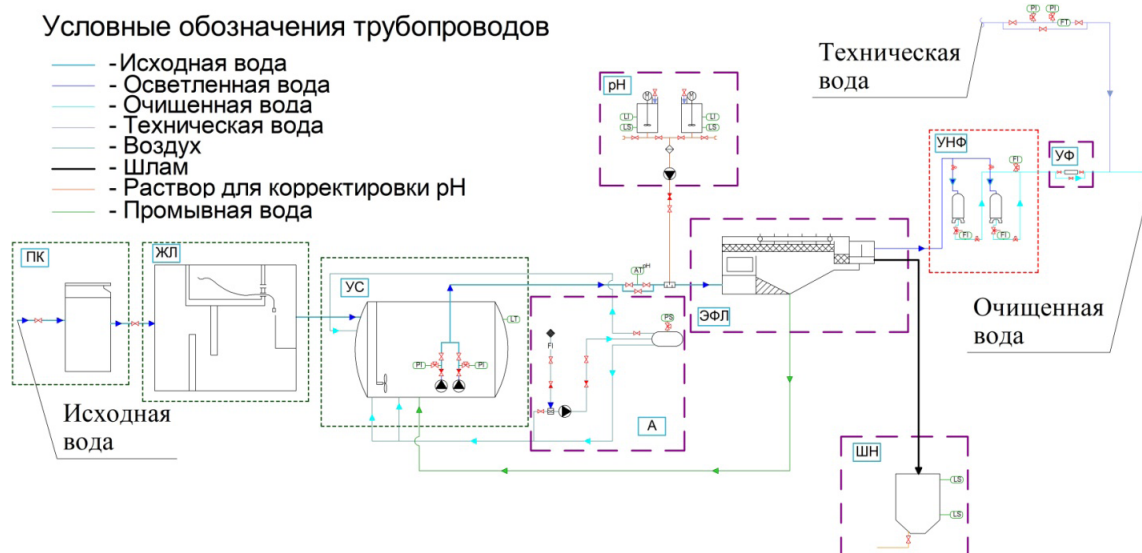


Рис. 5. Общая принципиальная схема разработанной технологии:

ПК – приемный колодец; ЖЛ – жироловка; УС – усреднитель; А – аэратор; ЭФЛ – электрофлотатор; pH – блок корректировки pH; ШН – шламонакопитель; УНФ – установка напорной фильтрации с угольной загрузкой; УФ – блок ультрафиолетового обеззараживания

Fig. 5. General schematic diagram of the developed technology

RW – the receiving well, GT – grease trap, DA – drain averager, A – the aerator, EFD – electric flotation device, pH – the block for correcting pH, SA – sludge accumulator, PFS – pressure filtration system with carbon loading, UV – the ultraviolet disinfection unit

системы. Также возможны частичный, в том числе сезонный, прием и использование сточных вод для орошения.

В вышеуказанных случаях на участке приема подготовленных сточных вод в оросительную систему необходимо разместить пруд-накопитель и канал-усреднитель. Общая принципиальная схема оросительной системы с использованием сточных вод приведена на рисунке 6.

Для приема сточных вод с предприятия в пруд-накопитель необходимо предусмотреть приемное сооружение, представляющее собой незатопленный водовыпуск в виде открытых

быстротоков, каналов, консольных сбросов и оголовков с местом контроля качества поступающего стока (рис. 7). Сооружение затопленного водовыпуска сточных вод в пруды-накопители не допускается.

Глубина наполнения прудов-накопителей сточной водой составляет 2,5-4 м. Объем пруда-накопителя либо его рабочих секций определяют из условия депонирования подготовленных сточных вод в зимнее время года с учетом производительности завода.

В случае необходимости разбавления очищенных сточных вод рекомендуется

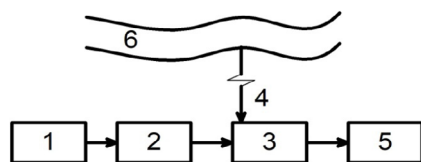


Рис. 6. Общая принципиальная схема подачи сточных вод в оросительную систему:

1 – источник сточных вод; 2 – пруды-накопители; 3 – канал-усреднитель для смешения сточных и природных вод; 4 – трубопровод подачи природных вод; 5 – оросительная система; 6 – водный объект

Fig. 6. General schematic diagram of wastewater supply to the irrigation system:

1 – wastewater source, 2 – storage ponds, 3 – averaging channel for mixing wastewater and natural waters, 4 – natural water supply pipeline, 5 – irrigation system, 6 – water body

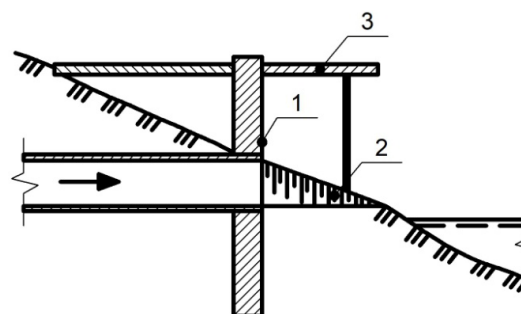


Рис. 7. Схема водовыпускного сооружения сточной воды в пруд-накопитель:

1 – бетонная стена; 2 – лоток; 3 – площадка для отбора проб исходной сточной воды

Fig. 7. Scheme of the wastewater outlet structure into the storage pond:

1 – concrete wall, 2 – tray, 3 – sampling site for the source wastewater

предусмотреть канал-усреднитель для смешения сточной и природной воды из поверхностного водного объекта либо скважины при его отсутствии. Усреднитель представляет собой облицованный бетонным покрытием канал с противοфильтрационным экраном (рис. 8).

Смотровой колодец 3 предназначен для регулирования подачи природной воды на смешение со сточными водами. В случае аварии на канале-усреднителе или в период нефункционирования оросительной системы задвижкой 5 перекрывают подачу природной воды на смешение.

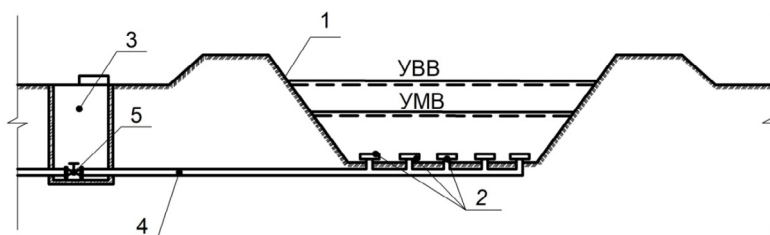


Рис. 8. Схема канала-усреднителя:

1 – тело канала; 2 – оголовок выпуска подготовленной воды на орошение;
3 – смотровой колодец; 4 – трубопровод подачи природной воды; 5 – задвижка

Fig. 8. Scheme of the averaging channel:

1 – channel body; 2 – outlet head of the prepared water for irrigation;
3 – inspection well; 4 – natural water supply pipeline; 5 – valve

Выводы

Сточные воды с действующих молочных и сыродельных заводов, расположенных в сельской местности и не оборудованных локальными очистными сооружениями, использовать на орошение опасно с точки зрения как санитарно-эпидемиологических, так и токсикологических критериев. Разработана эффективная технология доочистки сточных вод молочных и сыродельных заводов, обеспечивающая экологическую безопасность предприятия. Размещение локальных

Длина канала-усреднителя должна быть не меньше расстояния ($l_{\text{полн}}$), на котором происходит полное смешение сточных вод с природной. Длину участка $l_{\text{полн}}$ рассчитывают по формуле:

$$l_{\text{полн}} = \frac{60 \cdot q_{\text{ПСВ}}}{V \cdot H} \cdot \left(\ln \frac{q_{\text{ПСВ}} + \gamma \cdot q_{\text{ПВ}}}{(1 - \gamma) \cdot q_{\text{ПСВ}}} \right)^3, \text{ м}$$

где γ – коэффициент смешения сточных вод с природной водой (принимают от 0,8 до 0,95); $q_{\text{ПСВ}}$ – расход очищенных сточных вод, м³/с; $q_{\text{ПВ}}$ – расход природных вод, применяемых к СВ, м³/с; V – скорость течения смешанной жидкости по каналу, м/с; H – глубина канала-усреднителя, м.

очистных сооружений на территории молочных или сыродельных заводов позволит получать очищенные сточные воды, которые в последующем можно передавать в оросительную систему, в состав головного сооружения которого входят пруды-накопители и канал-усреднитель для смешения сточной и природной воды из поверхностного водного объекта. Предложен расчет длины канала-усреднителя, позволяющий полностью довести воду до качества, отвечающего требованиям к поливной воде.

Список использованных источников

1. Кирейчева Л.В., Максимов С. Оценка возможности использования очищенных сточных вод на орошение в Республике Крым // Экология и промышленность России. 2024. № 28 (2). С. 54-59. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-2-54-59>
2. Кирейчева Л.В., Ткачёва Т.Н. Воздействие орошаемого свиноводческими стоками массива на поверхностные, грунтовые и подземные воды прилегающей территории // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 4. С. 62-78. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-62-78>
3. Давыдов А.С., Тиньгаев А.В., Шепталов В.Б. Опыт применения сточных вод для орошения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2008. № 12 (50). С. 43-45
4. Захарова О.А. Улучшение водно-физических и агрохимических свойств почвы в условиях циклического орошения сточными водами // Научные технологии в мелиорации (Костяковские чтения): Материалы Международной конференции. М.: Изд-во ВНИИА, 2005. С. 94-100

References

1. Kireicheva L.V., Maksimov S. Assessment of the possibility of using treated wastewater for irrigation in the Republic of Crimea. Ecology and industry of Russia. 2024. No. 28(2). P. 54-59. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-2-54-59>
2. Kireicheva L.V., Tkacheva T.N. The impact of irrigated pig runoff massif on surface, groundwater and groundwater of the adjacent territory // Land reclamation and hydraulic engineering. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 62-78. URL: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-62-78>
3. Davydov A.C., Tingaev A.B., Sheptalov B.B. Experience of wastewater application for irrigation // Bulletin of the Altai State Agrarian University, No. 12 (50), 2008. P. 43-45.
4. Zakharova O.A. Improvement of water-physical and agrochemical properties of soil in conditions of cyclic irrigation with wastewater / Science-intensive technologies in land reclamation. (Kostyakov readings) Proceedings of the International Conference. Moscow: All-RRIA Publishing House, 2005. P. 94-100.

5. Круглов Ю.В. Микробное сообщество почвы: физиологическое разнообразие и методы исследования // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51. С. 46-59

6. Ларионова А.М. Особенности полива сточными водами // Наукоемкие технологии в мелиорации (Костяковские чтения): Материалы Международной конференции. М.: Изд-во ВНИИА, 2005. С. 127-130

7. Мусийчук Н.С., Шмаков В.И. Мелиоративное состояние земель при орошении сточными водами животноводческих комплексов и пути улучшения экологической обстановки / ФГОУ ВПО Омский государственный аграрный университет. <http://www.allbest.ru>

8. Шишкина О.С. Влияние орошения сточными водами на мелиоративное состояние территории // Мелиорация. 2004. С. 12-13

9. Дрововозова Т.И., Манжина С.А., Красовская Н.Н., Власов М.В. К вопросу о целесообразности использования очищенных сточных вод в орошаемом земледелии // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 93, № 2. С. 57-68

10. ГОСТ Р ИСО 16075-1 (ИСО 16075-1:2020). Руководящие указания по использованию очищенных сточных вод для оросительных систем. Часть 1. Основные положения проекта по повторному использованию воды для орошения: введ. 2024-07-01. Доступ из справ. системы «Техэксперт»

Об авторах

Татьяна Ильинична Дрововозова, д-р техн. наук, доцент; ведущий научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-8724-7799, РИНЦ AuthorID: 314686, tid70.drovovozova@yandex.ru

Сергей Александрович Марьяш, научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-5561-9714, РИНЦ AuthorID: 1051810, smar-78@mail.ru

Михаил Вячеславович Власов, канд. физико-математ. наук; ведущий научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-9103-1958, РИНЦ AuthorID: 63242; m_vlasov@bk.ru

Дарья Вячеславовна Мильченкова, научный сотрудник; ORCID: 0009-0001-7665-1366, РИНЦ AuthorID: 1062539, milchenkova.darya@mail.ru

Наталья Николаевна Красовская, канд. техн. наук, научный сотрудник, ORCID: 0000-0003-4426-7762, РИНЦ AuthorID: 1094614, panya-86@mail.ru

Вклад авторов

Т.И. Дрововозова – формулирование целей и задач исследований, натурные обследования прудов, формулирование выводов, подготовка текста статьи, доработка окончательной версии статьи и ее редактирование

С.А. Марьяш – исследования в производственных условиях, разработка технологической схемы доочистки сточных вод, подготовка текста статьи

М.В. Власов – разработка и расчет канала-усреднителя, подготовка текста статьи

Д.В. Мильченкова – исследования в производственных условиях, разработка технологической схемы доочистки сточных вод, подготовка текста статьи

Н.Н. Красовская – систематизация и анализ источников литературы, подготовка текста статьи

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare that there are no conflicts of interests

Поступила в редакцию / Received 15.07.2025

Одобрена после рецензирования / Approved 03.06.2026

Принята к публикации / Accepted 15.06.2026

5. Kruglov Yu.V. Microbial community of soil: physiological diversity and research methods / Agricultural Biology, 2016. Vol. 51. P. 46-59

6. Larionova A.M. Features of wastewater irrigation / Science-intensive technologies in land reclamation. (Kostyakov readings) Proceedings of the International Conference. Moscow: All-RRIA Publishing House, 2005. P. 127-130.

7. Musiychuk N.S., Shmakov V.I. Land reclamation status during wastewater irrigation of livestock complexes and ways to improve the environmental situation / Omsk State Agrarian University <http://www.allbest.ru>

8. Shishkina O.S. The effect of wastewater irrigation on the reclamation condition of the territory // Land reclamation. 2004. P. 12-13.

9. Drovovozova S.A., Manzhina N.N., Krasovskaya M.V., Vlasov. On the question of the expediency of using treated wastewater in irrigated agriculture. T. I. // Ways to increase the efficiency of irrigated agriculture. 2024. Vol. 93, No. 2. P. 57-68.

10. NS ISO 16075-1 (ISO 16075-1:2020) Guidelines for the use of treated wastewater for irrigation systems. Part 1. The main provisions of the project on the reuse of water for irrigation. Introduction. 2024-07-01. Access from the help. Techexpert systems.

Information about the authors

Tatiana I. Drovovozova, DSc (Eng), leading researcher, ORCID: 0000-0002-8724-7799, RSCI AuthorID: 314686, e-mail: tid70.drovovozova@yandex.ru

Sergey A.I. Maryash, researcher, ORCID: 0000-0001-5561-9714, RSCI AuthorID: 1051810, e-mail: smar-78@mail.ru

Mikhail V. Vlasov, CSs (Phys-math); leading researcher, ORCID: 0000-0002-9103-1958, RSCI AuthorID: 632423 e-mail: m_vlasov@bk.ru

Darya V.Milchenkova, researcher; ORCID: 0009-0001-7665-1366, РИНЦ AuthorID: 1062539, milchenkova.darya@mail.ru

Natalia N. Krasovskaya, CSs (Tech), leading researcher, ORCID: 0000-0003-4426-7762, RSCI AuthorID: 1094614, panya-86@mail.ru

Contribution of the authors

T.I. Drovovozova – formulation of research goals and objectives, field surveys of ponds, formulation of conclusions, preparation of the text of the article, revision of the final version of the article and editing

S.A. Maryash – research in production conditions, development of a technological scheme for wastewater treatment, preparation of the text of the article

M.V. Vlasov – development and calculation of the averaging channel, preparation of the text of the article

D.V. Milchenkova – research in production conditions, development of a technological scheme for wastewater treatment, preparation of the text of the article

N.N. Krasovskaya – systematization and analysis of literature sources, preparation of the text of the article

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 627.8:004.8:62-1:005.334

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-80-84>ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
В ГИДРОТЕХНИКЕВ.А. Фартуков¹, Г.М. Васильев²✉¹ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; Москва, Российская Федерация²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Москва, Российская Федерация¹vasfar@mail.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757²gervas1453@gmail.com

Аннотация. Цель работы: систематизировать методологические и философские проблемы внедрения ИИ в гидротехнике и предложить концептуальные рамки для его ответственного внедрения, обеспечивающие не только технологическую эффективность, но и социальную легитимность, инженерную безопасность и экологическую устойчивость. Внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в область гидротехники открывает новые возможности для повышения эффективности управления водными ресурсами, мониторинга состояния гидротехнических сооружений (ГТС) и прогнозирования опасных процессов. Данный процесс сопровождается комплексом методологических, нормативных и этических проблем. В статье исследуются ключевые вызовы, связанные с эпистемологическими ограничениями моделей ИИ, онтологическим статусом цифровых двойников, перераспределением ответственности, вопросами киберустойчивости и социально-экологической справедливости. На примере задач управления паводками, диагностики кавитации гидроагрегатов и мониторинга фильтрации обосновывается необходимость интеграции ИИ не в качестве замены инженерного суждения, а как инструмента, встроенного в систему профессиональных процедур и общественного контроля. В качестве концептуальной основы предлагаются принципы технологической скромности, включающие в себя прозрачный аудит моделей, управление их жизненным циклом и четкое распределение ролей в процессе принятия решений, что позволяет использовать потенциал ИИ, не нарушая принципов безопасности и справедливости.

Исследование выполнено в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

Ключевые слова: искусственный интеллект, гидротехнические сооружения, цифровой двойник, управление рисками, ответственность, киберустойчивость, инженерная этика, эпистемология, социально-экологическая справедливость, природообустройство

Для цитирования: Фартуков В.А., Васильев Г.М. Проблемы внедрения искусственного интеллекта в гидротехнике. Природообустройство. 2026;Т.19(3):80-84. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-80-84>

Scientific article

PROBLEMS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IMPLEMENTATION
IN YDRAULIC ENGINEERINGV.A. Fartukov¹ G.M. Vasiliev²✉¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; Moscow, Russian Federation²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation¹vasfar@mail.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757²gervas1453@gmail.com

Abstract. The aim of the work is to systematize the philosophical and methodological problems of the introduction of AI in hydraulic engineering and to propose a conceptual framework for its responsible implementation, ensuring not only technological efficiency, but also social legitimacy, engineering safety

and environmental sustainability. The implementation of artificial intelligence (AI) technologies in the field of hydraulic engineering opens up new opportunities for improving the efficiency of water resources management, monitoring the condition of hydraulic structures (HS), and forecasting hazardous processes. However, this process is accompanied by a complex of methodological, regulatory, and ethical problems. The aim of the research is to systematize the key philosophical and methodological challenges related to the epistemological limitations of AI models, the ontological status of digital twins, the redistribution of responsibility, issues of cyber resilience, and socio-ecological justice. The methodology is based on an interdisciplinary literature analysis and case studies of typical tasks (flood management, cavitation diagnostics, filtration monitoring). As a result, the necessity of integrating AI not as a replacement for engineering judgment, but as a tool embedded in a system of professional procedures and public control is substantiated. As a conceptual framework, the principles of technological humility are proposed, including transparent model audit, lifecycle management, and clear role distribution. It is concluded that successful implementation requires a paradigm shift from searching for the “most accurate algorithm” to building robust socio-technical systems that ensure not only technological efficiency but also social legitimacy, engineering safety, and environmental sustainability.

Keywords: artificial intelligence, hydraulic structures, digital twin, risk management, responsibility, cyber resilience, engineering ethics, epistemology, socio-ecological justice, environmental engineering

For citation: Fartukov V.A., Vasiliev G.M. Problems of introducing artificial intelligence into hydraulic engineering. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):80-84. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-80-84>

Введение. Современная гидротехника характеризуется растущей сложностью управляемых систем, к которым относятся каскады водохранилищ, противопаводковые комплексы и системы водоподачи [1, 2]. Традиционные методы моделирования и управления зачастую не справляются с учетом многомерности, нелинейности и стохастичности гидрологических процессов [3]. Технологии искусственного интеллекта (ИИ) – в частности, машинное обучение и цифровые двойники, предлагают потенциал для более точного прогнозирования, оптимизации режимов эксплуатации и предиктивного технического обслуживания ГТС [4, 5]. Однако парадигма «Данные – решение», лежащая в основе ИИ, вступает в противоречие с консервативной и безопасной инженерной практикой, где решения должны быть обоснованы, проверяемы, а также апеллировать к установленным физическим принципам [6, 7]. Это порождает ряд методологических проблем на стыке технологий, общества и инженерии.

Центральный тезис данной статьи заключается в том, что успешное внедрение ИИ в гидротехнике требует принципиальной смены акцента: с поиска «самого точного алгоритма» на построение устойчивых (robust) социотехнических систем, в которых ИИ выступает как проверяемая гипотеза, а не как окончательная истина [8, 9].

Цель исследований: систематизировать философские и методологические проблемы внедрения ИИ в гидротехнике и предложить концептуальные рамки для его ответственного внедрения, обеспечивающие не только технологическую эффективность, но и социальную

легитимность, инженерную безопасность и экологическую устойчивость [6, 10].

Материалы и методы исследований.

Исследования основаны на междисциплинарном анализе научной литературы. Поиск источников осуществлялся в базах данных Scopus, Web of Science и РИНЦ по ключевым словам «искусственный интеллект в гидротехнике», «цифровой двойник», «управление рисками ИИ», «инженерная этика», «социальная справедливость водных ресурсов» за период 2018-2024 гг. [4, 5, 3, 7, 10]. Были применены следующие методы:

1. Концептуальный анализ для выявления, уточнения и систематизации ключевых проблемных категорий – таких, как «эпистемическое сжатие», «распределенная ответственность», «ценностная нагруженность модели» [6, 8].

2. Метод case-study (анализ случая) для детального рассмотрения и иллюстрации выявленных проблем на типовых сценариях применения ИИ в гидротехнике: управление паводками, диагностика кавитации гидротурбин, мониторинг фильтрации [3, 11].

3. Сравнительный анализ современных подходов к созданию цифровых двойников, систем поддержки принятия решений (СППР) и нормативных рамок в области кибербезопасности и безопасности ГТС [5, 14, 12].

Ограничением исследований является его фокус на методологических и социально-организационных аспектах, а не на деталях конкретных алгоритмов или инженерных решений. Анализ построен на вторичных данных (научные публикации, нормативные документы) и направлен на формирование концептуальной основы для дальнейших прикладных разработок [1, 2].

Результаты и их обсуждение

1. *Эпистемологические ограничения и оптимизация реальности.* Инженерная деятельность в гидротехнике имеет дело не с «вещью-в-себе» (рекой, гидротехническим сооружением), а с их операционализированными моделями [1, 8]. Данные, используемые для обучения ИИ, являются результатом выбора типов датчиков, пространственно-временного разрешения и методов фильтрации шумов [6]. Это приводит к «эпистемическому сжатию»: многомерный, нелинейный и полный неопределенностей гидрологический мир сводится к конечному набору признаков [3, 11].

Основной риск заключается в индуктивном выводе: модель, идеально описывающая данные за прошлые периоды, может оказаться неадекватной при столкновении с беспрецедентными условиями – такими, как экстремальные паводки или новые режимы эксплуатации [4, 7]. Проблема усугубляется сдвигом распределений (dataset shift) и недостатком данных об экстремальных событиях, что требует от инженеров явного учета «толстых хвостов» в распределениях и калибровки запасов прочности с учетом неопределенностей модели [9, 2].

2. *Онтология и ценностная нагруженность цифрового двойника.* Цифровой двойник ГТС часто воспринимается как его точная виртуальная копия [5, 13]. Однако более корректно рассматривать его как программно-математический артефакт с ограниченной и целенаправленной онтологией [6, 8]. Решения о том, какие объекты и процессы включать в модель (тело плотины, фильтрационные пути, экологические попуски, социально-экономические факторы), какие переменные использовать и какие целевые функции оптимизировать, неизбежно носят ценностный характер [3, 10].

Таким образом, цифровой двойник не является нейтральным; он материализует определенные приоритеты (например, энергетическая выработка в противовес экологической безопасности) [6, 7]. Поэтому его техническая корректность – необходимое, но недостаточное условие. Требуется институциональная легитимность, обеспечиваемая участием стейкхолдеров (органы регулирования, местные сообщества, экологи) в процессе определения целей и метрик моделирования [8, 10].

3. *Проблема распределения ответственности в безопасности критических систем.* Внедрение ИИ размывает традиционные цепочки ответственности [9, 11]. В реальном диспетчерском цикле решение является совместным: система поддержки принятия решений (СППР) генерирует рекомендации, оператор их интерпретирует

и санкционирует в рамках регламентов, а организация несет юридическую ответственность. В случае аварийной ситуации, инициированной ошибочной рекомендацией ИИ, возникает правовой вакуум [6, 14]. Для его устранения необходима явная документарная фиксация архитектуры принятия решений, включающая в себя [8, 12]:

- предельные условия применения моделей;
- ролевое распределение полномочий (право «вето» оператора);
- ведение журнала разногласий между моделью и оператором;
- паспорт модели с явным указанием ее ограничений и допущений.

Такой подход позволяет интегрировать управление рисками, связанными с ИИ, в существующие системы менеджмента качества и безопасности (RAMS, HAZOP) [1, 2].

4. *Вызовы киберустойчивости и человеческого фактора.* Цифровизация ГТС расширяет поверхность для кибератак, последствия которых могут быть катастрофическими [14, 12]. Цифровые двойники и системы ИИ, будучи инструментами повышения устойчивости, сами становятся целями для атак (искажение данных, подмена телеметрии) [13, 12]. Это требует внедрения архитектурных принципов киберустойчивости: сегментация сетей, минимальные привилегии доступа, резервные управляемые ИИ контуры управления и процедуры аварийной деградации до ручного режима [2, 12].

Одновременно возникает классическая проблема автоматизационного смещения (automation bias) и деградации навыков: излишнее доверие к рекомендациям системы и потеря компетенций у персонала при длительной автоматизации рутинных операций. Противодействие этому включает в себя специальную подготовку операторов для работы в условиях «объяснимой неопределенности», создаваемой моделью, и регулярные тренировки на нештатные сценарии, где рекомендации ИИ могут быть заведомо ошибочными [3, 9].

5. *Социально-экологическая справедливость.* Любое управленческое решение в водном хозяйстве, оптимизированное с помощью ИИ, перераспределяет выгоды и риски [10, 2]. Алгоритм, достигающий максимального эффекта энергогенерации, может привести к дефициту воды в оросительных системах ниже по течению [3, 7]. Следовательно, оценка эффективности ИИ должна включать в себя не только технические метрики (точность, ROC-AUC), но и метрики распределительной и процедурной справедливости [6, 10]. Это требует прозрачности в отношении используемых данных, чье потребление воды учтено, а чье – проигнорировано, и создания институтов

для согласования целей оптимизации между всеми заинтересованными сторонами [8, 10].

Примеры практической реализации проблем:

Управление наводками. Модель ИИ, прогнозирующая водный приток, может не учитывать редкую комбинацию климатических факторов: например, «теплый дождь на снежный покров» [4, 7]. Корректная эксплуатация такой модели требует от диспетчера не слепого следования прогнозу, а наличия доверительных интервалов, сценарных вилок и регламента введения дополнительного ручного запаса прочности при высокой неопределенности [4, 11].

Диагностика кавитации гидротурбин. Модель, обученная распознавать кавитацию по акустическим паттернам на одном агрегате, может давать сбой на другом ввиду конструктивных отличий [5, 14]. Необходимы кросс-валидация между агрегатами, регламентированные пороги срабатывания и обязательность дополнительной инструментальной проверки перед остановом блока [3, 9].

Мониторинг фильтрации и суффозии. Сигнал от ИИ об изменении режима фильтрации может быть интерпретирован множеством способов (развитие суффозии, сезонные колебания, неисправность датчика) [1, 2]. Запрет на сильные управленческие действия (например, экстренное опорожнение водохранилища) без независимой инженерной верификации является необходимым элементом культуры безопасности [6, 11].

Таким образом, внедрение искусственного интеллекта в гидротехнику представляет собой не просто технологический апгрейд, а фундаментальный вызов существующей инженерной парадигме, основанной на детерминированных моделях и четкой ответственности [6, 8]. Успешная интеграция требует признания ограничений ИИ и смещения фокуса на построение устойчивых социотехнических систем. Предложенные в статье принципы создают для этого концептуальную основу. Эти принципы включают в себя [6, 8, 10]:

1. Прозрачный аудит и управление жизненным циклом моделей ИИ.

2. Четкое юридическое и процедурное распределение ответственности между человеком и алгоритмом.

Список использованных источников

1. Шестаков В.М., Коротков С.И. Гидрогеомеханика урбанизированных территорий. М.: Наука, 2018. 300 с.
2. International Commission on Large Dams (ICOLD). Bulletin 164: Dam Safety Management: Operational Phase of the Dam Life Cycle. Paris: ICOLD, 2017. 120 p.
3. Ahmed A.A., Pradhan B. Applications of machine learning to water resources management: A review // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 434. P. 139953. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139953

3. Проектирование систем с учетом киберустойчивости и человеческого фактора.

4. Обеспечение социальной легитимности цифровых моделей через вовлечение стейкхолдеров.

Такой подход позволит раскрыть потенциал ИИ для повышения безопасности, эффективности и устойчивости водохозяйственных систем, не поступаясь принципами инженерной этики, социальной справедливости и экологической безопасности [4, 3, 10].

Выводы

1. Систематизированы ключевые методологические проблемы внедрения ИИ в гидротехнике: от эпистемологических ограничений и ценностной нагруженности моделей до проблем распределения ответственности и социально-экологической справедливости.

2. Разработаны и обоснованы принципы «технологической скромности» как концептуальной рамки для ответственного внедрения ИИ, предполагающей его интеграцию в качестве проверяемого инструмента, а не автономного субъекта, в существующие инженерные процедуры и системы контроля.

3. Обоснована необходимость разработки специализированной нормативной базы, регламентирующей управление жизненным циклом моделей ИИ, документального закрепления архитектуры принятия решений и независимого аудита для критичных систем.

4. Показано, что цифровые двойники ГТС являются не нейтральными техническими артефактами, а ценностно-нагруженными конструктами. Это требует обеспечения их социальной легитимности через инклюзивные процедуры вовлечения стейкхолдеров в постановку целей моделирования.

5. Доказано, что ключевыми являются не только технические (сдвиг данных, кибератаки), но и социально-организационные (размывание ответственности, автоматизационное смещение) риски, для минимизации которых требуются целенаправленные изменения в подготовке персонала и организационной культуре безопасности.

References

1. Shestakov V.M., Korotkov S.I. Hydrogeomechanics of urbanized territories. Moscow, Nauka Publ., 2018. 300 p.1.
2. International Commission on Large Dams (ICOLD). Bulletin 164: Dam Safety Management: Operational Phase of the Dam Life Cycle. Paris: ICOLD, 2017. 120 p.
3. Ahmed A.A., Pradhan B. Applications of machine learning to water resources management: A review // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 434. P. 139953. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139953.

4. Huang Y., Li Z., Wang C. Artificial Intelligence in Dam Safety Monitoring: A Review // *Water Resources Management*. 2023. Vol. 37, № 5. Pp. 1821-1840. DOI: 10.1007/s11269-023-03465-5
5. Liu B., Wang Y., Zhang X. Digital Twin Technology in Hydraulic Engineering: Current Status and Future Trends // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2022. Vol. 148, № 9. Pp. 1-15. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002000
6. Doorn N. Artificial intelligence in the water domain: Opportunities for responsible use // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755. P. 142561. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142561
7. Chen L., Wang H., Li M. Review of Artificial Intelligence Applications in Dams and Water Resources // *Journal of Hydroinformatics*. 2023. Vol. 25, № 2. Pp. 345-362. DOI: 10.2166/hydro.2023.125
8. Kuzmin V.A., Goryunov V.N. Stakeholder Engagement in Digital Transformation of Water Infrastructure: A Case of Russian Hydropower // *Water Resources Management*. 2023. Vol. 37, Is. 8. Pp. 3147-3163. DOI: 10.1007/s11269-023-03509-w
9. Parasuraman R., Sheridan T.B., Wickens C.D. A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*. 2000. Vol. 30, № 3. Pp. 286-297. DOI: 10.1109/3468.844354
10. Beery J., Kooy M., Funder M. Equity in Water Governance: A Review of Justice-Oriented Water Research // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2022. e1604. DOI: 10.1002/wat2.1604
11. Shin S., Lee S., Judi D.R., Parvania M., McPherson T., Burian S., Marx A. A Systematic Review of Quantitative Resilience Measures for Water Infrastructure Systems // *Water*. 2018. Vol. 10, № 2. P. 164. DOI: 10.3390/w10020164
12. Alcaraz C., Lopez J. Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, № 3. Pp. 1475-1503. DOI: 10.1109/COMST.2022.3171465
13. U.S. Department of Energy. Cybersecurity Considerations for Digital Twins in the Energy Sector. 2023. 62 p. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-10/Cybersecurity%20Considerations%20for%20Digital%20Twins%20in%20the%20Energy%20Sector.pdf> (дата обращения: 15.10.2024)
14. Kumar A., Singh R. Enhancing Cybersecurity of Hydroelectric Power Plants through Digital Twin Modeling // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2024. Vol. 39, № 1. Pp. 456-465. DOI: 10.1109/TPWRS.2023.3321541

Сведения об авторах

Василий Александрович Фартуков, канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнических сооружений, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; Scopus Author ID: 5749450840; ORCID: 0000-0002-8405-8757; SPIN-код: 5656-7629; Author ID: 1002745; vasfar@mail.ru

Герман Михайлович Васильев, магистрант кафедры философии и философии истории магистратуры Философского факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; gervas1453@gmail.com

Вклад авторов

В.А. Фартуков – разработка методологии, создание окончательной версии (доработка) рукописи и редактирование
Г.М. Васильев – работа с литературными источниками, участие в анализе результатов и оформлении

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Поступила в редакцию / Received 13.12.2025

Поступила после рецензирования / Received 04.06.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 08.06.2026

4. Huang Y., Li Z., Wang C. Artificial Intelligence in Dam Safety Monitoring: A Review // *Water Resources Management*. 2023. Vol. 37, № 5. P. 1821-1840. DOI: 10.1007/s11269-023-03465-5.

5. Liu B., Wang Y., Zhang X. Digital Twin Technology in Hydraulic Engineering: Current Status and Future Trends // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2022. Vol. 148, № 9. P. 1-15. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002000.

6. Doorn N. Artificial intelligence in the water domain: Opportunities for responsible use // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755. P. 142561. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142561.

7. Chen L., Wang H., Li M. Review of Artificial Intelligence Applications in Dams and Water Resources // *Journal of Hydroinformatics*. 2023. Vol. 25, № 2. P. 345-362. DOI: 10.2166/hydro.2023.125.

8. Kuzmin V.A., Goryunov V.N. Stakeholder Engagement in Digital Transformation of Water Infrastructure: A Case of Russian Hydropower // *Water Resources Management*. 2023. Vol. 37, Is. 8. P. 3147-3163. DOI: 10.1007/s11269-023-03509-w.

9. Parasuraman R., Sheridan T.B., Wickens C.D. A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*. 2000. Vol. 30, № 3. P. 286-297. DOI: 10.1109/3468.844354.

10. Beery J., Kooy M., Funder M. Equity in Water Governance: A Review of Justice-Oriented Water Research // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2022. e1604. DOI: 10.1002/wat2.1604.

11. Shin S., Lee S., Judi D.R., Parvania M., McPherson T., Burian S., Marx A. A Systematic Review of Quantitative Resilience Measures for Water Infrastructure Systems // *Water*. 2018. Vol. 10, № 2. P. 164. DOI: 10.3390/w10020164.

12. Alcaraz C., Lopez J. Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, № 3. P. 1475-1503. DOI: 10.1109/COMST.2022.3171465.

13. U.S. Department of Energy. Cybersecurity Considerations for Digital Twins in the Energy Sector. 2023. 62 p. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-10/Cybersecurity%20Considerations%20for%20Digital%20Twins%20in%20the%20Energy%20Sector.pdf> (дата обращения: 15.10.2024).

14. Kumar A., Singh R. Enhancing Cybersecurity of Hydroelectric Power Plants through Digital Twin Modeling // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2024. Vol. 39, № 1. P. 456-465. DOI: 10.1109/TPWRS.2023.3321541.

Information about the authors

Vasilii A. Fartukov – CSs (Tech), Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov Scopus Author ID: 5749450840; ORCID: 0000-0002-8405-8757; SPIN-code: 5656-7629; Author ID: 1002745; vasfar@mail.ru

German M. Vasiliev – Student, Department of Philosophy and Philosophy of History, Faculty of Philosophy, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia. gervas1453@gmail.com

Contribution of the authors

V.A. Fartukov – development of methodology, creation of the final version (revision) of the manuscript and editing
G.M. Vasiliev – work with literary sources, participation in the analysis of results and design

Оригинальная статья

УДК 626.8:631.459.2

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-85-90>

СРАВНЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОННОГО ПОЛОТНА BENOTEX SK И ГЕОМАТА ЭНКАМАТ А20, ЗАПОЛНЕННОГО ЩЕБНЕМ С БИТУМНО-ПОЛИМЕРНЫМ ВЯЖУЩИМ

Х. Алабар^{1✉}, Н.В. Ханов², Т.Ю. Жукова³, А.В. Еремеев⁴, Д.А. Алексеев⁵

^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация

¹ hananalabar180@gmail.com

² khanov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

³ t.zhukova@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-9654-3039

⁴ a.eremeev@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-5826-0935

⁵ daniil.alekseev@rgau-msha.ru; ORCID:0009-0009-1890-3471

Аннотация. Цель исследований – определение коэффициента шероховатости покрытия, выполненного из бетонного полотна BeNotex SK, и сравнение полученного коэффициента с коэффициентом шероховатости геомата Энкамат А20, заполненного щебнем и битум-полимером. Водная эрозия представляет серьезную угрозу для гидротехнических сооружений, постепенно разрушая их. В связи с этим в наши дни разработка и применение эффективных защитных покрытий для откосов этих сооружений приобретают особую актуальность. В рамках исследований были получены и обработаны результаты, позволившие определить среднее значение коэффициента шероховатости для двух исследуемых покрытий. Результаты показали, что оба покрытия, как BeNotex SK, так и Энкамат А20, обладают хорошими характеристиками шероховатости. Это открывает широкие возможности для их применения в реальных условиях. В результате сравнения коэффициентов шероховатости представленных покрытий с другими популярными, применяемыми в гидротехническом строительстве, можно сделать вывод о возможности их применения на реальном объекте вместо покрытий с аналогичными коэффициентами шероховатости.

Исследование выполнено в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

Ключевые слова: водная эрозия, покрытие, полотно бетонное BeNotex SK, геомат, битум, коэффициент шероховатости

Формат цитирования: Алабар Х., Ханов Н.В., Жукова Т.Ю., Еремеев А.В., Алексеев Д.А. Сравнение гидравлических характеристик бетонного полотна Benotex SK и геомата Энкамат А20, заполненного щебнем с битумно-полимерным вяжущим. Природообустройство. 2026;Т.19(3):85-90. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-85-90>

Scientific article

COMPARISON OF HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF BENOTEX SK CONCRETE SHEET AND ENKAMAT A20 GEOMAT FILLED WITH CRUSHED STONE WITH BITUMEN-POLYMER BINDER

H. Alabar^{1✉}, N.V. Khanov², T.Yu. Zhukova³, A.V. Ereemeev⁴, A.D. Alekseev⁵

^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakova; Moscow, Russian Federation

¹ hananalabar180@gmail.com

² khanov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

³ t.zhukova@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-9654-3039

⁴ a.eremeev@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-5826-0935

⁵ daniil.alekseev@rgau-msha.ru; ORCID:0009-0009-1890-3471

Abstract. The purpose of the research was to determine the roughness coefficient of a coating made of BeNotex SK concrete and compare the obtained coefficient with the roughness coefficient of the Encamate A20 geomat filled with crushed stone and bitumen polymer. Water erosion poses a serious threat to hydraulic

structures, gradually destroying them. In this regard, nowadays the development and application of effective protective coatings for the slopes of these structures are becoming particularly relevant. As part of the research, the results were obtained and processed, which made it possible to determine the average value of the roughness coefficient for the two coatings studied. The results showed that both BeNotex SK and Encamate A20 coatings have good roughness characteristics. This opens up great opportunities for their application in real conditions. As a result of comparing the roughness coefficients of the presented coatings with other popular ones used in hydraulic engineering, it can be concluded that they can be used on a real object instead of coatings with similar roughness coefficients.

The study was carried out as part of the project to create and develop the Engineering Center at the Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev (agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025).

Keywords: water erosion, coating, BeNotex SK concrete sheet, geomat, bitumen, roughness coefficient

For citation: Alabar Kh., Khanov N.V., Zhukova T.Yu., Ereemeev A.V., Alekseev D.A. Comparison of hydraulic characteristics of Benotex SK concrete web and Encamate A20 geomat filled with crushed stone with Bitumen polymer Binder. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(3):85-90. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-85-90>

Введение. Эрозия представляет собой серьезную проблему, которая негативно сказывается на всем, что связано с водой. Она вредит не только самим гидротехническим сооружениям (таким, как дамбы или плотины), но и прилегающим территориям, а также самому водному объекту. Чаще всего эрозии подвержены склоны сооружений с подмыванием берегов (рис. 1). Это может привести к разрушительным последствиям: потоки воды способны повредить дороги и постройки, расположенные вблизи от берега [1]. В предотвращении разрушений ключевую роль играет правильный выбор защитных материалов

и надежных способов крепления для береговых склонов, насыпей, плотин и дамб.

Прежде всего нужно уделять пристальное внимание тем участкам сооружения, которые теряют свою устойчивость. Именно они могут снизить общую надежность и безопасность всей конструкции, а выбор способа крепления берега будет определяться характером воздействия водного потока, скоростью течения и типом грунта [2].

Инженерные решения открывают широкие возможности для защиты берегов рек и озер от разрушения водным потоком. Одним из ключевых направлений является укрепление откосов. Для этого используются современные защитные материалы и покрытия, которые эффективно противостоят воздействию водного потока. Рассматриваемое бетонное полотно марки BeNotex SK – это композитный материал, который при взаимодействии с водой образует прочный бетонный слой, выполненный в виде рулона [2]. Данный материал можно использовать в гидротехническом и дорожном строительстве (рис. 2).



Рис. 1 а, б. Разрушительное воздействие потока воды на береговые склоны [2]

Fig.1. a, b: Destructive effect of water flow on coastal slopes [2]

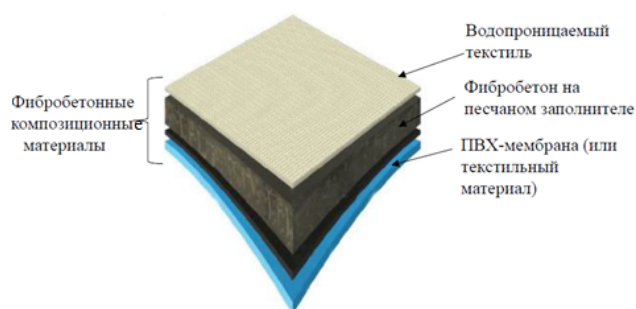


Рис. 2. Полотно бетонное марки BeNotex SK [2]

Fig. 2. BeNotex SK concrete sheet [2]

Композитный материал состоит из верхнего слоя тканого геотекстиля, армирующей 3D-сетки, заполненной сухой бетонной смесью, и нижнего слоя из высокопрочного полипропиленового геотекстиля, пропитанного водонепроницаемой смолой (рис. 3).

При проектировании берегоукреплений для водных объектов ключевым моментом является выбор оптимального конструктивного решения. Для успешного решения этой задачи требуется полное понимание всех расчетных параметров используемых материалов, а также четкое определение функций, которые должна выполнять противоэрозионная защита. Одним из материалов в современной гидротехнике является геомат, представляющий легкую объемную структуру, созданную из полимерных нитей – полиэтилена или полипропилена. Эти нити переплетены между собой совершенно случайным образом, образуя трехмерное волокнистое полотно. Важно отметить, что тип геомата подбирается индивидуально исходя из его предполагаемого использования [3-6]. В данной работе для сравнения рассматривается геомат марки Энкамат А20, заполненный щебнем и битум-полимером (рис. 4).

Энкамат А20 – это композитный геоматериал, разработанный для обеспечения прочности и проницаемости. Толщина данного материала составляет около 22 мм, он состоит из щебня

и подложки в виде геомата, связанного битумно-полимерным вяжущим [6]. Коэффициент шероховатости данного геомата был ранее исследован на той же гидравлической установке и составляет 0,0162. Для дальнейшего сравнения коэффициентов облицовок будет использоваться данный коэффициент, рассчитанный по формуле Маннинга.

Исследования были посвящены гидравлическим процессам бетонного полотна марки BeNotex SK, а также сравнению коэффициентов шероховатости защитных облицовок, используемых для защиты русла водотока.

Представленные покрытия крепятся при помощи анкеров Г-образной либо П-образной форм из арматуры диаметром 6...8 мм. Анкеры устанавливают по краям и на стыке для фиксации края покрытия при монтаже.

Цель исследований: определение коэффициента шероховатости покрытия, выполненного из бетонного полотна BeNotex SK, и сравнение полученного коэффициента с коэффициентом шероховатости геомата Энкамат А20, заполненного щебнем и битум-полимером.

Материалы и методы исследований. Исследование защитных покрытий проводилось на экспериментальной площадке кафедры гидротехнических сооружений. Был использован трапецевидный гидравлический лоток с одной вертикальной и одной наклонной (1:1) сторонами (рис. 5). Установка позволяла регулировать уклон дна и расход воды. Эксперименты проводились при равномерном режиме течения с расходами Q от 84,33 до 168,78 л/с и уклонами дна i от 0,01 до 0,05. Участок лотка, где проводилось исследование, имел длину 6 м.

Гидравлические исследования покрытий выполнялись в мерных створах лабораторной



Рис. 3 а, б. Использование покрытия «Полотно бетонное марки BeNotex SK» для укрепления каналов, дорожных кюветов [2]

Fig. 3. Use of BeNotex SK concrete sheet coating: a – b – for strengthening canals, road ditches [2]



Рис. 4. Противоэрозионный материал – геомат марки Энкамат А20, заполненный щебнем и битум-полимером (фото авторов)

Fig. 4. Anti-erosion material geomat of the Enkamat A20 brand, filled with crushed stone and bitumen polymer (photo by the authors)

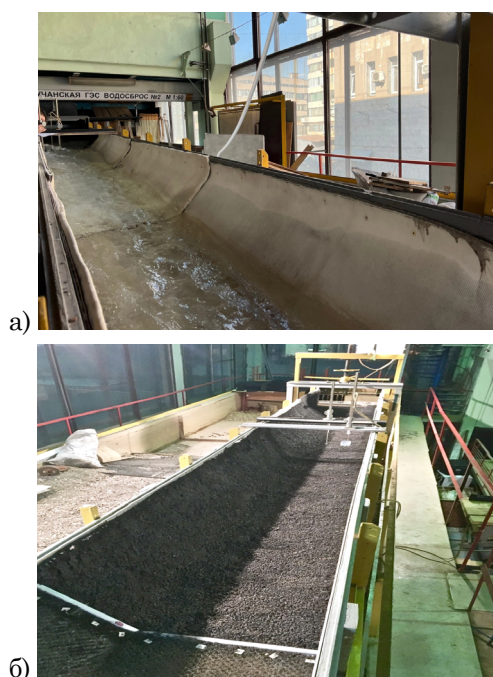


Рис. 5. Экспериментальный участок канала:
а – бетонное полотно марки BeNotex SK;
б – геомат марки Энкамат А20, заполненный
щебнем и битум-полимером (фото авторов)

Fig. 5. Experimental section of the canal:

а – concrete sheet BeNotex SK;
б – Enkamat A20 geomat filled with crushed stone
and bitumen polymer (photo by the authors)

установки. Своры разбивались на вертикальные и горизонтальные линии, в местах пересечения которых производились замеры скоростей потока при помощи трубки Пито. Методика выполнения расчета представлена на блок-схеме гидравлического расчета каналов (рис. 6).

Результаты и их обсуждение. Расчет коэффициента шероховатости выполнялся по формулам Павловского ($n_{\text{п}}$), Маннинга ($n_{\text{м}}$) и Гангиле-Куттера ($n_{\text{г-к}}$) [6-12]. Результаты расчета коэффициента по трем основным зависимостям n для бетонного полотна марки BeNotex SK представлены в таблице. Коэффициенты шероховатости бетонного полотна марки BeNotex SK позволят более корректно выбрать тип покрытия для проектируемого канала или сооружения.

В ходе исследований были получены значения коэффициентов шероховатости « n ». Для анализа полученных результатов сравнение данных коэффициентов выполнялось также и с другими аналогичными облицовками. Сравнение полученных значений представлено на графике (рис. 7).

Проведенные исследования и сравнение бетонного полотна марки BeNotex SK показали возможность применения его в практике мелиоративного строительства. При сравнении

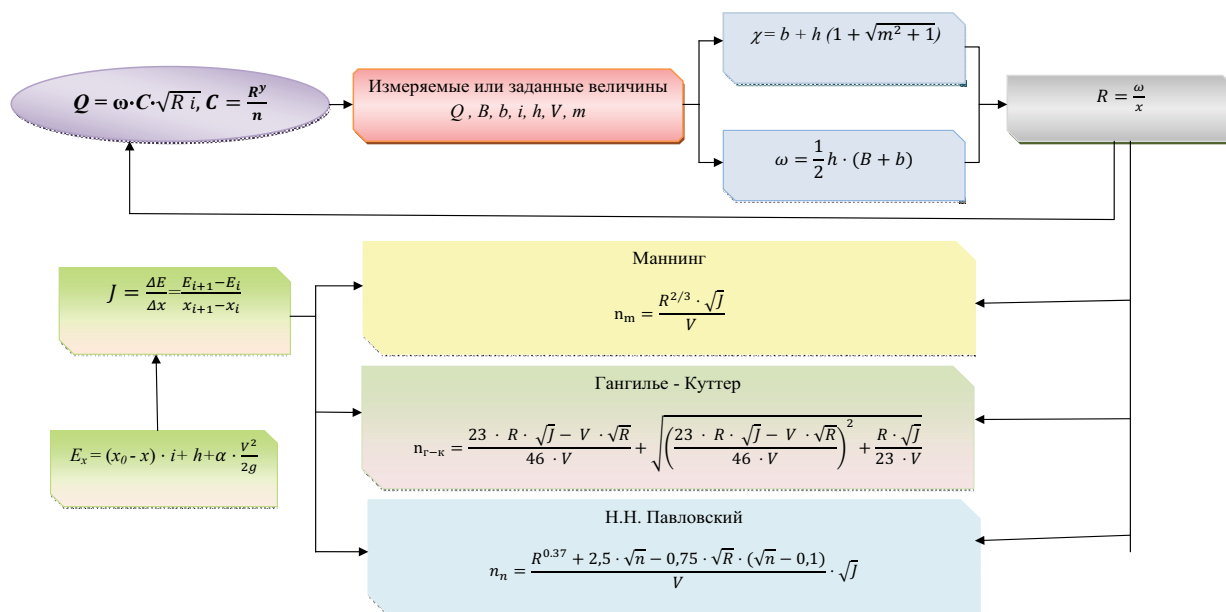


Рис. 6. Блок-схема гидравлического расчета каналов и участков русел водотоков

Fig. 6. Block diagram of hydraulic calculation of canals and sections of watercourse canals

Таблица 1. Коэффициенты шероховатости n для бетонного полотна марки BeNotex SK

Table 1. Roughness coefficients n for BeNotex SK concrete sheet

Покрывтие / Coating	Параметр / Parameter	$n_{\text{ср}}$	n_{min}	n_{max}
Бетонное полотно марки BeNotex SK / BeNotex SK concrete sheet	$n_{\text{п}}$	0,0160	0,0156	0,0165
	$n_{\text{м}}$	0,0163	0,0160	0,0169
	$n_{\text{г-к}}$	0,0157	0,0153	0,0162

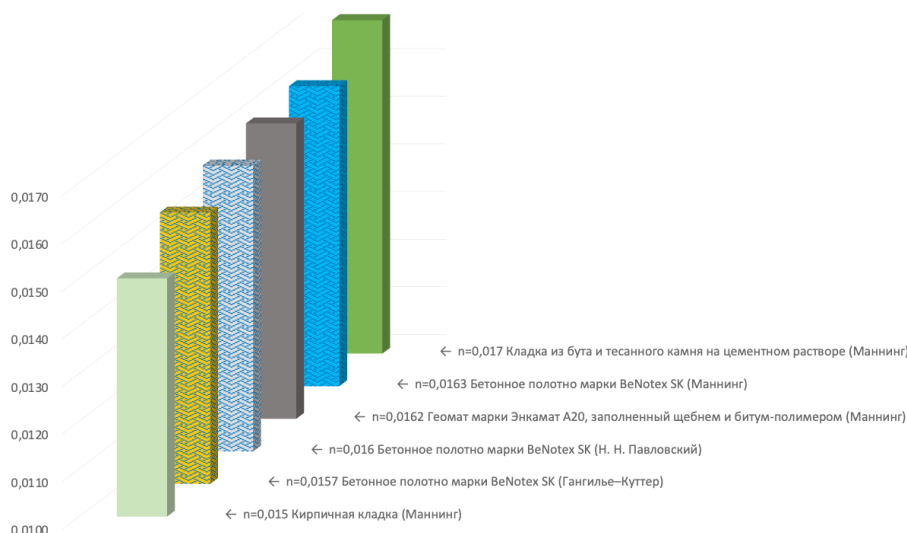


Рис. 7. Сравнение средних значений коэффициентов шероховатости рассматриваемых покрытий
Fig. 7. Comparison of the average values of the roughness coefficients of the coatings under consideration

с покрытиями, исследуемыми на той же гидравлической установке, выяснилось, что наиболее близким значение коэффициента шероховатости было у покрытия, выполненного из геомата, заполненного щебнем и битумно-полимерным вяжущим. Также близки к данному покрытию коэффициенты шероховатости таких облицовок, как кирпичная кладка и кладка из бута и тесанного камня на цементном растворе.

Выводы

Исследование коэффициента шероховатости бетонного полотна марки BeNotex SK

показывает возможность применения данного полотна в практике строительства. В результате сравнения полученного коэффициента шероховатости с другими популярными покрытиями, применяемыми в гидротехническом строительстве, можно сделать вывод о возможности применения данного покрытия вместо покрытий с аналогичными коэффициентами шероховатости. При расчетах с применением бетонного полотна марки BeNotex SK рекомендуется использовать значение коэффициента шероховатости $n = 0,0163$.

Список использованных источников

1. Гурьев А.П., Ханов Н.В., Еремеев А.В., Козлов К.Д., Фартуков В.А. Использование композиционных геоматов для борьбы с водной эрозией: Монография. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. 253 с. EDN: VPDGTH
2. Ханов Н.В., Черных О.Н., Жукова Т.Ю., Алексеев Д.А., Алабар Х. Результаты исследований гидравлических свойств противозерозионного бетонного полотна марки BeNotex SK // Природообустройство. 2025. № 3. С. 63-68. EDN: WHUUVN
3. Козлов К.Д., Гурьев А.П., Ханов Н.В. Гидравлические исследования покрытия из геокомпозитного материала // Природообустройство. 2014. № 5. С. 80-86
4. Козлов К.Д., Гурьев А.П., Козлов Д.В., Ханов Н.В. Модельные гидравлические исследования для определения коэффициента шероховатости материала Энкамат А20 // Научная жизнь. 2016. № 1. С. 6-12. EDN: VUCGMX
5. Гурьев А.П., Козлов Д.В., Ханов Н.В., Фартуков В.А., Новиченко А.И., Шукин С.Н. Гидравлические исследования противозерозионного покрытия – геомата марки Энкамат А20 // Международная научная конференция «Научное кадровое обеспечение продовольственной безопасности России»: Доклады ТСХА. Изд-во Грин Эра 2, 2015. С. 358-363. EDN: WHUUVN
6. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов. М.: Изд-во литературы по строительству, 1969. 462 с.

References

1. Guryev A.P., Khanov N.V., Eremeev A.V., Kozlov K.D., Fartukov V.A. The use of composite geomats to combat water erosion. Monograph. Moscow: RGAU MCXA, 2020. 253 p. EDN: VPDGTH
2. Khanov N.V., Chernykh O.N., Zhukova T.Yu., Alekseev D.A., Alabar H. The results of research on the hydraulic properties of anti-erosion concrete sheet of the BeNotex SK brand // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 3. P. 63-68. EDN: WHUUVN
3. Kozlov K.D. Hydraulic studies of the coating made of geo-composite material / K.D. Kozlov, A.P. Guryev, N.V. Khanov // Prirodoobustrojstvo. 2014. No. 5. P. 80-86.
4. Kozlov K.D., Guryev A.P., Kozlov D.V., Khanov N.V. Model hydraulic studies to determine the roughness coefficient of the Enkamat A20 material / // Scientific life. 2016. No. 1. P. 6-12. EDN: VUCGMX
5. Guryev A.P. Hydraulic studies of the anti-erosion coating – geomat brand Enkamat A 20 / A.P. Guryev, D.V. Kozlov, N.V. Khanov, V.A. Fartukov, A.I. Novichenko, S.N. Shchukin // International scientific conference "Scientific personnel support for food security in Russia". Reports of the Timiryazev Agricultural Academy. Publisher: Green Era 2, 2015. P. 358-363.
6. Chow V.T. Hydraulics of open channels / V.T. Chow. Moscow: Literat. on building publishing house, 1969. – 462 p.
7. Khatsuria R.M. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators / R.M. Khatsuria -New York.: Marcel Dekker, 2005. 649 p.

7. Khatsuria R.M. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. New York: Marcel Dekker, 2005. 649 p.
8. Козырь И.Е., Пикалова И.Ф., Ханов Н.В. Практикум по гидравлике: Учебно-методическое пособие. СПб.: Лань, 2016. 176 с. EDN: WHYTAR
9. Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.И. Гидравлика: Учебник. М.: Энергия, 1964. 352 с.
10. Schippers W. and K. Pon. Grondsoort, vegetatie en erosiebestendigheid, Landbouwwuniversiteit, Wageningen, 1983
11. Hewlett H.W.M., Boorman L.A. and Bramley M.E. Design of reinforced grass waterways, Report 116. CIRIA, London, 1987.
12. Зуйков А.Л., Волгина Л.В. Гидравлика: Учебник для вузов: В 2 т. Т. 2. Напорный и открытые потоки. Гидравлика сооружений. М.: Изд-во МГСУ, 2015. 424 с.

Информация об авторах

Алабар Ханан, аспирант кафедры гидротехнических сооружений; hananalabar180@gmail.com

Нартмир Владимирович Ханов, д-р техн. наук, профессор; заведующий кафедрой гидротехнических сооружений; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Татьяна Юрьевна Жукова, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры гидротехнических сооружений; WoS ResearcherID: RIDAAE-5204-2022; Scopus AuthorID: 57433774600; ORCID: 0000-0002-9654-3039; SPIN-код: 5357-4597; AuthorID: 1111184; t.zhukova@rgau-msha.ru

Андрей Викторович Еремеев, канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнических сооружений; WoS ResearcherID: AAE-5829-2022; Scopus AuthorID: 58103661400; ORCID: 0000-0002-5826-0935; SPIN-код: 6290-9480; AuthorID: 999552; a.eremeev@rgau-msha.ru

Даниил Андреевич Алексеев, преподаватель кафедры гидротехнических сооружений; ORCID: 0009-0009-1890-3471; SPIN-код: 8085-3065; daniil.alekseev@rgau-msha.ru

Вклад авторов

Алабар Ханан – сбор информации, проведение исследований
Н.В. Ханов – разработка программы исследований
Т.Ю. Жукова – анализ и обработка результатов исследований
А.В. Еремеев – выполнение теоретических исследований, на основании которых провели обобщение
Д.А. Алексеев – проведение исследований

Конфликт интересов / Criteria of authorship

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

Поступила в редакцию / Received 26.01.2026

Поступила после рецензирования / Received 14.04.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 17.04.2026

8. Kozyr I.E., Pikalova I.F., Khanov N.V. Practical training in hydraulics. Study-method manual. – St. Petersburg, “Lan”, 2016. 176 p. EDN: WHYTAR

9. Agroskin I.I., Dmitriev G.T., Pikalov F.I. Hydraulics. – M.: Energiya, 1964. – 352 p.

10. Schippers W. and K. Pon, Grondsoort, vegetatie en erosionbestendigheid, Landbouwwuniversiteit, Wageningen, 1983.

11. Hewlett H.W. M., Boorman L.A. and M.E. Bramley, Design of reinforced grass waterways, Report 116, CIRIA, London, 1987.

12. Zuikov A.L., Volgina L.V. Hydraulics: a textbook for universities: in 2 volumes. Volume 2: Pressure and open flows. Hydraulics of structures. M.: Publishing house of MGSU, 2015. 424 p.

Information about the authors

Alabar Hanan, post graduate student; hananalabar180@gmail.com

Nartmir V.I. Khanov, DSs (Tech), professor; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-code: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Tatyana Yu. Zhukova, senior lecturer, WoS ResearcherID: RIDAAE-5204-2022; Scopus AuthorID: 57433774600; ORCID: 0000-0002-9654-3039; SPIN-code 5357-4597; AuthorID: 1111184; t.zhukova@rgau-msha.ru

Andrey V. Eremeev, CSs (Tech), associate professor; WoS ResearcherID: AAE-5829-2022; Scopus AuthorID: 58103661400; ORCID: 0000-0002-5826-0935; SPIN-code: 6290-9480; AuthorID: 999552; a.eremeev@rgau-msha.ru

Daniil A. Alekseev, teacher; ORCID: 0009-0009-1890-3471; SPIN-code: 8085-3065; daniil.alekseev@rgau-msha.ru

Contribution of the authors

Alabar Hanan – collecting information, conducting research
Khanov N.V. – development of a research program
Zhukova T.Yu. – analysis and processing of research results
Eremeev A.V. – theoretical research, on the basis of which the generalization was carried out
Alekseev D.A. – conducting research

Оригинальная статья

УДК 627.8:621.311.21

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-91-98>

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НИЗКОНАПОРНЫХ МИКРО-ГЭС В СОСТАВЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

А.П. Крылов

ООО «Центр Судебных Экспертиз и Строительных Исследований «Ригет»»; г. Москва, Российская Федерация
Riget-expert@yandex.ru

Аннотация. Цель исследований – комплексный анализ современного состояния, ключевых проблем и перспективных направлений развития низконапорной микрогидроэнергетики как надежного источника энергии. Представлен обзор современных технологических решений включая компоновочные схемы интеграции в существующие гидроузлы, модульное контейнерное исполнение и турбинное оборудование (ортогональные, винтовые, роторные и геликоидные турбины). На примере натурных испытаний отечественной разработки – микро-ГЭС с ортогональной турбиной на Хоробровском гидроузле – показаны пути преодоления технических барьеров и дальнейшие перспективы развития данной сферы альтернативной энергетики. Основные задачи проведенных исследований заключаются в сравнительном анализе различных типов турбин по ключевым параметрам. Представлено обобщение опыта натурных испытаний отечественной разработки – микро-ГЭС с ортогональной турбиной на Хоробровском гидроузле включая оценку ее энергетической эффективности, технологичности монтажа и пригодности для автономной работы. Проведен комплексный сравнительный анализ всех перспективных типов турбин для низконапорных условий с учетом как традиционных параметров (КПД, напор), так и критически важных для практической реализации факторов: скорости монтажа, стоимости интеграции в существующую инфраструктуру и пригодности для работы в автономном режиме. Сделан вывод о высоком потенциале низконапорной микрогидроэнергетики для обеспечения энергетической безопасности и достижения целей низкоуглеродного развития.

Ключевые слова: микро-ГЭС, сифонный водоприемник, ортогональная турбина, микрогидроэнергетика, низконапорная гидроэнергетика, энергодефицит, децентрализованное энергоснабжение, энергетическая безопасность, удаленные территории, гидротехническое строительство

Для цитирования: Крылов А.П. Перспективы развития низконапорных микро-ГЭС в составе гидротехнических сооружений. Природообустройство. 2026;Т.19(3):91-98.
<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-91-98>

Scientific article

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF LOW-HEAD MICRO-HYDROELECTRIC POWER PLANTS AS PART OF HYDRAULIC STRUCTURES

A.P. Krylov

Center for Forensic Expertise and Construction Research “Riget” LLC; Moscow, Russian Federation
Riget-expert@yandex.ru

Abstract. The article examines the role and prospects of low-head micro-hydropower (up to 100 kW) as a sustainable and reliable energy source for decentralized power supply. An overview of modern technological solutions is presented, including integration schemes for existing hydraulic structures, modular container-based designs, and a range of turbine equipment (orthogonal, screw, rotary, and helical turbines). Using the example of field tests of a domestic development – a micro-hydro power plant with an orthogonal turbine at the Khorobrovsky hydropower facility – pathways to overcoming technical barriers and further prospects for the development of this alternative energy sector are demonstrated. The main objectives of the conducted research are to perform a comparative analysis of various turbine types based on key parameters and to generalize the experience from field tests of the domestic micro-hydro power plant with an orthogonal turbine at the Khorobrovsky facility. This includes assessing its energy efficiency,

installation feasibility, and suitability for autonomous operation. A comprehensive comparative analysis of all prospective turbine types for low-head conditions has been conducted, taking into account both traditional parameters (efficiency, head) and factors critical for practical implementation – installation speed, cost of integration into existing infrastructure, and suitability for autonomous operation. It is concluded that low-head micro-hydropower holds significant potential for ensuring energy security in remote areas and achieving low-carbon development goals.

Keywords: micro hydroelectric power plant, siphon water intake, orthogonal turbine, micro hydropower, micro hydroelectric power plant, low-head hydropower, energy shortage, decentralized energy supply, energy security, remote areas, hydraulic engineering

For citation: Krylov A.P. Prospects for the development of low-head micro-hydroelectric power plants as part of hydraulic structures. *Prirodobustroystvo*. 2026;19(3):91-98. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-91-98>

Введение. Глобальные вызовы энергетической безопасности усугубляются наличием обширных территорий, испытывающих энергодефицит [1]. Эта проблема характерна для удаленных поселений, горных и северных районов, островных территорий, а также для многих сельскохозяйственных и промышленных объектов, где протяженность и значительный износ сетей делают централизованное электроснабжение экономически нецелесообразным, технически сложным и ненадежным. В таких условиях энергодефицит становится ключевым сдерживающим фактором социально-экономического развития.

Низконапорная микрогидроэнергетика, использующая энергию малых рек, ручьев, ирригационных каналов и техногенных водотоков, представляет собой один из возможных ответов на вызовы энергодефицита в локализованных условиях. В отличие от солнечных и ветровых источников выработка микро-ГЭС отличается высокой предсказуемостью и постоянством, обеспечивая базовую нагрузку локальной энергосистемы [2]. Микрогидроэнергетика (установленная мощность до 100 кВт) обладает уникальными преимуществами: высокая предсказуемость и постоянство выработки (по сравнению с солнечной и ветровой энергетикой), значительный ресурсный потенциал на малых реках и существующих гидротехнических сооружениях неэнергетического назначения, а также высокий показатель энергетической рентабельности (EROI) [1-4].

В качестве объектов, на которых имеется техническая возможность внедрить микро-ГЭС, можно выделить существующие гидроузлы различного целевого назначения, имеющие плотины с соответствующим напором (от 1,5 до 10 м). Это могут быть плотины на равнинных реках, водосбросные сооружения, водоемы-охладители тепловых электростанций, водоочистные сооружения городов, ирригационные каналы и т.д. [5, 6].

В случае отсутствия гидротехнических сооружений, обеспечивающих требуемые напоры,

организация напорного фронта может быть обеспечена использованием небольшой деривации или организацией быстровозводимых подпорных сооружений из местных материалов (каменно-набросные плотины с переливом воды через гребень или грунтовые плотины с водосбросными сооружениями (рис. 1).

К наиболее перспективным регионам для развития малой гидроэнергетики в РФ относятся Кавказ, Горный Алтай, Тыва, горные районы Бурятии и Камчатка. Именно в этих районах имеется большое количество рек со скоростью течения свыше 2 м/с. Значительная часть горных рек не замерзает в зимнее время, что позволяет использовать микро-ГЭС практически круглогодично, существенно снижая себестоимость произведенной электроэнергии. В таблице 1 представлены теоретический и технический гидроэнергетические потенциалы.

Данные по диапазонам напоров и расходов, максимальному КПД, сложности монтажа и относительным стоимостным показателям обобщены на основании источников [1, 2, 7, 8, 10, 12].

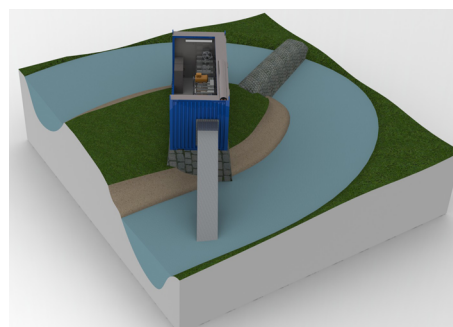


Рис. 1. Пример организации микро-ГЭС в контейнерном исполнении с организацией быстровозводимого подпорного сооружения из местных материалов

Fig. 1. An example of the organization of a containerized Micro-HPP with the organization of a prefabricated retaining structure made of local materials

Таблица 1. Потенциал малых и микро-ГЭС в РФ (млрд кВт·ч/год)

Table 1. Potential of small and micro-hydropower plants in the Russian Federation (billion kWh/year)

Федеральный округ / Federal District	Теоретический потенциал (млрд кВт·ч/год) / Theoretical potential (billion kWh / year)	Технический потенциал (млрд кВт·ч/год) / Technical potential (billion kWh / year)
Северо-Западный / North-West	48,6	15,1
Центральный / Central	7,6	2,9
Приволжский / Privolzhsky	35	11,4
Южный / Yuzhny	50,1	15,5
Уральский / Ural	42,6	13,2
Сибирский / Siberian	469,7	153
Дальневосточный / Far Eastern	452	146
ИТОГО по России / TOTAL for Russia	1105,6	357,1

На основании оценки гидроэнергетического потенциала существующих гидротехнических сооружений неэнергетического назначения можно сделать вывод о том, что имеется техническая возможность освоения неиспользуемого гидропотенциала, сосредоточенного в многочисленных малых плотинах и гидроузлах, изначально сооруженных для решения задач, не связанных с генерацией электроэнергии. Речь идет о гидротехнических объектах, функционирующих в сельскохозяйственных и иных районах в целях ирригации, питьевого водоснабжения или регулирования паводкового стока [1, 2, 7].

Ключевым экономическим преимуществом данного направления является существенное сокращение капитальных затрат по сравнению со строительством гидроэлектростанций (ГЭС) «с нуля». Доля затрат на возведение плотины и сопутствующие общестроительные работы может достигать 60% от общей стоимости нового гидроэнергетического проекта [1, 2]. Следовательно, техническое переоснащение существующих гидроузлов с целью выработки электроэнергии, при условии его технической осуществимости, требует значительно меньших финансовых вложений и сроков реализации, поскольку основные гидротехнические сооружения (подпорная плотина, водохранилище, водосбросы) уже построены и эксплуатируются.

Таким образом, данное направление представляет собой высокорентабельный путь наращивания генерирующих мощностей на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Цель исследований: комплексный анализ современного состояния, ключевых проблем и перспективных направлений развития низконапорной микрогидроэнергетики как надежного источника энергии; обобщение опыта практической реализации и натурных испытаний микро-ГЭС для оценки эффективности предложенных решений; формулирование

научно-технических перспектив развития отрасли, направленных на повышение надежности и экономической целесообразности микро-ГЭС.

Материалы и методы исследований.

Исследования проводились с использованием следующих материалов и методов.

– Аналитический обзор. Систематизация и анализ данных из научных публикаций, отчетов технической документации ведущих мировых и российских производителей турбин.

– Сравнительный анализ. Сопоставление различных типов турбин (ортогональная, Архимедов винт, роторная, пропеллерная, геликоидная) по ключевым параметрам: рабочий диапазон напоров/расходов, КПД, стоимость, экологичность, технологичность и быстрота монтажа.

– Детальное изучение опыта проектирования, монтажа и натурных испытаний опытной микро-ГЭС контейнерного типа с ортогональной турбиной.

На рисунке 2 представлена компоновочная схема рабочего агрегата турбин семейства «СК» закрытого типа для реализации проектов микро-ГЭС.

Технически турбины семейства СК могут работать в широком диапазоне напоров и расходов, но в силу того, что турбины других типов более эффективны при более высоких напорах и турбины СК относительно дороги, они являются предпочтительным выбором для участков с менее низким напором и высокими расходами. Обычно они используются на объектах с напором от 5 до 20 м и пиковым расходом от 5 до 30 м³/с. При этом минимальный диаметр ротора составляет 600 мм [1]. Несмотря на высокий коэффициент полезного действия (КПД) в своем оптимальном рабочем диапазоне, применение турбин типа СК (Semi-Karlan closed) для низконапорных проектов микро-ГЭС (напоры менее 5-6 м) сопряжено с рядом существенных технологических и экономических ограничений, а также

со снижением КПД [8], ставящих под вопрос их целесообразность в данном сегменте.

На рисунке 3 представлен пример реализации малой энергетической установки с использованием турбины Архимеда.

Турбины Архимедова винта также эффективны при очень низких напорах (1.5-5 м) и отличаются высокой надежностью, устойчивостью к загрязнениям и экологической безопасностью [7].

Важным преимуществом ортогональных турбин, которые также могут успешно

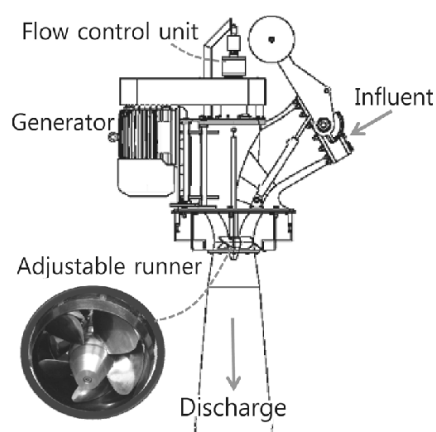


Рис. 2. Компонент турбины СК (Semi-Kaplan closed):

Flow control unit – регулируемый гидравлический затвор;
Generator – электрический генератор;
Influent – водоподводящий тракт;
Adjustable runner – турбина;
Discharge – водоотводящий тракт

Fig. 2. Turbine layout SK (Semi-Kaplan closed)

использоваться в низконапорной микрогидроэнергетике, является работа на низких напорах по сравнению с осевыми турбинами (рис. 5, 6).

Опыт натурных испытаний отечественной разработки на Хоробровском МГЭС [2, 5, 6] доказал принципиальную работоспособность и конкурентоспособность подхода, основанного на комбинации ортогональной турбины, сифонного водовода и контейнерного исполнения. Достигнутые показатели (КПД 55% при реальном напоре 2.1-3.0 м) являются хорошей базой для дальнейшей оптимизации и практической реализации [2, 6].

В качестве альтернативы модернизированной ортогональной турбине в аналогичных условиях может выступать геликоидная турбина Горлова, которая показала хорошие характеристики в качестве свободнопоточной турбины [9]. Ниже



Рис. 3. Пример реализации малой энергетической установки с использованием турбины Архимеда

Fig. 3. Example of the implementation of a small power plant using an Archimedes turbine

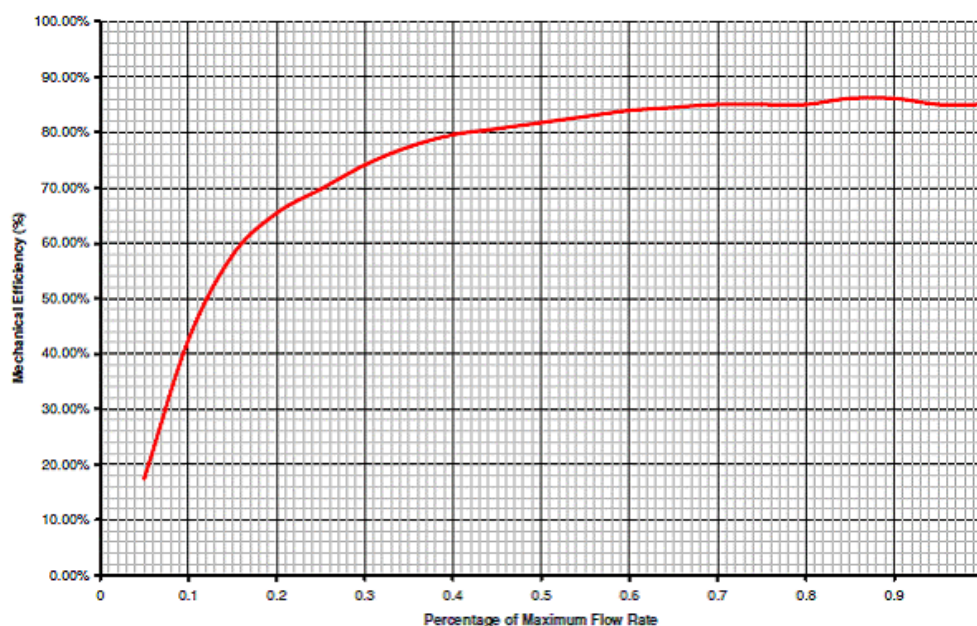


Рис. 4. График КПД ($\eta = f(Q)$) для турбины Архимеда

Fig. 4. Graph of efficiency (for the Archimedes turbine)

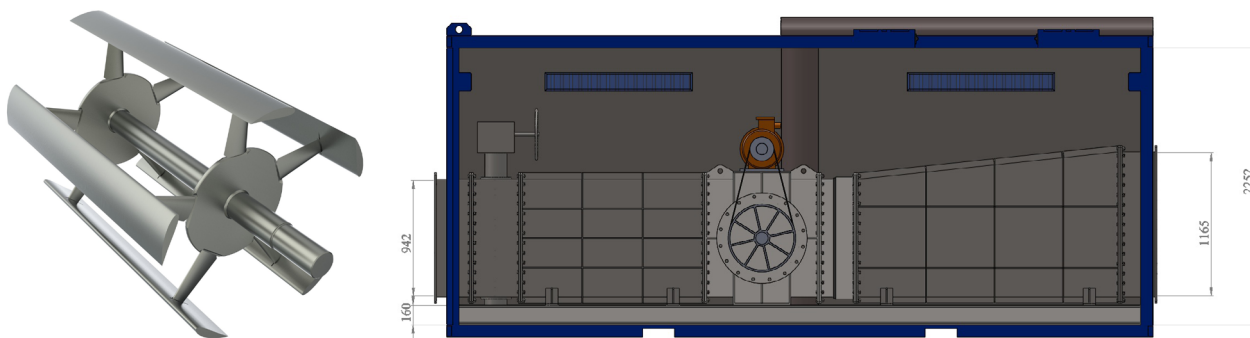


Рис. 5, 6. 3D-модель ортогональной турбины. Пример контейнерного исполнения микро-ГЭС с ортогональной турбиной

Fig. 6. An example of a containerized version of a micro-hydroelectric power plant with an orthogonal turbine

приведены схематичные изображения геликоидной турбины Горлова.

Ортогональные турбины с направляющими аппаратами хорошо показали себя в микро-ГЭС благодаря способности эффективно работать при низких напорах (2-6 м). Однако их эффективность снижается при нестабильных расходах и пульсациях потока. Турбина Горлова, обладающая спиральной геометрией лопастей, демонстрирует устойчивую работу в широком диапазоне режимов [10], что делает ее перспективной альтернативой в напорных системах Микро-ГЭС.

Геликоидная турбина Горлова в сочетании с пристеночным направляющим аппаратом может обладать конкурентоспособным потенциалом в качестве напорной турбины для микро-ГЭС. Ее адаптивность, устойчивость к нестационарным потокам и сравнительная простота конструкции открывают новые возможности для малой гидроэнергетики, особенно в условиях децентрализованного энергоснабжения.

Сравнение технологий для низконапорной микрогидроэнергетики приведено в таблице 2.

Данные по диапазонам напоров и расходов, максимальному КПД, сложности монтажа и относительным стоимостным показателям

обобщены на основании источников [1, 2, 7, 8, 10, 12].

Результаты и их обсуждение. Таким образом, для задач обеспечения надежного, автономного и быстро внедряемого энергоснабжения на базе низконапорных микро-ГЭС модернизированная ортогональная турбина представляет собой одно из наиболее сбалансированных и перспективных решений. Турбина Горлова («GHT») открывает альтернативные возможности, особенно ценные в условиях нестационарных, переменных или ультранизких напоров, где традиционные решения демонстрируют падение эффективности.

В условиях равнинных малых рек, как правило, необходимо создание небольших подпорных сооружений с напором до нескольких метров. Это могут быть, например, каменно-набросные плотины с возможностью перелива воды через гребень плотины или грунтовые плотины из местных материалов с водосбросными сооружениями и т.п. На реках с достаточно большими уклонами для создания напора возможна реализация коротких деривационных схем с отводом воды из основного русла реки. Прокладку напорного трубопровода для быстро возводимых низконапорных микро-ГЭС целесообразно

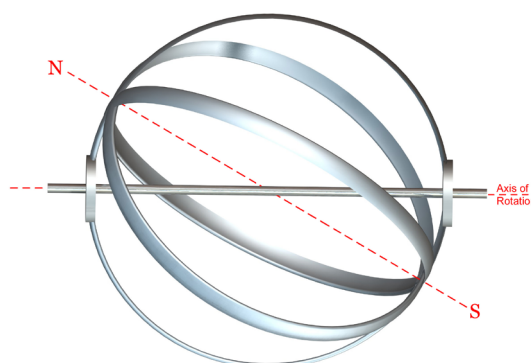
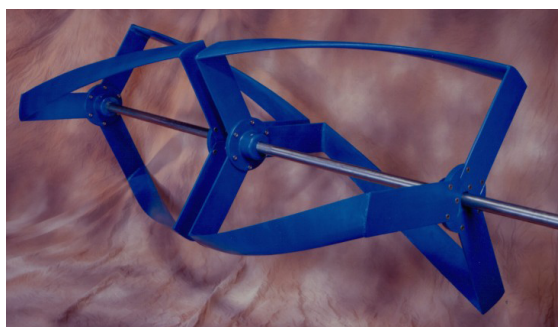


Рис. 7, 8. Различные конфигурации геликоидной турбины Горлова

Fig. 7-8. Different configurations of the Gorlov helicoine turbine

Таблица 2. Краткая характеристика технологий
для низконапорной микрогидроэнергетики

Table 2. Brief description of technologies for low-head micro-hydropower

Параметр / Parameter	Турбина / Turbine СК (Semi-Kaplan closed)	Турбина Архимеда / Archimedes turbine	Ортогональная тур- бина с пристеночным направляющим ап- паратом (модернизи- рованная) / Orthogonal turbine with wall-mounted guide vane (upgraded)	Геликоидная турбина Горлова с пристеноч- ным направляющим аппаратом / Helical Gorlov turbine with a wall-mounted guide vane
5-20 (мини- мально эф- фективный от 5 м) / 5-20 (minimum effective from 5 m)	1.5-5	1.5-8	1.5-8	
1.5-30+	0.5-15	0.5-5	0.5-5	
85-90	70-80	55-70	50-60	
Требует бе- тонных камер, сложного монтажа / Requires concrete chambers, com- plex installation	Требует мас- сивных опор, большого пространства / Requires massive supports, a lot of space	Модульная, контейнерная установка, бы- стрый монтаж / Modular, contain- erized installation, quick installation	Модульная, контей- нерная установка, быстрый монтаж / Modular, contain- erized installation, quick installation	
Стоимость / Cost	Высокая (доро- гое изготовле- ние, монтаж) / High (expensive manufacturing, installation)	Высокая (метал- лоемкость, круп- ногабаритность) / High (metal intensi- ty, large dimensions)	Умеренная (про- стота конструкции, модульность) / Moderate (simplicity of design, modularity)	Умеренная (конструк- ция более сложная чем ортогональная турбина) / Moderate (de- sign more complex than orthogonal turbine)

осуществлять с использованием небольших вакуумных насосов для первоначального запуска установки [2].

Без создания сосредоточенного перепада уровня воды на небольших равнинных реках со средними скоростями течения не выше 2 м/с за счет только лишь скоростного напора невозможно получение на свободно-поточных установках значительных мощностей. Поэтому в качестве объектов для разрабатываемого ряда гидроагрегатов на равнинных реках следует рассматривать также новые или старые существующие водохранилища различного целевого назначения, имеющие плотины с напорами до 3-7 м, и водосбросные сооружения, на которых отсутствуют микро-ГЭС или которые существовали ранее и требуется их восстановление. При этом возможна работа как на локального потребителя, так и на сеть [11]. В Европейской части России особенно много подобных объектов.

В России имеется потребность в микро-ГЭС, являясь экономически и технически целесообразной. Она определяется ключевыми факторами: наличием масштабной неиспользуемой гидротехнической инфраструктуры и растущим запросом потребителей на распределенную и рентабельную генерацию. Удовлетворение этой

потребности требует формирования программы развития низконапорной микрогидроэнергетики, включающей в себя развитие новых технологий в реализации эффективных низконапорных микро-ГЭС. Реализация такого подхода позволит превратить микро-ГЭС в массовый инструмент обеспечения энергетической устойчивости и экономического роста страны.

Схемы микро-ГЭС с ортогональными турбинами такие же, как общеизвестные схемы, применяемые в гидроэнергетическом строительстве с прямоточными турбинными камерами осевых турбин, – например, малыми рукавными ГЭС. Отличие низконапорных микро-ГЭС по сравнению с рукавными ГЭС с напорами от 10 м и выше заключается в том, что при низких напорах с ортогональными турбинами для получения необходимых мощностей требуются достаточно большие расходы воды.

Потребляемые расходы воды при расчетном напоре 2 м, с учетом КПД энергоблока, составляют для мощностей ряда 10, 30 и 60 кВт приблизительно 0,9; 2,7; 5,4 м³/с соответственно. Скорость потока в подводящем трубопроводе должна быть не более 2,0 ÷ 2,5 м/с. При более высоких скоростях течения существенно увеличиваются потери напора на входе в трубопровод,

изгибах, расширениях и сужениях трубопровода, на задвижках и т.п., а также потери по длине [9, 10, 12]. При таком подходе достигается достаточно высокая степень унификации основных элементов типового ряда микро-ГЭС и удовлетворяются требования технического задания по условиям доставки и монтажа в труднодоступные районы с применением небольших грузоподъемных механизмов.

Выводы

Комплексный анализ технических решений для низконапорной микро-гидроэнергетики подтвердил ее значительный потенциал в качестве надежного источника для децентрализованного энергоснабжения. Ключевой проблемой отрасли остается эффективное преобразование энергии при переменных и ультранизких напорах (менее 3 м), когда классические гидроагрегаты демонстрируют падение КПД [12, 13].

Возникает новая инновационная ниша гидроэнергетики, где используются портативные ГЭС с ортогональной турбиной, с разным диапазоном мощностей, разными компоновочными решениями: деривационная, на существующих гидроузлах, контейнерная, бесконтейнерная. Главным в данной концепции развития является

унифицированность всех деталей, узлов и возможность быстрого монтажа и демонтажа. Это делает малую гидроэнергетику более конкурентоспособной для дальнейшего развития. Натурные испытания микро-ГЭС с ортогональной турбиной на Хоробровском гидроузле доказали принципиальную работоспособность и конкурентоспособность подхода [2, 3].

Ключевым достижением является подтверждение возможности модульной интеграции энергоблока в существующий гидроузел в течение нескольких дней, что кардинально снижает капитальные затраты и сроки реализации проектов по сравнению с традиционным строительством. Использование в качестве рабочего гидроагрегата геликоидной турбины Горлова в качестве альтернативы представляет значительный интерес и требует дальнейших натурных испытаний.

Низконапорная микрогидроэнергетика обладает значительным потенциалом для превращения в надежный экономичный и экологичный источник базовой энергии для значительного количества удаленных и изолированных объектов по всей России [12]. Это делает ее конкурентоспособной в качестве возобновляемого источника энергии [13, 14].

Список использованных источников

1. Kougias, Ioannis & Aggidis, George & Avellan, François & Deniz, Sabri & Lundin, Urban & Moro, Alberto & Muntean, Sebastian & Novara, Daniele & Pérez-Díaz, Juan & Quaranta, Emanuele & Schild, Philippe & Theodossiou, Nicolaos. (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 113. 10.1016/j.rser.2019.109257
2. Крылов А.П., Бакштанин А.М. Новые концепции в развитии микро- гидроэнергетики. Гидравлика в напорных водоводах микро-ГЭС // Природобустройство. 2017. № 5. С. 8-12.
3. Бакштанин А.М., Крылов А.П., Беглярова Э.С. Инвестиционная привлекательность приливной энергетики и факторы, определяющие ее развитие в мире // Природобустройство. 2021. № 2. С. 50-57. EDN: HLHMMF
4. Зубарев М.А. Экономическая целесообразность использования микро-ГЭС в различных регионах России // Экономика и парадигма нового времени. 2025. № 8 (41).
5. Бакштанин А.М., Крылов А.П., Беглярова Э.С. Экспериментальные исследования модельной и рабочей установки портативной микро-ГЭС с сифонным водоподводом // Природобустройство. 2020. № 3. С. 99-107. EDN: HAONND
6. Экспериментальные исследования микро-ГЭС с сифонным водоподводом // Гидротехническое строительство. 2021. № 3. С. 22-26. EDN: XYIEHY
7. Aggidis G.A., Luchinskaya E., Rothschild R., Howard D.C. The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential, *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35, Iss. 12. Pp. 2632-2638. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.008>
8. Shaun Waters, George A. Aggidis, Over 2000 years in review: Revival of the Archimedes Screw from Pump to Turbine,

References

1. Kougias, Ioannis & Aggidis, George & Avellan, François & Deniz, Sabri & Lundin, Urban & Moro, Alberto & Muntean, Sebastian & Novara, Daniele & Pérez-Díaz, Juan & Quaranta, Emanuele & Schild, Philippe & Theodossiou, Nicolaos. (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 113. 10.1016/j.rser.2019.109257.
2. Krylov A.P., Bakshtanin A.M. New Concepts in the Development of Micro-Hydropower. *Hydraulics in Pressure Conduits of Micro-HPPs // Prirodoobustroystvo*. 2017. No. 5, P. 8-12.
3. Bakshtanin A.M., Krylov A.P., Beglyarova E.S. Investment Attractiveness of Tidal Energy and Factors Determining Its Development Globally // *Prirodoobustroystvo*. 2021. No. 2. P 50-57. EDN: HLHMMF
4. Zubarev M.A. Economic feasibility of using micro-hydroelectric power plants in various regions of Russia // *Economy and paradigm of the new time*. 2025. No. 8 (41). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-tselesoobraznost-ispolzovaniya-mikro-ges-v-razlichnyh-regionah-rossii>.
5. Bakshtanin A.M., Krylov A.P., Beglyarova E.S. Experimental studies of a model and working installation of a portable micro-hydroelectric power plant with a siphon water supply // *Prirodoobustrojstvo*. 2020. No. 3. EDN: HAONND
6. Experimental studies of micro-hydroelectric power plants with a siphon water supply // *Hydrotechnical construction*. Moscow, 2021. No. 3, P. 22-26. EDN: XYIEHY
7. G.A. Aggidis E. Luchinskaya, R. Rothschild, D.C. Howard, The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential, *Renewable Energy*, Volume 35, Issue 12, 2010, Pages 2632-2638, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.008>

Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 51. Pp. 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.028>

9. Jayaram V. & Bavanish B. (2022). Design and analysis of gorlov helical hydro turbine on index of revolution. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47. 10.1016/j.ijhydene.2022.07.181.

10. Aiming Zhang, Sen Liu, Yong Ma, Chao Hu, Zhengyu Li. Field tests on model efficiency of twin vertical axis helical hydrokinetic turbines, *Energy*. 2022. Vol. 247. P. 123376. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123376>

11. Chalaca, Andrés & Velásquez, Laura & Rubio-Clemente, Ainhoa & Chica, Edwin. (2024). Design and Optimization of a Gorlov-Type Hydrokinetic Turbine Array for Energy Generation Using Response Surface Methodology. *Energies*. 17. 4870. 10.3390/en17194870

12. Juliana Guerra, Laura Velásquez, Ainhoa Rubio-Clemente, Leyla Jaramillo, Edwin Chica, Design and optimization of a siphon turbine using the response surface methodology, *Results in Engineering*. 2024. Vol. 22. P. 102241. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102241>

13. Историк Б.Л., Шполянский Ю.Б. Перспективы использования ортогональной турбины на низконапорных гидроузлах // *Гидротехническое строительство*. 1993. № 11. С. 28-34

14. Pribadyo P. & Hadiyanto H. & Jamari J. (2020). Study of low head turbine propellers axial flow for use of micro-hydro-power plant (MHP) in Aceh, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*. 1524. 012019. 10.1088/1742-6596/1524/1/012019

Информация об авторе

Алексей Петрович Крылов – соискатель, Генеральный директор – ООО «Центр Судебных Экспертиз и Строительных Исследований «Ригет»; SPIN-код: 1334-3096, AuthorID: 834698; Riget-expert@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 26.01.2026

Поступила после рецензирования / Received 24.05.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 17.06.2026

8. Shaun Waters, George A. Aggidis, Over 2000 years in review: Revival of the Archimedes Screw from Pump to Turbine, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 51, 2015, Pages 497-505, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.028>

9. V. Jayaram & Bavanish B. (2022). Design and analysis of gorlov helical hydro turbine on index of revolution. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47. 10.1016/j.ijhydene.2022.07.181.

10. Aiming Zhang, Sen Liu, Yong Ma, Chao Hu, Zhengyu Li, Field tests on model efficiency of twin vertical axis helical hydrokinetic turbines, *Energy*, Volume 247, 2022, 123376, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123376>

11. Chalaca, Andrés & Velásquez, Laura & Rubio-Clemente, Ainhoa & Chica, Edwin. (2024). Design and Optimization of a Gorlov-Type Hydrokinetic Turbine Array for Energy Generation Using Response Surface Methodology. *Energies*. 17. 4870. 10.3390/en17194870.

12. Juliana Guerra, Laura Velásquez, Ainhoa Rubio-Clemente, Leyla Jaramillo, Edwin Chica, Design and optimization of a siphon turbine using the response surface methodology, *Results in Engineering*, Volume 22, 2024, 102241, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102241>

13. Historian B.L., Shpolyansky Yu.B. Prospects for the use of an orthogonal turbine at low-pressure hydroelectric facilities. 1993. No 11, P. 28-34..

14. Pribadyo P. & Hadiyanto H. & Jamari J. (2020). Study of low head turbine propellers axial flow for use of micro-hydro-power plant (MHP) in Aceh, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*. 1524. 012019. 10.1088/1742-6596/1524/1/012019.

Information about the author

Alexey P. Krylov – the applicant, General Director – Center for Forensic Expertise and Construction Research “Riget” LLC; SPIN-code: 1334-3096, AuthorID: 834698; Riget-expert@yandex.ru

Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

УДК 556.5:627.8

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-99-105>



ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И КОНСТРУКЦИИ ВОДООТВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННО-НАГРУЖЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА (НА ПРИМЕРЕ ПАРКА АКАДЕМИКА САХАРОВА)

Р.В. Калинин¹, Ю.Г. Безбородов², А.А. Ткачев³

¹ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева»; г. Москва, Российская Федерация

^{2,3}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 kalinichenko_rv@mail.ru

² ubezborodov@rgau-msha.ru

³ a.tkachev@rgau-msha.ru

Аннотация. Водный режим территорий населенных пунктов сильно изменен вследствие снижения естественной дренированности. Избыточный поверхностный сток, образовавшийся в результате обустройства территории, требует обоснования по его утилизации. Цель исследований – гидрологическое обоснование параметров и конструктивных решений систем водоотведения, необходимых для обеспечения водного режима парковой территории. Произведен расчет параметров и проектных решений дренажной системы парка академика Сахарова, а также продемонстрирована необходимость всестороннего подхода к техногенно-загруженным местам. После анализа природно-климатических и технических условий разработана методика расчета для параметров закрытой дренажной сети. В результате моделирования были установлены места закладки дренажа и подтверждено, что система справилась с задачей утилизации поверхностного стока. Разработана корректная методика расчета, учитывающая как ливневый поверхностный сток, так и инфильтрационно-дренажные процессы в грунте. Внедрение закрытого дренажа согласуется с рекомендациями для городских парков и обеспечивает долгосрочный эффект без негативных воздействий на экосистему.

Исследования выполнены в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16.06.2025 г.).

Ключевые слова: гидрологический расчет, водный режим, грунтовые воды, система водоотведения

Формат цитирования: Калинин Р.В., Безбородов Ю.Г., Ткачев А.А. Гидрологическое обоснование параметров и конструкции водоотводящей системы в условиях техногенно-нагруженной территории г. Санкт-Петербурга (на примере парка академика Сахарова). Природообустройство. 2026;Т.19(3):99-105. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-99-105>

Scientific article

HYDROLOGICAL JUSTIFICATION OF PARAMETERS AND DESIGN OF THE WATER DISCHARGE SYSTEM IN THE CONDITIONS OF THE TECHNOGENICALLY LOADED TERRITORY OF ST. PETERSBURG (ON THE EXAMPLE OF ACADEMICIAN SAKHAROV PARK)

R.V. Kalinichenko^{1✉}, Yu.G. Bezborodov², and A.A. Tkachev³

¹ Federal Scientific Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute", 119017, Moscow, Russian Federation

² Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127434, Moscow, Russian Federation

¹ kalinichenko_rv@mail.ru

² ubezborodov@rgau-msha.ru

³ a.tkachev@rgau-msha.ru

Abstract. The water regime of populated areas has been significantly altered due to a decrease in natural drainage. The excessive surface runoff generated by the development of the area requires a justification for its disposal. The purpose of this research is to provide a hydrological justification for the parameters and design solutions of drainage systems necessary to ensure the water regime of the park area. The article presents the calculation of the parameters and design solutions for the drainage system of the Sakharov Park, as well as the demonstration of the need for a comprehensive approach to technologically loaded areas. After analyzing the natural, climatic, and technical conditions, a methodology was developed for calculating the parameters of a closed drainage network. The results of the modeling have established the locations of the drainage and confirmed that the system copes with the task of the disposal of surface runoff.

The study was carried out as part of the project to create and develop the Engineering Center at the Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev (agreement № 075-15-2025-543 dated 16.06.2025 r.).

Keywords: hydrological calculation, water regime, groundwater, drainage system

Citation format: Kalinichenko R.V., Bezborodov Yu.G., Tkachev A.A. Hydrological substantiation of the parameters and design of the drainage system in the conditions of the technologically loaded territory of St. Petersburg (on the example of the Sakharov Park. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(3):99-105. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-99-105>

Введение. Современная территория Санкт-Петербурга характеризуется высоким уровнем инженерной насыщенности, интенсивной урбанизацией и значительным антропогенным влиянием на природную среду. В таких условиях возникла проблема нарушения естественного водного режима. Этот режим является весьма уязвимым, что может привести к затоплению и деградации рекреационных ландшафтов. В зеленых зонах (парки, скверы, сады) необходимо организовать стабильную дренажную систему, которая будет разрабатываться на основе гидрологических расчетов, контроля качества воды и мониторинга в режиме реального времени.

Парк имени академика Сахарова является примером типичной насыщенной техногенно-нагруженной территории, осложненной неблагоприятными гидрологическими факторами – такими, как высокий УГВ (уровень грунтовых вод), слабопроницаемость грунта, отсутствие поверхностного стока и значительное количество подземных инженерных систем. Его расположение

на публичной кадастровой карте [11] представлено на рисунке.

Актуальность темы обусловлена влиянием разработки водоотводящей системы, учитывающей местные гидрологические условия и техногенную нагрузку. Она является не только инженерной необходимостью, но и важным шагом в обеспечении устойчивого развития городской среды, сохранения зеленых зон и адаптации к климатическим условиям.

Цель исследований: гидрологическое обоснование параметров и конструктивных решений систем водоотведения, необходимых для обеспечения водного режима парковой территории.

Задачи:

1. Проанализировать гидрологический режим и связь климатических факторов с ним.
2. Оценить техногенную нагрузку местности.
3. Произвести гидравлические расчеты и обосновать параметры водоотводящей системы.
4. Предложить конструктивные решения по созданию системы для отвода воды.

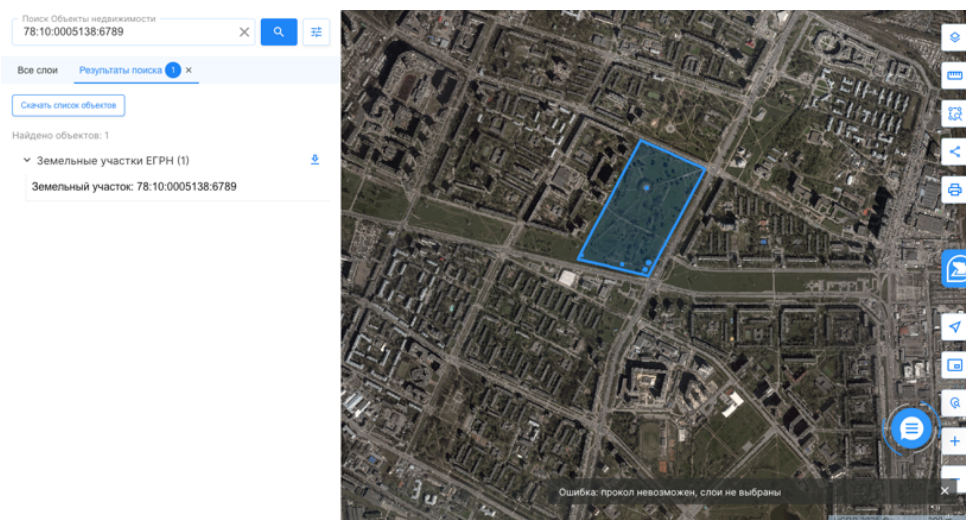


Рис. Объект исследований на публичной кадастровой карте
Fig. Object of research on the public cadastral map

Материалы и методы исследований.

Под техногенно-нагруженными территориями подразумеваются участки земли, где значительно преобладал в действии антропогенный фактор: городские кварталы, промышленные площадки, парки на засыпанных грунтах и т.д. Гидрологический режим на таких местностях отличается от природного. Во-первых, уменьшаются естественные поглощения дождевых талых вод почвы ввиду высокого процента водонепроницаемых покрытий – например, асфальта. Зачастую это приводит к увеличению поверхностного стока и риска скопления воды на поверхности. Во-вторых, деформированы рельеф и дренаж: отсутствие естественных водотоков и дренирующих ландшафтных элементов нарушает отток, и вода остается в понижениях. В-третьих, уровень грунтовых вод на урбанизированных территориях часто выше за счет техногенных факторов: утечек из водопроводных и канализационных сетей, перетоков с поливных систем.

Исследования, проведенные в Санкт-Петербурге, показывают, что в скважинах, удаленных от коммунальных сетей на десятки метров, все равно имеются превышения грунтовых вод, что свидетельствует о подпитке из коммуникаций. Как итог, климатический фактор в условиях города проявляется более отчетливо: выпавшие осадки при отсутствии зеленых зон быстро формируют паводки, а в холодное время промерзание грунта создает водонепроницаемый слой льда, который не позволяет впитывать талую воду [3, 10, 13].

На исследуемой территории парка сформировалась устойчивая тенденция застоя воды ввиду следующих условий: отсутствие естественной дренирующей сети, наличие микропонижений

в рельефе, слабая инфильтрационная способность верхних грунтов, отсутствие вертикальной планировки и обширные ненамокаемые покрытия дорожек и площадок. Совокупность этих факторов приводит к тому, что осадки долго остаются на поверхности, вызывая заболачивание [14].

Территория пересекается с линиями электропередач (ЛЭП) различного класса напряжения, подземными сетями связи, водопроводами, канализационными коллекторами и газопроводами. Эти объекты накладывают большие ограничения на размещение элементов водоотводящей системы и требуют применения бестраншейных или большой глубины закладки решений.

Инженерно-геологическими условиями площадки является совокупность характеристик грунтового основания и подземной гидросферы, которые влияют на проектирование дренажной системы. К таким характеристикам относятся геологическое строение, типы грунтов, уровни грунтовых вод и их колебания, глубина сезонного промерзания, склонность грунтов к пучению, категория сложности инженерно-геологических условий и др. Эти пункты важны при обосновании параметров водоотвода [3, 8, 14].

Нормативными документами устанавливаются критерии оценки гидрогеологических условий. Например, по СП 47.13330.2012 территориям присваивается категория сложности – от простых (I) до сложных условий (III), учитывающая неоднородность грунтов и непредсказуемость водного режима. Если рассматривать это в контексте дренажного проектирования, то также важной становится норма осушения: минимально допустимая глубина осушения обычно принимается за 1 м от поверхности (согласно СП 116.13330.2012 для обжитых территорий).

Если же естественный уровень воды выше, нужно предусмотреть мероприятия по его понижению, чтобы в дальнейшем обеспечить устойчивость фундаментов и удобство использования территории [7, 8].

Инженерно-геологические изыскания, проведенные в 2018-2019 гг., отнесли условия парка к II категории сложности. Геологический разрез участка до глубины 5 м включает в себя насыпные техногенные грунты, подстилаемые природными четвертичными отложениями. В основном выделено 7 инженерно-геологических элементов (ИГЭ), которые чередуются по вертикали и площади участка:

1. ИГЭ-1: насыпанный грунт (слежавшиеся супеси и пески с включениями строительного мусора и органики). Мощность насыпи – до 2,3 м; коэффициент фильтрации (K) $\approx 0,26$ м/сут. Эти грунты относительно проницаемы, но неравномерны.

2. ИГЭ-2: мелкий песок средней плотности, влажный, водонасыщенный. Мощность слоя – до 4,0 м; коэффициент фильтрации (K) $\approx 0,84$ м/сут.; хорошо фильтрующий горизонт.

3. ИГЭ-3: пылеватый песок с прослоями супеси, влажный, насыщенный; коэффициент фильтрации (K) $\approx 0,56$ м/сут.

4. ИГЭ-4: тяжелый пылеватый суглинок (полусвязный грунт), текучепластичный, ленточный, с прослоями глинистыми. Коэффициент фильтрации не указан, но для таких грунтов он, как правило, весьма мал.

5. ИГЭ-5: пылеватая супесь (легкий глинистый грунт) с гравием; пластичная. Фильтрация не ограничена.

6. ИГЭ-6: легкий пылеватый суглинок, полутвердый, с примесью гальки; малопроницаемый грунт.

7. ИГЭ-7: локальные линзы пылеватой супеси тиксотропной (наблюдались в отдельных скважинах).

Из перечисленных слоев наиболее водопроницаемыми являются песчаные ИГЭ (2 и 3) и верхние насыпные (1), тогда как суглинки и супеси глубже способны выступать в роли водоупоров [10, 14].

Уровень грунтовых вод фиксируется на глубине 0,3-2,8 м, при этом сезонный подъем может достигать 0,7 м. Участок относится к категории сезонно-подтапливаемых территорий (СП 11-105-97). Это означает, что любые системы водоотведения должны учитывать высокое положение зеркала подъемных вод и обеспечивать норму осушения – 1 м [8].

Проектирование водоотводящей системы основывается на гидрологических расчетах, которые включают в себя определение расчетного поверхностного стока и оценку необходимого дренажного потока из грунта. Методология таких расчетов в городских условиях базируется на нормах и рекомендациях СНиП, СП, методики Минстроя РФ.

Для площади 23,03 га: суточный объем талых вод при 1% обеспеченности равен 5730 м^3 ; суточный расход – $66,3 \text{ л/с}$. Эти значения близки к лимиту городского коллектора (80 л/с) [2, 4, 6, 14].

Гидравлический расчет сетей водоотведения поверхностных сточных вод расходов в сетях водоотведения, отводящих сточные воды с санитарных территорий и площадок предприятий, следует определять методом предельных интенсивностей по формуле:

$$Q_r = \frac{Z_{mid} \cdot A^{1,2} \cdot F}{t_r^{1,2n-0,1}}, \text{ л/с}, \quad (1)$$

где F – расчетная площадь стока (23,02 га); Z_{mid} – среднее значение коэффициента, характеризующего поверхность бассейна стока (0,11); A и n – параметры, характеризующие, соответственно, интенсивность и продолжительность дождя для конкретной местности (при $n = 0,48$); t_r – расчетная продолжительность дождя, равная продолжительности протекания поверхностных вод по поверхности и трубам до расчетного участка, мин [12].

Чтобы рассчитать параметр A , используем следующую формулу:

$$A = q_{20} \cdot 20^n \left(1 + \frac{\lg P}{\lg m_r} \right)^\gamma, \quad (2)$$

где q_{20} – интенсивность дождя, л/с на 1 га, для данной местности продолжительностью 20 мин при $P = 1$ год ($60 \text{ л/с} \cdot \text{га}$); m_r – среднее количество осадков за год, принимаемое по данным СП 32.13330.2018 (120 мм); P – период однократного превышения расчетной интенсивности дождя (0,4 года); n – показатель степени (0,48); γ – показатель степени (1,33) [13].

Подставим значения в формулу и получим:

$$A = 60 \text{ л/с} \cdot \text{га} \cdot 20^{0,48} \left(1 + \frac{\lg 1}{\lg 120} \right)^{1,33} = 190,52. \quad (2.2)$$

Расчетную продолжительность протекания дождевых вод по поверхности и трубам до расчетного участка (створа) следует определять по формуле:

$$t_r = t_{con} + t_{can} + t_p, \text{ мин}, \quad (3)$$

где t_{con} – продолжительность протекания дождевых вод до уличного лотка или при наличии дождеприемников в пределах квартала до уличного коллектора (время поверхностной концентрации), 5 мин; t_{can} – расчетная скорость течения по трубам рассчитываемого створа (при отсутствии их в пределах квартала), мин; t_p – расчетная скорость течения на участке, мин [12].

Найдем расчетную скорость течения по трубам рассчитываемого створа по следующей формуле:

$$t_{can} = 0,021 \sum \frac{l_{can}}{v_{can}}, \text{ мин}, \quad (4)$$

где l_{can} – общая длина проектируемых лотков (1000 м); v_{can} – средняя скорость потока воды (0,75 м/с из расчета среднего уклона лотка 0,005, диаметра лотка 200 мм и его заполненности 30-70%); t_p – расчетная скорость течения на участке, мин [12].

Подставим значения в формулу:

$$t_{can} = 0,021 \sum \frac{1000 \text{ м}}{0,75 \text{ м/с}} = 28 \text{ мин.} \quad (4.1)$$

Найдем расчетную скорость течения на участке при помощи по формуле:

$$t_p = 0,017 \sum \frac{l_p}{v_p}, \text{ мин}, \quad (5)$$

где l_p – длина участков лотков (200 м); v_p – расчетная скорость течения на участке (1,25 м/с – расчетная скорость течения на участке v_p – определялась по номограмме при уклоне поверхности земли 0,005 и диаметре 400 мм):

$$t_p = 0,017 \sum \frac{560 \text{ м}}{1,25 \text{ м/с}} = 7,6 \text{ мин.} \quad (5.1)$$

Подставим значения в формулу:

$$t_r = 5 + 28 + 7,6 = 35,72 \text{ мин.} \quad (3.1)$$

Наконец, подставим все полученные числа в основную формулу гидравлического расчета:

$$Q_r = \frac{0,11 \cdot 190,52^{1,2} \cdot 23,02 \text{ га}}{35,72^{1,2 \cdot 0,48-0,1}} = 251,32 \frac{\text{л}}{\text{с}}. \quad (1.1)$$

Теоретический расход поверхностных сточных вод для природно-климатических условий с территории парка (23,02 га) составляет: $Q_r = 251,32$ л/с. Это число превышает возможности естественного водоотведения более чем в 3 раза. По такому же принципу, изменяя число площади на 28,72 га, но не меняя формул, подсчитаем теоретический расход поверхностных сточных вод для природно-климатических условий с площади водосбора, на которой расположен участок проектирования парка, и получим: $Q_r = 313,55$ л/с.

Результаты и их обсуждение. Расчеты гидрологического цикла для парка академика Сахарова производились с использованием описанной методики, основанной на нормативах.

С учетом почти полной площади впитывающего покрытия парка рассчитан потенциальный расход, но модель показала, что только малая часть будет выклиниваться на поверхность, а большая часть уйдет в грунт. Однако такой сток мог возникнуть при промерзшем или перенасыщенном грунте, поэтому система должна учесть и его. Расчетные максимальные расходы для

отдельных участков, до 16,5 л/с поверхностного стока, использовались при проверке работоспособности элементов системы осушения (водоприемников) [4, 14].

На основании расчетов система должна обеспечивать сбор поверхностных вод с покрытий и газонов, дренирование верхнего водоносного горизонта, устойчивый самотечный сток, фильтрационную разгрузку при подъеме уровня грунтовых вод и обход охранных зон, ЛЭП и подземных коммуникаций.

Самым эффективным методом водоотведения будет являться закрытая дренажная система, так как она не нарушает эстетический облик и ландшафт территории, обеспечивает необходимую норму осушения 1 м, имеет большой срок службы, позволяет эффективно работать на глубоком уровне грунтовых вод, снижает эксплуатационные нагрузки и обеспечивает равномерное осушение больших площадей.

Для подземного дренажа произведен отдельный расчет:

1. Задана планируемая схема – система равномерно распределенных горизонтальных дрен по всей площади парка.

2. Приняты интенсивность просачивания (W) за 0,00246 м/сут., длина дрены (L) за 100 м и ряд пробных расстояний между дренами.

3. Вычислен модуль дренажного стока (q) для разных ИГЭ.

4. Просуммированы вклады от всех участков в формирование стока.

В результате получено, что общий расход грунтовых вод со всей территории парка оценивается как $\approx 18-20$ л/с. Этот расход является тем стоком, который должен уходить в дренажную сеть во время высокого стояния грунтовых вод. Он гораздо меньше поверхностного расхода при ливневых осадках, однако действует более длительно. Данный расход лег в основу гидравлического расчета дрен: было показано, что при уклонах (i) 0,005 трубы диаметром 150 мм способны пропустить до 15-20 л/с и будут работать неполным сечением ($h/d \leq 0,3$).

На основе гидрологических расчетов определены ключевые параметры водоотводящей системы: глубина заложения – 1,1-1,3 м; расстояние между дренами, рассчитываемое по формуле несовершенного дренажа, – 20-40 м; диаметр дренажных труб – 110-160 мм; материал ПНД – гофрированный; коллекторные линии – Ø200-315 мм [5, 14]. Система должна избегать пересечения охранных зон, использовать бестраншейные методы (если необходимо), быть защищенной от агрессивных грунтовых вод.

Выводы

Гидрологическое обоснование параметров и проектных решений дренажной системы парка имени академика Сахарова наглядно демонстрирует необходимость комплексного подхода к техногенно-загруженным территориям. Был проведен анализ природных и технических условий включая климатический режим, измененную гидрологию города и особенности почвы и подземных вод территории. Это позволило разработать корректную методику расчета, учитывающую как ливневый поверхностный сток, так и инфильтрационно-дренажные процессы в грунте. На основании произведенных расчетов определены оптимальные параметры закрытой дренажной сети: глубина дренажной сети составляет $\approx 1,2$ м; среднее расстояние между дренами ≈ 30 м; уклон – 0,005; диаметр трубы ≈ 175 мм. Результаты расчетного моделирования подтвердили,

что с такими параметрами система справляется со своей задачей, поскольку предотвращается скопление воды на поверхности, грунтовые воды опускаются до безопасного уровня и достигается норма осушения не менее 1 м.

Важно отметить, что заложенные в проект решения соответствуют требованиям действующих нормативных актов и основаны на передовой практике в области гидротехнического строительства. В частности, внедрение закрытого дренажа согласуется с рекомендациями для городских парков и обеспечивает долгосрочный эффект без негативных воздействий на экосистему. Кроме того, данный проект служит примером возможности сосуществования инженерных сооружений с природной средой: правильное планирование позволяет скрыть дренажную инфраструктуру и сохранить ландшафтный облик местности.

Список использованных источников

1. РМД 40-20-2016. Устройство сетей водоснабжения и водоотведения в Санкт-Петербурге: нормативно-технический документ / Правительство Санкт-Петербурга. СПб., 2016. URL: РМД 40-20-2016 Санкт-Петербург. Устройство сетей водоснабжения и водоотведения в Санкт-Петербурге – docs.cntd.ru (дата обращения: 12.02.2026)
2. Методика расчета объемов организованного и неорганизованного дождевого, талого и дренажного стока в системы коммунальной канализации. СПб.: Экология и право, 2000.
3. Методика расчета гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий: СТП ВНИИГ 210.01. НТ-05 / ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». СПб., 2005. Official website. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293810/4293810427.pdf?ysclid=mqkroqg2aa273843229> (accessed February 16, 2026).
4. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты: Методическое пособие. М.: Минстрой РФ, 2015
5. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения: актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. М.: Минстрой России, 2018
6. Росстрой. ФГУП «НИИ ВОДГЕО»: Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий... (пример расчета количественных характеристик поверхностного стока). М., 2006. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293841/4293841863.pdf?ysclid=mqkrs51qb8827430859> (accessed February 14, 2026).
7. СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления: актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85. М.: Минстрой России, 2017.
8. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения: актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. М.: Минрегион России, 2012
9. СНиП 2.07.01-89*. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений: с изм. № 1. 2000. М.: Госстрой СССР, 1989
10. Отчет Севзапгеология. Гидрогеологические, инженерно-геологические и геоэкологические исследования

References

1. RMD40-20-2016. Installation of water supply and sanitation networks in St. Petersburg: a regulatory and technical document / Government of St. Petersburg. St. Petersburg, 2016. Official website. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456019724?ysclid=mqkrgyfx2376384108> (accessed February 12, 2026).
2. Methodology for calculating the volume of organized and unorganized rain, snowmelt and drainage runoff in municipal sewerage systems. St. Petersburg: Ecology and Law, 2000.
3. Methodology for calculating the hydrological characteristics of technogenically loaded territories: STP VNIIG 210.01. NT-05 / JSC VNIIG named after B.E. Vedenev. – St. Petersburg, 2005. Official website. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293810/4293810427.pdf?ysclid=mqkroqg2aa273843229> (accessed February 16, 2026).
4. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. Methodological guide: Recommendations for calculating systems for collecting, diverting and purifying surface runoff from residential areas, enterprise sites and determining the conditions for its release into water bodies. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2015.
5. SP 32.13330.2018. Sewage system. Outdoor networks and structures: updated edition of SNiP 2.04.03-85. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2018.
6. Rosstroy. FSUE "VODGEO Research Institute". Recommendations for calculating systems for collecting, diverting and cleaning surface runoff from residential areas... (example of calculating quantitative characteristics of surface runoff). Moscow, 2006. Official website. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293841/4293841863.pdf?ysclid=mqkrs51qb8827430859> (accessed February 14, 2026).
7. SP 104.13330.2016. Engineering protection of the territory from flooding and flooding: updated edition of SNiP 2.06.15-85. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2017.
8. SP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Main provisions: updated edition of SNiP 22-02-2003. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2012.
9. SNiP 2.07.01-89*. Urban planning. Planning and building of urban and rural settlements: as amended No. 1, 2000. Moscow: Gosstroy of the USSR, 1989.

на участке ул. Антоновская – ул. Ключевая (Калининский район Санкт-Петербурга) с целью разработки мер по ликвидации подтопления. СПб., 2002

11. Портал пространственных данных «Национальная система пространственных данных». URL: https://nspd.gov.ru/map?thematic=PKK&zoom=14.482511140393079&coordinate_x=3385922.3319840273&coordinate_y=8394532.081593554&baseLayerId=36345&theme_id=1&is_copy_url=true (дата обращения: 06.12.2025)

12. *algoritm_sp.pdf*. URL: https://neodrain.ru/static/algoritm_sp.pdf (дата обращения: 06.12.2025)

13. Стафийчук И.Д., Безбородов Ю.Г., Хисамов Р.Р., Донгузов К.А. Научно-правовая основа и практика территориального планирования. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2025. 254 с. EDN: JGQWIF

14. Калининченко Р.В., Семенова К.С., Каблуков О.В. Водопонижение и водоотлив как способ предварительного осушения территории парка академика Сахарова г. Санкт-Петербурга // Природообустройство. 2022. № 5. С. 36-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-36-44. EDN: YQYSMC

Информация об авторах

Роман Владимирович Калининченко, канд. с.-х. наук, доцент; ORCID: 0000-0003-3136-8468; SPIN-код: 2750-7629; AuthorID: 891572; kalinichenko_rv@mail.ru

Юрий Германович Безбородов, д-р техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0001-5293-2342; SPIN-код: 2247-1765; AuthorID: 271273; ubezborodov@rgau-msha.ru

Александр Анатольевич Ткачев, канд. техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-7562-514X; SPIN-код: 3462-8289; AuthorID: 682772; a.tkachev@rgau-msha.ru

Вклад авторов

Р.В. Калининченко – анализ материалов исследований, подбор литературы, проведение расчётов
Ю.Г. Безбородов – подбор литературы и подготовка заключения
А.А. Ткачев – обоснование методики проведения исследований, оформление статьи

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Поступила в редакцию / Received 25.02.2026

Поступила после доработки и рецензирования / Received 19.05.2026

Принята к публикации / Accepted 29.05.2026

10. Sevzapgeologiya report. Hydrogeological, engineering, geological and geoecological studies at the site of Antonovskaya St. – Klyuchevaya St. (Kalininsky district of St. Petersburg) in order to develop measures to eliminate flooding. St. Petersburg, 2002.

11. Spatial data portal “National Spatial Data System” URL: https://nspd.gov.ru/map?thematic=PKK&zoom=14.482511140393079&coordinate_x=3385922.3319840273&coordinate_y=8394532.081593554&baseLayerId=36345&theme_id=1&is_copy_url=true (accessed: 06.12.2025).

12. *algorithm_sp.pdf* URL: https://neodrain.ru/static/algorithm_sp.pdf (date of request: 06.12.2025).

13. Nauchno-pravovaya osnova i praktika territorialnogo planirovaniya / I.D. Stafyichuk. Yu.G. Bezborodov. R.R. Khisamov. K.A. Donguzov. Moskva: Rossiyskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet. 2025. 254 s.

14. Kalinichenko R.V. Dewatering and drainage as a method of preliminary drainage of the territory of Academician Sakharov Park in St. Petersburg / R.V. Kalinichenko, K.S. Semenova, O.V. Kablukov // Prirodobustroystvo. 2022. No. 5. – P. 36-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-36-44. EDN: YQYSMC

Information about the authors

Roman V. Kalinichenko, CSs (Agro), associate professor, ORCID: 0000-0003-3136-8468; SPIN-code: 2750-7629, AuthorID: 891572, kalinichenko_rv@mail.ru

Yuri G. Bezborodov, DSs (Eng), associate professor, associate professor, ORCID: 0000-0001-5293-2342; SPIN-code: 2247-1765, AuthorID: 271273, ubezborodov@rgau-msha.ru

Alexander A. Tkachev, CSs (Eng), associate professor, ORCID: 0000-0002-7562-514X; SPIN-code: 3462-8289, AuthorID: 682772, a.tkachev@rgau-msha.ru

Author's contribution

R.V. Kalinichenko – analysis of research materials, literature review, performance of calculations
Yu.G. Bezborodov – selection of literature and preparation of the conclusion
A.A. Tkachev – substantiation of the research methodology, design of the article

Оригинальная статья

УДК 556.113.3:628.357.5

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-106-114>

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ МУТНОСТИ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМА ЕЕ ВОДООЧИСТКИ

О.М. Розенталь¹, А.Г. Самбурский²✉^{1,2} Институт водных проблем РАН; г. Москва, Российская Федерация¹ omro3@yandex.ru; ORCID0000-0001-6261-6060² alex-sambursky@yandex.ru; ORCID0009-0004-8051-1173

Аннотация. Цель исследований – разработка методики краткосрочного прогноза мутности природной воды для создания условий оперативного регулирования технологии ее коагуляционно-фильтрационной очистки. Качество природной воды отличается непостоянством, требующим оперативного регулирования режима водоочистки. Эффективным такое регулирование может быть при условии предвидения изменений гидрохимического состава сырой жидкости, требующего анализа и прогноза. Мутность воды определялась при поступлении на водоканалы городов Ангарск, Уссурийск и Хабаровск. В работе использованы автокорреляционный анализ и сезонная декомпозиция данных. Показано, что во всех исследованных случаях временные ряды характеризуются трендами, сезонностью и циклическими компонентами, следовательно, методика прогнозирования должна носить статистический характер. Установлено, что необходимым требованиям отвечает методика программного пакета Prophet, использование которого обеспечивает удовлетворительный прогноз на период, достаточный для превентивного регулирования водоочистки. Рекомендована экстраполяция методики на другие непостоянные показатели состава и свойств природной воды в целях устойчивого водоснабжения.

Ключевые слова: водоподготовка, мутность воды, математическое моделирование, Prophet, временные ряды, сезонная декомпозиция, прогноз качества природной воды

Формат цитирования: Розенталь О.М., Самбурский А.Г. Краткосрочный прогноз мутности природной воды для оперативного регулирования режима ее водоочистки. Природообустройство. 2026;Т.19(3):106-114. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-106-114>

Scientific article

SHORT-TERM FORECASTING OF NATURAL WATER TURBIDITY FOR OPERATIONAL REGULATION OF ITS WATER TREATMENT

O.M. Rozental¹, A.G. Samburskii²✉^{1,2} Institute of water problems of RAS, Moscow, Russian Federation¹ omro3@yandex.ru; ORCID0000-0001-6261-6060² alex-sambursky@yandex.ru; ORCID0009-0004-8051-1173

Abstract. The aim of this study is to develop a methodology for short-term forecasting of natural water turbidity in order to enable prompt regulation of the coagulation-filtration treatment process. The quality of natural water is subject to variability that necessitates operational adjustment of the water treatment regime. Such regulation can be effective only if changes in the hydrochemical composition of the raw water are anticipated through analysis and forecasting. This problem was addressed in relation to the turbidity of water supplied to the water treatment facilities of Angarsk, Ussuriysk, and Khabarovsk. The study employed autocorrelation analysis and seasonal decomposition of the data, which revealed that in all examined cases the time series exhibited trends, seasonality, and cyclical components. Consequently, the forecasting methodology must be statistical in nature. It was established that the methodology implemented in the Prophet software package meets the necessary requirements, providing a satisfactory forecast over a time horizon sufficient for preventive regulation of the water treatment process. The extrapolation of this methodology is recommended for other variable indicators of the composition and properties of natural water to support sustainable water supply

Keywords: water treatment, turbidity of water, mathematical modeling, Prophet, time series, seasonal decomposition, natural water quality forecasting

For citation: Rozental O.M., Samburskii A.G. Short-term forecasting of natural water turbidity for operational regulation of its water treatment. *Prirodoobustrojtvo*. 2026;19(3):106-114. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-106-114>

Введение. Задача устойчивого водопользования закреплена в международных [1, 2] и национальных нормативных документах [3]. Однако ее реализация значительно усложняется в условиях почти повсеместной необходимости предварительного удаления избыточных примесей, состав и свойства которых непрерывно меняются [4]. По этой причине необходимо постоянное регулирование режима водоочистки – например, широко распространенного процесса коагуляции, позволяющего отфильтровать большую часть высокодисперсных частиц из воды. Трудность заключается в том, что коагуляция – многофакторный процесс, зависящий от марки, дозы и концентрации реагентов, характера и длительности перемешивания, температуры, состава и свойств примесей [5-7], поэтому эффективным его регулирование может быть только при условии раннего предупреждения об изменении качества природной воды, прежде всего – ее мутности [8, 9]. Следовательно, актуальной является задача прогноза, позволяющая обосновать выбор реагентов (коагулянтов, флокулянтов) и режима их использования [10, 11].

Цель исследований: разработка методики краткосрочного прогноза мутности природной воды для создания условий оперативного регулирования технологии ее коагуляционно-фильтрационной очистки.

Материалы и методы исследований. Были исследованы временные ряды указанного показателя, полученные с периодичностью контроля ~45 мин измерительным комплексом «КИМ» (рис. 1) [12] на водоканалах городов

Ангарск, Уссурийск и Хабаровск в период 2021-2023 гг.

Для предварительной обработки данных перед началом основного анализа использовался метод фильтрации с удалением членов, соответствующих квантилям 1 и 97%. В рамках работы исследовались как полные временные, так и выборочно укороченные (отрезки в 50 измерений) ряды.

Для исследования структуры временных рядов использовался автокорреляционный анализ как для исходных длинных (ACF до 1000 лагов), так и для укороченных (ACF до 40 лагов) рядов. Дополнительно для укороченных рядов была проведена сезонная декомпозиция с выделением трендов и сезонных компонент.

С учетом проведенных предварительных исследований рассматриваемых временных рядов в целях прогноза было принято использовать библиотеку Prophet, осуществляющую декомпозицию на тренд, сезонность и «праздничные» эффекты [13]. Данный выбор обусловлен тем, что в отличие от классических ARIMA, SARIMA, ARFIMA Prophet устойчив к выбросам и пропускам данных, которые часто наблюдаются при работе на реальных объектах.

Для оценки качества прогноза использовались следующие метрики: MAPE, MAE, RMSE, коэффициент детерминации R^2 . Помимо этого, проводилась проверка остатков модели на нормальность с оценкой асимметрии, эксцесса и индекса перекрытия нормальным распределением, а также тестов Шапиро-Уилка и Д'Агостино-Пирсона [14, 15].

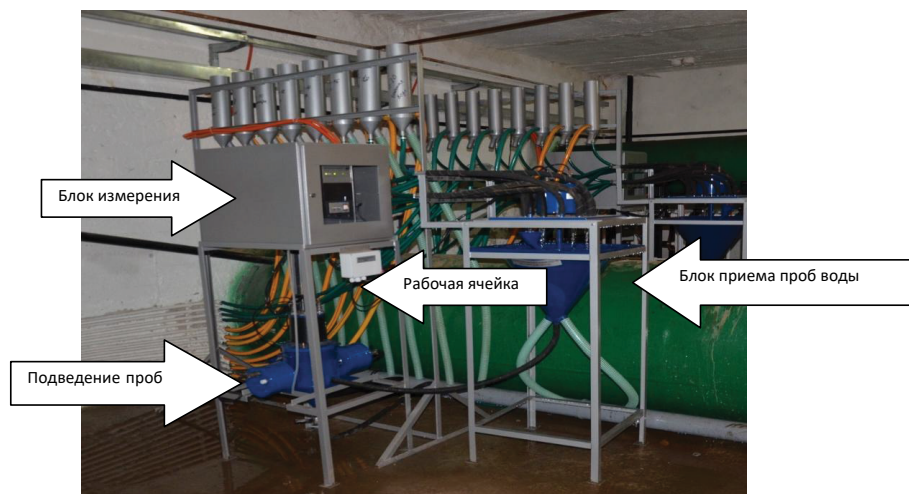


Рис. 1. Схема установки «КИМ»

Fig. 1. «CMM» installation diagram

Результаты и их обсуждение. Из данных рисунка 2 следует, что устойчивого подобию рядов мутности воды до очистки и после нее практически не наблюдается. Из формы этих рядов можно предположить, что службы водоканалов пытались регулировать режим водоочистки. Так, при повышении качества природной воды во второй половине рассматриваемого периода измерений заметным является стремление сохранить уровень мутности после водоочистки, оказавшееся успешным в Хабаровске (рис. 2в) и безуспешным в Ангарске (рис. 2а). В целом же на всех трех водоочистных станциях не удалось обеспечить стабилизацию получаемой мутности и предотвратить регулярные выбросы.

Вывод подтверждают результаты исследований на коротких временных интервалах. Таким является пример изменения мутности воды

до водоочистки и после нее, приведенный на рисунке 3. Как видим, несмотря на постепенный рост мутности воды в Хабаровске утром 6 февраля (рис. 3в), удалось сохранить качество очищенной воды. При этом неожиданное повышение мутности на водоканалах Ангарска и Уссурийска вечером 5 февраля (рис. 3а, б) не сопровождалось повышением эффективности водоочистки.

Результаты сравнения необработанных временных рядов мутности природной и очищенной воды (рис. 2, 3) указывают на важность прогнозирования, которое позволило бы оперативно реагировать не только на постепенное (рис. 3в), но и на неожиданное изменение состава природной воды (рис. 3а, б).

Трудности предвидения резких изменений мутности обусловлены разбросом (вариативностью) временных рядов контролируемых

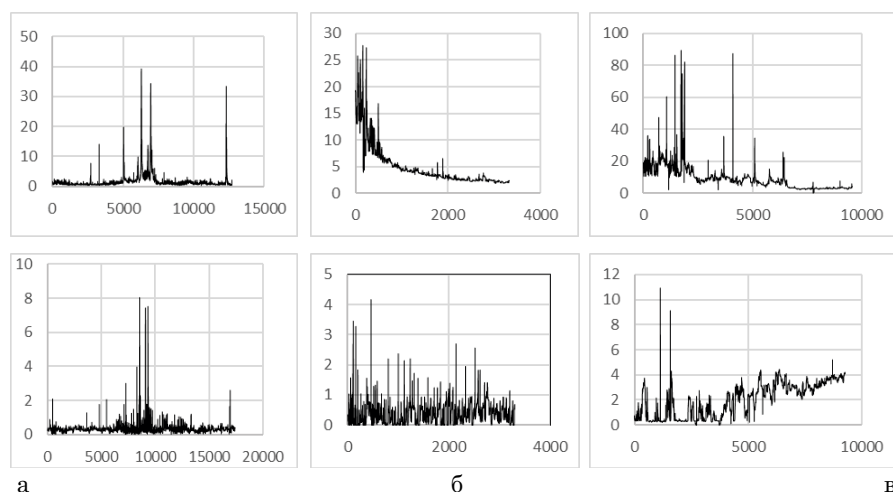


Рис. 2. Сравнение графиков мутности речной и кондиционированной воды в течение года: а – Ангарск; б – Уссурийск; в – Хабаровск (сверху – речная вода, снизу – вода после фильтров)

Fig. 2. Comparison of turbidity graphs of river and conditioned water during the year (a – Angarsk, b – Ussuriysk, c – Khabarovsk). Above is river water, below is water after filters

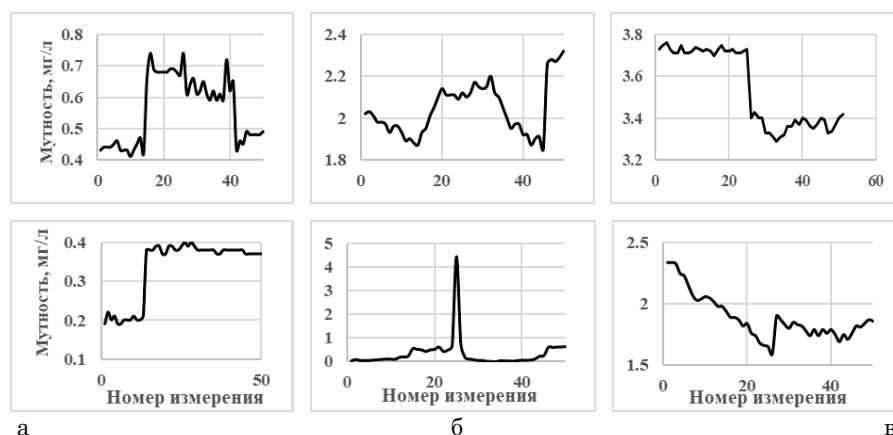


Рис. 3. Сопоставление временных рядов мутности речной (верхний ряд) и кондиционированной (нижний ряд) воды для Ангарска (а), Уссурийска (б), Хабаровска (в) за период 05.02.2023-06.02.2023 гг.

Fig. 3. Comparison of time series of turbidity of river (upper row) and conditioned water (lower row) for Angarsk (a), Ussuriysk (b), Khabarovsk (c) for the period 05.02.2023-06.02.2023

показателей. От характера этой вариабельности, наличия тренда, сезонности, остаточных компонент и других скрытых паттернов зависят точность и надежность используемых методик прогнозирования. Поэтому перед ее выбором был выполнен статистический анализ массивов экспериментальных данных.

Из данных рисунков 2, 3 следует, что экспериментальные ряды в большом количестве содержат резко выделяющиеся нетипичные члены. В гидрохимии они нередко появляются вследствие ошибок оператора. Для повышения достоверности дальнейшего анализа данных такие выбросы целесообразно отфильтровать и получить «стандартизованный» временной ряд. Эта работа была выполнена путем удаления членов из экспериментальных рядов значений мутности, соответствующих квантилям менее 1% и более 97%.

Далее выполнялось исследование структуры временных рядов с помощью автокорреляционного анализа. Типичная автокоррелограмма (ACF) сравнительно длинных рядов приведена на рисунке 4, где на оси абсцисс нанесены значения, связанные с задержкой (лагом). Как видим, наряду с наблюдаемыми деформациями здесь существуют также скрытые многосуточные сезонности и цикличности, которые отслеживаются по пикам разной величины, возникающим на некотором количестве лагов. Следовательно, достоверное прогнозирование на достаточно длинном горизонте без приведения временных рядов к стационарности практически невозможно. Однако стационарный ряд, выделив основные закономерности данных, удалит случайные скачки мутности, что не позволяет своевременно регулировать режим водоочистки. Поэтому были выполнены исследования исходных сравнительно коротких выборок (до 40 ч), достаточных для регулирования режима водоочистки

и являющихся более близкими к стационарному состоянию.

Типичные ACF для коротких выборок приведены на рисунке 5. Как видим, коэффициент корреляции природной воды здесь либо плавно уменьшается (Ангарск), либо испытывает очень слабые колебания (Уссурийск, Хабаровск), указывая на сильную зависимость между прошлыми и будущими значениями временных рядов. Это означает, что на выбранных интервалах времени мутность воды зависит от ее предыдущих значений настолько сильно, что ее среднее значение и стандартное отклонение слабо меняются со временем. При этом коэффициент корреляции кондиционированной воды либо увеличен (Хабаровск), либо затухает (Ангарск), либо быстро спадает, а затем снова растет, образуя один или несколько пиков (Уссурийск). Последнее свидетельствует о неустойчивости тренда, повышенной нестационарности ряда данных с присутствием дополнительной сезонности и о других повторяющихся паттернах.

Приемлемый метод прогнозирования должен быть адаптирован к описанным статистическим закономерностям — в частности, к способности отделять от тренда временных рядов их сезонность, цикличность и остаток, а также анализировать последние по отдельности. В качестве примера подлежащих такому анализу данных на рисунке 6 приведен циклический компонент коротких выборок мутности речной воды, полученный путем декомпозиции рядов данных, в долях от соответствующей трендовой компоненты.

Как видим, ритмика данных для природной и кондиционированной воды различается. Таковы, например, резкое повышение мутности на 5 и 15 минутах часовых периодов или на 3 часа 6-часовых периодов для кондиционированной воды в Ангарске при отсутствии подобных (синхронных) скачков в воде природной или

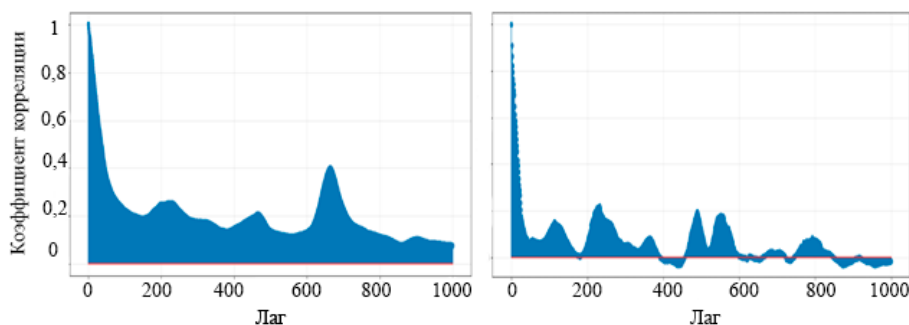


Рис. 4. ACF временных рядов мутности природной (а) и прошедшей фильтрацию (б) воды на водоканале г. Ангарска на период 1000 лагов (красная линия – граница значимости автокорреляции)

Fig. 4. ACF time series of turbidity of natural (a) and filtered (b) water at the water utility of Angarsk for the period of 1000 lags (The red line is the limit of the significance of autocorrelation)

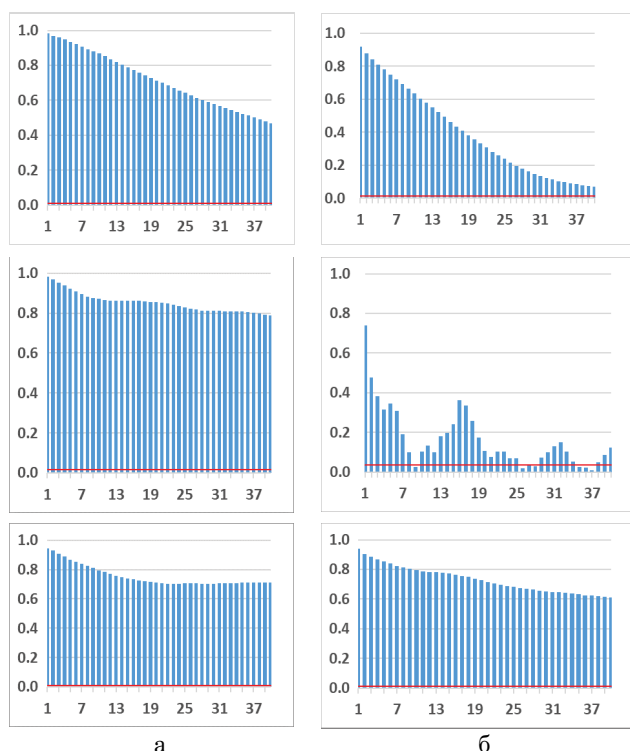


Рис. 5. Коэффициенты корреляции в зависимости от номера лага для Ангарска (верхний ряд), Уссурийска (средний ряд) и Хабаровска (нижний ряд) для природной (а) и кондиционированной (б) воды (горизонтальная линия – с уровнем значимости 0,05; красная линия – граница значимости автокорреляции)

Fig. 5. Correlation coefficients depending on the lag number for Angarsk (upper row), Ussuriysk (middle) and Khabarovsk (lower) for natural (column a) and conditioned (b) water with a significance level of 0.05 (horizontal line) The red line is the limit of the significance of autocorrelation

повышение мутности природной воды в Хабаровске на 4 часа 6-часовых периодов и на 10-12 часах суточных периодов, не сопровождавшихся подобными скачками для воды кондиционированной. В целом же результаты АСФ-анализа и декомпозиции свидетельствуют о сложной структуре вариабельности рядов мутности, что резко ограничивает выбор приемлемой методики достоверного прогнозирования ввиду возможных неожиданных всплесков и флуктуаций [16].

Для достижения цели работы необходима методика статистического прогноза, способная обнаруживать не только тренды, но и неупорядоченные изменения траекторий. Такая методика должна фиксировать точки изменения тренда и выявлять другие сложные закономерности временного ряда, устанавливая долю исторической вариации, которая ожидается в будущем.

Поиск показал, что необходимым требованиям отвечает библиотека прогнозирования Prophet, автоматически анализирующая временные ряды, подобные описанным в данной работе, даже при наличии выбросов и сложных сезонных паттернов.

Для проверки приемлемости метода в практике оперативного регулирования режима водоочистки выбирали несколько интервалов времени, на которых сравнивали фактические и прогнозные значения мутности с использованием исторических данных (50 предыдущих измерений), и на их основе Prophet определял ожидаемые значения. Последние сопоставляли с фактически обнаруженными на том же горизонте планирования. Типичные примеры результатов использования Prophet приведены на рисунке 7. Налицо подобие зависимостей, в случае данных рисунка 7а позволяющее после полуночи ослабить уровень коагуляционно-фильтрационной водоочистки, а под утро повысить или последовательно изменять в случаях, отраженных на рисунке 7б, в).

Поскольку аналогичные ситуации возникали и в большинстве проанализированных случаев, следует вывод о возможности использования исторических (предшествующих) данных о мутности сырой воды для ее удовлетворительного прогноза на период, достаточный для регулирования режима водоочистки. Достоверность этого вывода снижается при увеличении горизонта прогнозирования, что объясняется, естественно, увеличивающейся шириной доверительного интервала.

Колеблемость мутности свойственна и другим показателям состава и свойств природной воды [17], что позволяет рекомендовать использование предложенной библиотеки статистического прогнозирования не только при коагуляционно-фильтрационной обработке, но и для других методов водоочистки, – впрочем, после предварительной оценки качества прогноза, как это продемонстрировано ниже.

Из данных рисунка 7 следует, что расхождение в значениях мутности для реальных и прогнозированных значений составляет сотые единицы показателя; максимальное расхождение, обнаруженное для Ангарска, в ~3:00 (рис. 7а) не превышало 10%. Более детальное определение качества прогнозной модели Prophet на конкретных данных приведено в таблице 1.

Как видим, значения средней относительной (MAPE) и средней абсолютной (MAE) ошибок указывают на определенный разброс прогнозируемых значений, – впрочем, судя по малому MAE,

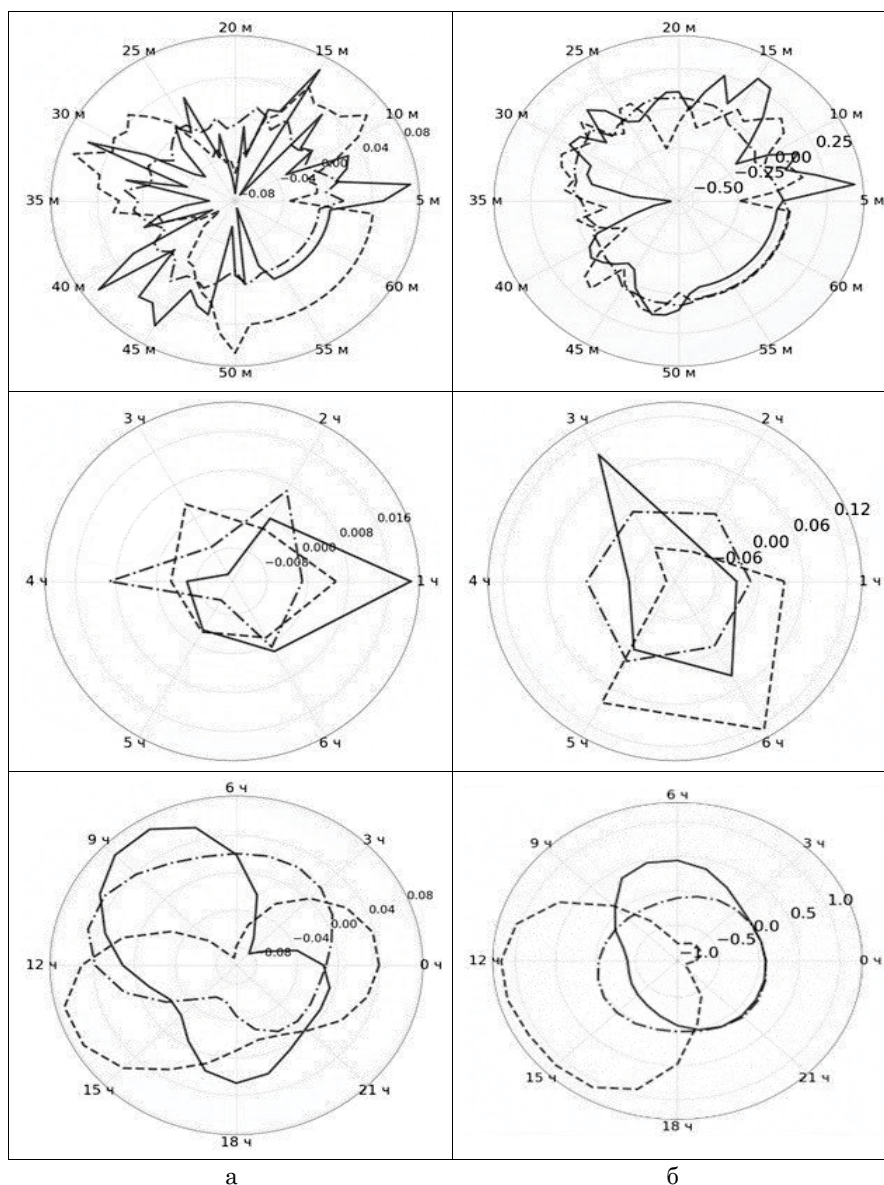


Рис. 6. Диаграммы часовых (верхний ряд), 6-часовых (средний) и суточных периодов (нижний ряд) для сезонности рядов мутности природной (а) и кондиционированной (б) воды водоканалов Ангарска (сплошная линия), Уссурийска (штриховая линия) и Хабаровска (штрих-пунктирная линия)

Fig. 6. Diagrams of hourly (top row), 6-hour (average) and daily periods (bottom row) for the seasonality of turbidity series of natural (a) and conditioned (b) water of water utilities in Angarsk (solid line), Ussuriysk (dashed line) and Khabarovsk (dashed dotted line)

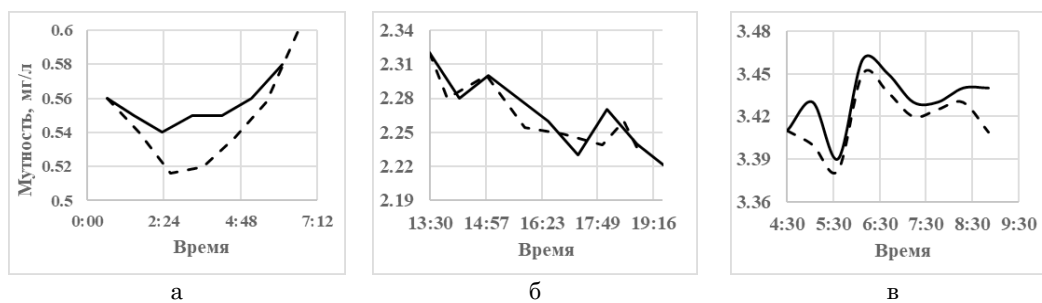


Рис. 7. Фактические (сплошная линия) и прогнозные (пунктирная линия) значения мутности с горизонтом прогнозирования 6 часов для водоканалов Ангарска (а), Уссурийска (б) и Хабаровска (в)

Fig. 7. Actual (solid line) and forecast (dotted line) turbidity values with a forecast horizon of 6 hours for water utilities in Angarsk (a), Ussuriysk (b) and Khabarovsk (c)

незначительный. Среднеквадратичная величина ошибки (RMSE) лишь незначительно превышает MAE, причем близость этих величин указывает на общий характер возникающих ошибок, предположительно связанных с погрешностью измерений. Коэффициент детерминации R^2 в случаях водоканалов Уссурийска и Хабаровска приближается к 1, что еще раз свидетельствует об удовлетворительной точности прогнозирования. Для Ангарска же этот коэффициент понижен, так что прогноз обеспечивает предсказание около 2/3 вариабельности мутности.

Таблица 1. Метрики качества модели

Table 1. Model quality metrics

Показатель / Indicator	Исходная вода / Source water		
	Ангарск / Angarsk	Уссурийск / Ussuriysk	Хабаровск / Khabarovsk
MAPE	6,07%	1,32%	0,50%
MAE	0,0333	0,03	0,02
RMSE	0,0388	0,03	0,03
R^2	0,6796	0,9023	0,9801

Чтобы определить, насколько хорошо выбранная модель описывает данные, был выполнен также анализ «остатков» (разности между спрогнозированным моделью и фактическим значениями) на их нормальность. Из данных таблицы 2 следует, что гипотеза о нормальности отвергалась только для Хабаровска. Было учтено, что тест Шапиро-Уилка часто допускает ложноотрицательные результаты. Поэтому дополнительно использовался статистический тест Д'Агостино-Пирсона, проверяющий, похожа ли форма распределения на нормальное распределение (соответственно знаки «+» и «-»), а также рассчитывался индекс перекрытия нормальным распределением (сравнение площадной функции распределения изучаемого ряда данных с нормальным). Результаты, приведенные в таблице 2, указывают, что при проверке этими методами остатки были нормально распределены. В частности, индекс перекрытия превышал 0,9, что повышает доверие к выполненному статистическому прогнозу.

Таблица 2. Результаты анализа остатков модели на нормальность (+ – распределение соответствует нормальному, – – не соответствует)

Table 2. Results of the analysis of model residues for normality (+ – the distribution corresponds to the normal, – does not conform)

Показатель / Indicator	Исходная вода / Source water			Фильтрованная вода / Filtered water		
	Ангарск / Angarsk	Уссурийск / Ussuriysk	Хабаровск / Khabarovsk	Ангарск / Angarsk	Уссурийск / Ussuriysk	Хабаровск / Khabarovsk
Асимметрия / Asymmetry	0,1793	-0,1390	0,0351	-0,0672	0,2166	-0,3415
Экцесс / Excess	1,8117	3,2293	5,6613	3,0640	2,5097	2,7599
Тест / Test Шапиро-Уилка / Shapiro-Wilk	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)
Тест / Test Д'Агостино-Пирсона / D'Agostino Pearson	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Индекс перекрытия нормальным распределением / Normal distribution overlap iIndex	0,952	0,96	0,918	0,963	0,933	0,934

Выводы

1. Показатели состава и свойств природной воды – такие, как ее мутность, являются непостоянными, что снижает эффективность водоочистки, если она выполняется в стационарном режиме.

2. Изменение режима водоочистки – реальная задача при условии получения информации о предстоящем повышении/снижении контролируемой характеристики качества воды, то есть при условии своевременного и достоверного прогноза.

3. В работе на примере одной из характеристик качества воды – мутности – показано, что массивам экспериментальных данных этой

характеристики качества, исследованной на различных водоканалах, свойственны меняющийся свое направление тренд, сезонность и цикличность. Поэтому достоверный прогноз даже на часовом или суточном горизонтах должен носить статистический характер.

4. Методика такого прогноза, способная выявлять и учитывать сложные временные закономерности в данных с их преобразованием в суперпозиции более простых функций и с установлением доли исторической вариации, которая ожидается в будущем, реализована в программном пакете Prophet и была протестирована в данной работе. Как оказалось, предлагаемый метод прогноза обеспечивает различие величин

фактических и прогнозных данных, не превышающее 10%. Такое соответствие между прогнозом и реальными данными сохраняется в течение ~6 часов, достаточных для регулирования режима системы водоочистки. Эта и ряд других метрик анализа качества позволяет рекомендовать выбранную прогнозную модель для практического использования в регулировании технологических процессов водоподготовки и очистки воды – например, при адаптации метода

к оперативному регулированию коагуляционной обработки.

5. С учетом подобия характера изменчивости рядов мутности и других характеристик состава природной воды предложенный метод прогноза может быть рекомендован для оперативного регулирования не только коагуляционно-фильтрационного процесса, но и других способов водоочистки в целях устойчивого водопользования.

Список использованных источников

1. ISO 24510:2024. Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the assessment and for the improvement of the service to users.
2. ISO 24511:2024. Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the management of wastewater utilities and for the assessment of wastewater service.
3. ГОСТ Р ИСО 46001-2023. Системы менеджмента эффективности водопользования. Требования и руководство по применению. <https://internet-law.ru/gosts/gost/79674/?ysclid=mqt81jnnww0710038418>
4. Драгинский В.Л. Особенности применения коагулянтов для очистки природных цветных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2008. № 1. С. 14-16.
5. Гетманцев С.В. Система выбора эффективных технологий очистки природных вод с применением алюмосодержащих коагулянтов // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 8. С. 4-9.
6. Baxter C.W., Stanley S.J., Zhang Q. (1999). Development of a full-scale artificial neural network model for the removal of natural organic matter by enhanced coagulation. *Aqua*. 48. Pp. 129-136.
7. Gagnon C., Grandjean B.P.A., Thibault J. (1997). Modelling of coagulant dosage in a water treatment plant. *Artif. Intell. Eng.* 11. Pp. 401-404.
8. Бубыр Д.С., Клячкин В.Н. Управление дозами реагентов при очистке питьевой воды // Водоочистка. 2023. № 4. С. 4-13.
9. Гришин Б.М., Бикунова М.В., Сафронов М.А., Титов Е.А. Реагентная обработка поверхностных природных вод алюмосодержащими коагулянтами: Монография. Пенза: ПГУАС, 2016. 140 с.
10. Wu G.D., Lo S.L. (2008). Predicting real-time coagulant dosage in water treatment by artificial neural networks and adaptive network-based fuzzy inference system. *Eng Appl Artif Intell*. № 21(8). Pp. 1189-1195
11. Эпоян С.М., Благодарная Г.И., Душкин С.С., Сташук В.А. Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды: Монография. Харьков: ХНАГХ, 2013. 190 с.
12. Штернер С.Р., Нестеров Ю.В. Контрольно-измерительные и управляющие модули для оптимизации технологического процесса реагентной очистки воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 4. С. 46-51.
13. Li Y., Ma Z., Pan Z., Liu N. et al. Prophet model and Gaussian process regression based user traffic prediction in wireless networks. *Science China Information Sciences*. 2020. V. 63, № 4. P. 142301.
14. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б. Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона // Метрология. 2005. № 2. С. 3-23.
15. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Веретельникова И.В. О применении критериев проверки однородности законов распределения // Вестник Томского государственного

References

1. ISO 24510:2024. Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the assessment and for the improvement of the service to users.
2. ISO 24511:2024. Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the management of wastewater utilities and for the assessment of wastewater services.
3. GOST R ISO 46001-2023. Water Use Efficiency Management Systems. Requirements and guidance for use. <https://internet-law.ru/gosts/gost/79674/?ysclid=mqt81jnnww0710038418>
4. Draginsky V.L. Features of the use of coagulants for cleaning natural colored waters. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2008. № 1. P. 14-16
5. Getmantsev S.V. System of selecting effective technologies for natural water treatment using aluminum-containing coagulants. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2011. No 8. P. 4-9.
6. Baxter C.W., Stanley S.J., Zhang Q. (1999) «Development of a full-scale artificial neural network model for the removal of natural organic matter by enhanced coagulation». *Aqua*, 48, 129-136.
7. Gagnon C., Grandjean B.P. A., Thibault J. (1997) «Modelling of coagulant dosage in a water treatment plant». *Artif. Intell. Eng.*, 11, 401-404.
8. Buby D.S., Klyachkin V.N. Dose management of reagents in drinking water treatment. *Water Treatment*, No 4, 2023. P. 4-13.
9. Grishin B.M., Bikunova M.V., Safronov M.A., Titov E.A. Reagent treatment of surface natural waters with aluminum-containing coagulants: monograph. Penza: PSUAS, 2016. 140 p.
10. Wu G.D., Lo S.L. (2008) «Predicting real-time coagulant dosage in water treatment by artificial neural networks and adaptive network-based fuzzy inference system». *Eng Appl Artif Intell*. 21(8), 1189-1195.
11. Epoyan S.M., Blagodarnaya G.I., Dushkin S.S., Stashuk V.A. Improving the Efficiency of Facilities in Drinking Water Treatment. Kharkov: Monografiya. KhNAGH, 2013. 190 p.
12. Shterner S.R., Nesterov Yu.V. Control, Measuring and Control Modules for Optimization of the Technological Process of Reagent Water Treatment Water supply and sanitary technique. 2014. No 4. P. 46-51.
13. Li Y., Ma Z., Pan Z., Liu N. et al. «Prophet model and Gaussian process regression based user traffic prediction in wireless networks». *Science China Information Sciences*. 2020. V. 63, № 4, 142301.
14. B.Yu. Lemesheko S.B. Lemesheko. Comparative analysis of the criteria for checking the deviation of distribution from the normal law // *Metrology*, 2005, No 2, P. 3-23. Б.Ю.
15. Lemesheko B.Yu., Lemesheko S.B., Veretelnikova I.V. On the application of criteria for checking the homogeneity of distribution laws / *Bulletin of Tomsk State University. Management, Computer Engineering and Informatics* No 41, 2017. P. 24-31. EDN: YLDFFG

университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 41. С. 24-31. EDN: YLDFFG

16. Сурина А.В. Анализ временных рядов: Учебное пособие. СПб.: Издательство Политехнического университета Петра Великого, 2025. 90 с.

17. Данилов-Данильян В.И., Розенталь О.М. Гипотеза о причинах сильной изменчивости концентрации примесей в природных водах // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 509, № 1. С. 114-119. DOI: 10.31857/S2686739722602502

Информация об авторах

Олег Моисеевич Розенталь, д-р техн. наук., главный научный сотрудник Института водных проблем РАН, SPIN-код: 4857-7570, ORCID: 0000-0001-6261-6060, Author ID639330, SPIN-код 4856-7570; omro3@yandex.ru

Алексей Георгиевич Самбурский, аспирант Института водных проблем РАН, SPIN-код: 8760-5750, ORCID: 0009-0004-8051-1173; alex-sambursky@yandex.ru

16. Surina A.V. Analysis of Time Series: Textbook. St. Petersburg: Publishing House of Peter the Great Polytechnic University, 2025. 90 p.

17. Danilov-Danilyan V.I., Rozental O.M. Hypothesis about the causes of strong variability of the concentration of impurities in natural waters // Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences. 2023. V. 509, No 1, P. 114-119. DOI: 10.31857/S2686739722602502.

Information about the authors

Oleg M. Rozental, DScs (Eng), Chief Researcher, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, SPIN-code: 4857-7570, ORCID: 0000-0001-6261-6060, Author ID639330, SPIN-code 4856-7570; omro3@yandex.ru

Aleksei G. Samburskii, Postgraduate student, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, SPIN-code: 8760-5750, ORCID: 0009-0004-8051-1173; alex-sambursky@yandex.ru

Вклад авторов

О.М. Розенталь – обеспечил: идею работы, ее методы и анализ результатов, обсуждение результатов

А.Г. Самбурский – подготовка результатов, совместное обсуждение результатов

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 28.11.2025

Поступила после рецензирования / Received peer review 04.06.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted for publication after revision 08.06.2026

Contribution of the authors

O.M. Rozental – provided: the idea of the work, its methods and analysis of the results, discussion of the results

A.G. Sambursky – preparation of results, joint discussion of the results

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

Оригинальная статья

УДК 630*165.51

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-115-122>



**ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ ИНТРОДУКЦИИ ЛИСТВЕННОЙ
ЕВРОПЕЙСКОЙ (*LARIX DECIDUA* MILL.) НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРА
ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ**

М.А. Лавренов¹, П.А. Азарипин², А.А. Котов³

^{1,2,3} Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал); г. Москва, Российская Федерация

¹ lavrenov@bmstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>

² exneps@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1128-1757>

³ kotov@bmstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>

Аннотация. При оценке успешности интродукции лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) в центре Европейской части России нами представлено распределение деревьев по шкале категорий санитарного состояния в процентном соотношении на заложенных в каждом представленном участке пробных площадях. Установлено, что вблизи МКАД (природный парк «Битцевский лес») преобладают ослабленные (74%) и сильно ослабленные (22%) деревья, тогда как в Порецком участковом лесничестве, Никольской лесной даче и Измайловском лесопарке доля здоровых деревьев составляет 83-94%. Цель работы – оценка перспективности использования лиственницы европейской в центре Европейской части России, а также установление изменчивости ее морфологических признаков. Представлены особенности морфологических признаков лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.), произрастающей в условиях г. Москвы и Подмоскovie. Выполнен анализ изменчивости вегетативных и генеративных органов, корреляционный и регрессионный анализ шишек и семенных чешуй. Средняя длина шишек варьировала в пределах 3,15-3,37 см, ширина – 2,45-2,65 см, число чешуй – 36,7-47,5 шт., длина хвои – 1,84-2,68 см при коэффициенте вариации, не превышавшем 36,6%. Исследования проводились в природном парке «Битцевский лес», Порецком участковом лесничестве, Никольской лесной даче, Измайловском лесопарке. По их результатам выявлено, что лиственница европейская (*Larix decidua* Mill.) является перспективной породой для выращивания в условиях центра Европейской части России.

Ключевые слова: лиственница европейская, интродукция, вегетативные и генеративные органы, Битцевский парк, Порецкое участковое лесничество, Никольская лесная дача, Измайловский парк

Для цитирования: Лавренов М.А., Азарипин П.А., Котов А.А. Оценка успешности интродукции лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) на территории центра Европейской части России. Природообустройство. 2026;Т.19(3):115-122. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-115-122>

Scientific article

**ASSESSMENT OF THE SUCCESS OF EUROPEAN
LARCH (*LARIX DECIDUA* MILL.) INTRODUCTION IN THE TERRITORY
OF THE CENTER OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA**

M.A. Lavrenov¹, P.A. Azarapin², A.A. Kotov³

^{1,2,3} Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), 1 st. Institutskaya, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation

¹ lavrenov@bmstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>

² exneps@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1128-1757>

³ kotov@bmstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>

Abstract. When assessing the success of the introduction of European larch in the center of the European part of Russia, we present the distribution of trees according to the scale of sanitary conditions in percentage terms in the test areas established in each of the presented plots. It has been established that weakened (74%)

and severely weakened (22%) trees predominate near the Moscow Ring Road (Bitsevsky Forest Nature Park), while in the Poretsky District Forestry, the Nikolskaya Forest Dacha, and the Izmailovsky Forest Park, the proportion of healthy trees is 83-94%. The purpose of the work is to assess the prospects of using European larch in the center of the European part of Russia, as well as to establish the variability of its morphological features. The features of the morphological features of European larch growing in Moscow and the Moscow region are presented. The variability of vegetative and generative organs, as well as the correlation and regression analysis of cones and seed scales, has been analyzed. The average length of the cones varied between 3,15 and 3,37 cm, the width between 2,45 and 2,65 cm, the number of scales between 36,7 and 47,5, and the length of the needles between 1,84 and 2,68 cm, with a coefficient of variation of no more than 36,6%. The research was conducted in the Bitsevsky Forest Nature Park, the Poretsky District Forestry, the Nikolskaya Forest Dacha, and the Izmailovsky Forest Park. The results of the study revealed that the European larch is a promising species for cultivation in the central part of European Russia.

Keywords: European larch, introduction, vegetative and generative organs, Bittsevsky Park, Poretskoye District Forestry, Nikolskaya Forest Dacha, Izmailovsky Park

For citation: Lavrenov M.A., Azarapin P.A., Kotov A.A. Assessment of the success of european larch (*Larix decidua* Mill.) introduction in the territory of the center of the European part of Russia. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(3):115-122. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-115-122>

Введение. Лиственница европейская (*Larix decidua* Mill.) является одной из самых ценных интродуцированных пород как в России, так и за пределами страны [1, 2]. Например, в Беларуси многие исследователи отмечают, что среди всех искусственно вводимых древесных видов лиственница европейская (*Larix decidua* Mill.) является наиболее перспективной [3, 4].

Лиственница, помимо своих лесоводственных характеристик, также обладает высокой декоративностью. Она дымо- и газоустойчива, обладает высокой способностью к производству кислорода и депонированию углерода, а также фитонцидными свойствами [5-7]. Лиственница подходит для использования в городских посадках.

Биолого-физиологические особенности лиственницы в естественных условиях произрастания могут существенно отличаться по сравнению с особенностями в урбанизированных территориях, где она вынуждена приспосабливаться к неблагоприятным условиям, что может приводить к ухудшению ее состояния.

Для проведения дальнейшей интродукции лиственницы европейской необходимо понимание изменчивости ее морфологических признаков. При исследовании шишек и хвои в новых климатических условиях также важно оценить взаимосвязи их морфологических признаков. Анализ корреляционных связей предоставляет не только новые теоретические данные о характеристиках изменчивости признаков, но и открывает возможности для практического применения выявленных закономерностей [8]. Так, прямая связь между данными признаками позволяет использовать ее в практических целях.

Актуальность исследований обусловлена также высокой антропогенной нагрузкой

в центре Европейской части России. Растительность в городских условиях демонстрирует значительную модификационную изменчивость, что отражается во множестве биологических показателей, как отмечали, например, Д.М. Бронникова и Н.В. Шахринова (2016) [9]. Изучение морфологических характеристик растений в таких условиях имеет большое хозяйственное значение. Понимание особенностей произрастания интродуцентов позволяет смягчить влияние антропогенных факторов, используя растения с широким диапазоном нормы реакции [9].

Цель исследований: оценка перспективности использования лиственницы европейской в центре Европейской части России, а также установление изменчивости ее морфологических признаков.

Материалы и методы исследований. Природный парк «Битцевский лес» площадью 2188,7 га расположен в ЮЗАО г. Москвы. Различные здания и сооружения занимают около 20% его территории, экологически активная поверхность (древесные насаждения и луговые фитоценозы) – 80% [10]. Почвы – среднесуглинистые дерново-подзолистые разной степени нарушенности [11]. Пробная площадь была заложена на участке, примыкающем к Московской кольцевой автомобильной дороге (МКАД), что позволяет установить адаптацию лиственницы европейской к экстремальным антропогенным нагрузкам. Насаждение лиственницы европейской создано весной 1999 г. посадкой четырехлетними саженцами рядовым методом с расстоянием между рядами 2,5 м, в ряду – 1,0 м. Густота посадки – 4 тыс. шт/га. По границе лесных культур создана живая изгородь из караганы древовидной. Уход за лесными культурами не проводился. В первый

год после посадки провели покос травы в междурядьях [12].

Порецкое участковое лесничество Московской области. Наиболее известными в Московской области являются насаждения лиственницы европейской, созданные конце 1850 – начале 1860-х гг. лесоводом Карлом Францевичем Тюрмером в урочище Пустопь Порецкой дачи Уваровского района (в настоящее время – Можайский городской округ). Исследуемое искусственное насаждение создано К.Ф. Тюрмером в 1863 г. путем посадки двухлетних сеянцев лиственницы европейской и трехлетних сеянцев ели европейской. Тип лесных культур: порядное смешение лиственницы и ели; расстояние между рядами – 2,13 м; шаг посадки в рядах лиственницы – 1,42 м, в рядах ели 0,71 м. Тип леса – листвяг-кисличник [13].

В *Никольской лесной даче* лиственничные культуры исследовались в Воря-Богородском участковом лесничестве. Почва – дерново-подзолистая легкосуглинистая, сформированная на флювиогляциальном песке, оставленном ледниковыми потоками. Культуры лиственницы европейской закладывались в 1871 г. с сосной и елью загущенной посадкой с первоначальным размещением посадочных мест $1,25 \times 0,75$ м, а после интенсивных разреживаний – $2,5 \times 1,5$ м [14].

В *Измайловском лесопарке* г. Москвы учитывались объекты лиственницы европейской различного возраста. К северо-востоку от Красного пруда посажены культуры лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) судетского происхождения. Посадка выполнена в 1885 г., размещение посадочных мест – рядовое. Второй ярус – естественного происхождения – сформирован липой и кленом остролистным с единичным участием березы и дуба [15].

Второй объект исследования – более молодые культуры лиственницы европейской, посаженные в 1865 г. Деревья имеют групповое расположение с более удаленным размещением друг от друга [15].

Материалы и методы исследований.

При исследовании морфологических признаков вегетативных и генеративных органов лиственницы европейской нами учитывались длина и ширина шишек, число чешуй в шишках, длина и ширина семенных чешуй, длина хвои.

При статистической обработке представлены следующие показатели:

- среднее значение признака – $X_{\text{ср}}$;
- ошибка среднего значения признака – m ;
- среднее квадратическое – S ;
- коэффициент вариации – V , %;
- показатель точности опыта – P , %.

При оценке корреляционных связей между морфологическими признаками шишек представлены расчет коэффициента корреляции (r), корреляционного отношения (η), ошибки коэффициента корреляции (S_r) и корреляционного отношения (S_η), а также мера и критерий криволinéйности (k и t_k).

Была рассмотрена связь между:

- длиной и шириной шишек;
- длиной шишек и количеством их чешуй;
- шириной шишек и количеством их чешуй;
- длиной и шириной чешуй в шишках.

Перспективность интродукции лиственниц определяли по шкале категорий состояния хвойных деревьев (табл. 1) в процентном соотношении на заложенных в каждом представленном участке пробных площадях.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования изменчивости морфологических признаков лиственницы европейской представлены в таблице 2.

При исследовании изменчивости шишек и хвои лиственницы европейской не было выявлено очень высокое варьирование приведенных морфологических признаков, что может указывать на приспособленность растений к климатическим условиям центра Европейской части России.

Наибольшее варьирование показала длина хвои, оставаясь во всех приведенных случаях на высоком уровне изменчивости, что является биологической особенностью лиственницы: размеры хвои изменчивы даже в пределах одного побега.

Шишки и хвоя лиственницы европейской, произрастающей в условиях интродукции, имеют стандартные размеры, не выходящие за пределы изменчивости данных признаков в естественных условиях произрастания.

Интересно, что в условиях повышенной антропогенной нагрузки деревья лиственницы европейской имеют наибольшую среднюю длину шишек ($3,37 \pm 0,05$ см), а также среднюю длину ($1,29 \pm 0,006$ см) и ширину ($1,16 \pm 0,0006$ см) семенных чешуй по сравнению с остальными объектами исследований. Наибольшая ширина шишек ($2,65 \pm 0,04$ см) и количество чешуй в шишках ($47,49 \pm 1,05$ шт.) отмечены у деревьев, произрастающих на территории Измайловского лесопарка (1885 г. посадки). При этом в Порецком участковом лесничестве среднее число чешуй является примерно схожим ($47,0 \pm 0,93$ шт.).

По длине хвои деревья в Измайловском лесопарке значительно превосходят прочие объекты исследований. В квартале 17 средняя

Таблица 1. Шкала категорий санитарного состояния деревьев

Table 1. Scale of tree health categories

Категория санитарного состояния	Диагностические признаки по категориям санитарного состояния деревьев
1 – здоровые	деревья нормального развития, крона густая, нормальной формы, окраска и величина хвои нормальные, прирост текущего года нормального размера, повреждения вредителями и поражение болезнями отсутствуют, без механических повреждений ствола, скелетных ветвей, ран и дупел
2 – ослабленные	деревья с начальными признаками ослабления, крона разреженная, прирост уменьшен, но не более чем наполовину, отдельные ветви засохли, в кроне менее 25% сухих ветвей, возможны признаки местного повреждения ствола и корневых лап, ветвей, допустимо наличие механических повреждений и небольших дупел, не угрожающих их жизни
3 – сильно ослабленные	деревья в активной стадии повреждения неблагоприятными факторами с явно выраженными признаками ухудшения состояния, крона слабо развита, наличие усыхающих или усохших ветвей, возможны значительные механические повреждения ствола, сухостершинность
4 – усыхающие	деревья, поврежденные в сильной степени, крона изреженная, прирост очень слабый или отсутствует, хвоя на побеге текущего года неразвита, на стволе и ветвях выражены явные признаки заселения стволовыми вредителями
5 – погибшие	деревья, полностью утратившие жизнеспособность

Таблица 2. Изменчивость морфологических признаков лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.)Table 2. Variability of morphological features of European (*Larix decidua* Mill.) larch

Объект исследования	Признаки	$X_{cp} \pm m$, см	S, см	V, %	P, %
Природный парк «Битцевский лес»	Длина шишек	$3,37 \pm 0,05$	0,29	16,0	1,6
	Ширина шишек	$2,59 \pm 0,03$	0,11	12,7	1,3
	Число чешуй в шишках	$36,69 \pm 0,69$	48,16	18,9	1,9
	Длина чешуи	$1,29 \pm 0,006$	0,03	13,2	0,5
	Ширина чешуи	$1,16 \pm 0,0006$	0,03	14,7	0,6
	Длина хвои	$1,91 \pm 0,02$	0,32	29,8	1,1
Порецкое участковое лесничество	Длина шишек	$3,15 \pm 0,04$	0,16	12,7	1,3
	Ширина шишек	$2,45 \pm 0,03$	0,09	12,2	1,2
	Число чешуй в шишках	$47,0 \pm 0,93$	86,3	19,8	2,0
	Длина чешуи	$1,17 \pm 0,005$	0,02	12,0	0,5
	Ширина чешуи	$0,89 \pm 0,004$	0,01	11,2	0,4
	Длина хвои	$2,06 \pm 0,02$	0,42	31,6	1,0
Никольская лесная дача	Длина шишек	$3,19 \pm 0,05$	0,24	15,4	1,5
	Ширина шишек	$2,55 \pm 0,03$	0,11	12,9	1,3
	Число чешуй в шишках	$44,56 \pm 0,88$	78,06	19,8	1,8
	Длина чешуи	$1,17 \pm 0,006$	0,03	14,5	0,5
	Ширина чешуи	$1,01 \pm 0,006$	0,03	16,8	0,6
	Длина хвои	$1,84 \pm 0,02$	0,36	32,6	1,1
Измайловский лесопарк (посадка в 1885 г.), кв. 17	Длина шишек	$3,24 \pm 0,05$	0,3	16,9	1,7
	Ширина шишек	$2,65 \pm 0,04$	0,12	13,3	1,3
	Число чешуй в шишках	$47,49 \pm 1,05$	109,8	22,1	2,2
	Длина чешуи	$1,24 \pm 0,01$	0,03	12,8	0,5
	Ширина чешуи	$0,93 \pm 0,005$	0,02	13,1	0,5
	Длина хвои	$2,68 \pm 0,03$	0,97	36,6	1,2
Измайловский лесопарк (посадка в 1865 г.), кв. 30,31	Длина шишек	$3,26 \pm 0,04$	0,16	12,3	1,2
	Ширина шишек	$2,46 \pm 0,03$	0,1	13,0	1,3
	Число чешуй в шишках	$46,2 \pm 0,93$	86,1	20,1	2,0
	Длина чешуи	$1,27 \pm 0,005$	0,02	11,0	0,4
	Ширина чешуи	$1,01 \pm 0,005$	0,02	13,9	0,5
	Длина хвои	$2,51 \pm 0,02$	0,43	26,3	0,9

длина хвои составляет $2,68 \pm 0,03$ см, в квартале 30, $31-2,51 \pm 0,02$ см, в то время как у прочих исследованных насаждений средняя длина хвои варьирует от 1,84 (в Никольской лесной даче) до 2,06 см (в Порецком участковом лесничестве).

Показатель точности опыта не превышает 5% во всех случаях, что указывает на достоверность проведенных исследований.

Дальнейшим этапом исследования морфологических признаков лиственницы европейской явился корреляционный анализ (табл. 3).

В результате проведенных исследований установлена корреляционная связь между различными биометрическими показателями шишек. При этом стоит отметить, что во всех приведенных случаях отсутствовали слабые связи между признаками.

При исследовании биометрических показателей шишек и семенных чешуй установлена умеренная и значительная связь ширины шишек с количеством чешуй и длины семенных чешуй с их шириной. Тесная связь установлена между длиной шишек с их шириной и между длиной шишек с количеством чешуй в шишках. При этом в некоторых случаях связь между данными признаками была значительной.

Критерий криволинейности (t_k) указывает, что связь не может считаться прямолинейной между длиной и шириной чешуй в шишках

в Порецком участковом лесничестве и между шириной шишек с их количеством чешуй в Измайловском лесопарке, кв. 17. Во всех остальных приведенных 14 случаях связь может считаться прямолинейной, так как мера криволинейности (κ) стремится к 0, а критерий криволинейности t_k не превышает табличного значения, равного 2,0.

Показатели t_r и t_η указывают на значимость полученных значений r и η во всех приведенных случаях. Связь между всеми признаками прямая.

Математическое моделирование зависимостей морфологических признаков лиственницы европейской представлено в таблице 4.

В результате регрессионного анализа установлено, что линейная линия тренда является наиболее подходящей для оценки связи между признаками в связи со своей простотой: полиномиальные уравнения лишь незначительно увеличивают коэффициент детерминации.

Наиболее точными согласно коэффициентам достоверности являются модели связи длины шишек с их шириной и числом чешуй в шишках.

При оценке успешности интродукции нами также выполнена оценка состояния деревьев лиственницы европейской в Битцевском парке, Порецком участковом лесничестве, Никольской лесной даче, Измайловском лесопарке (табл. 5).

Таблица 3. Оценка связи морфологических признаков шишек

Table 3. Assessment of the relationship between morphological features of cones

Объект исследований	Признаки	r	η	S_r	S_η	t_r	t_η	S_κ	κ	t_k
Природный парк «Битцевский лес»	Длина и ширина шишек	0,55	0,59	0,07	0,07	7,77	9,00	0,04	0,05	1,14
	Длина шишек и количество их чешуй	0,75	0,76	0,04	0,04	17,06	17,90	0,02	0,02	0,62
	Ширина шишек и количество их чешуй	0,44	0,51	0,08	0,07	5,43	6,86	0,05	0,07	1,36
	Длина и ширина чешуй в шишках	0,52	0,53	0,03	0,03	18,84	19,49	0,01	0,01	1,37
Порецкое участковое лесничество	Длина и ширина шишек	0,74	0,78	0,05	0,04	16,23	19,40	0,05	0,06	1,20
	Длина шишек и количество их чешуй	0,68	0,71	0,05	0,05	12,59	14,25	0,04	0,04	1,04
	Ширина шишек и количество их чешуй	0,52	0,63	0,07	0,06	7,09	10,39	0,06	0,13	1,95
	Длина и ширина чешуй в шишках	0,49	0,51	0,03	0,03	17,12	18,43	0,01	0,02	2,00
Никольская лесная дача	Длина и ширина шишек	0,77	0,79	0,04	0,04	18,82	20,91	0,03	0,03	0,89
	Длина шишек и количество их чешуй	0,54	0,61	0,07	0,06	7,58	9,67	0,05	0,08	1,50
	Ширина шишек и количество их чешуй	0,50	0,57	0,08	0,07	6,63	8,40	0,05	0,07	1,45
	Длина и ширина чешуй в шишках	0,607	0,612	0,02	0,02	25,41	25,87	0,01	0,01	1,04
Измайловский лесопарк (посадка 1885 г) кв 17	Длина и ширина шишек	0,75	0,76	0,04	0,04	17,06	17,90	0,02	0,02	0,62
	Длина шишек и количество их чешуй	0,73	0,79	0,05	0,04	15,55	20,91	0,06	0,09	1,57
	Ширина шишек и количество их чешуй	0,46	0,67	0,08	0,06	5,81	12,10	0,08	0,24	2,95
	Длина и ширина чешуй в шишках	0,569	0,570	0,03	0,03	22,25	22,32	0,003	0,001	0,45
Измайловский лесопарк (посадка 1865 г.) кв. 30,31	Длина и ширина шишек	0,61	0,65	0,06	0,06	9,67	11,20	0,04	0,05	1,16
	Длина шишек и количество их чешуй	0,68	0,72	0,05	0,05	12,59	14,88	0,05	0,06	1,22
	Ширина шишек и количество их чешуй	0,39	0,52	0,09	0,07	4,58	7,09	0,06	0,12	1,91
	Длина и ширина чешуй в шишках	0,48	0,49	0,03	0,03	16,49	17,05	0,01	0,01	1,31

Таблица 4. Уравнения протестированных моделей оценки зависимостей
морфологических признаков

Table 4. Equations of the tested models for estimating the dependencies of morphological features

Объект исследований	Признаки	Модель	Уравнение	R ²
Природный парк «Битцевский лес»	Длина и ширина шишек	Линейная	$y = 0,3377x + 1,467$	0,32
	Длина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 9,9641x + 4,1952$	0,61
	Ширина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 9,8002x + 13,003$	0,21
	Длина и ширина чешуй в шишках	Линейная	$y = 0,4046x + 0,6481$	0,17
Порецкое участковое лесничество	Длина и ширина шишек	Линейная	$y = 0,4958x + 0,9054$	0,51
	Длина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 15,21x + 0,6941$	0,50
	Ширина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 17,232x + 6,5296$	0,31
	Длина и ширина чешуй в шишках	Линейная	$y = 0,3755x + 0,4636$	0,23
Никольская лесная дача	Длина и ширина шишек	Линейная	$y = 0,5537x + 0,7844$	0,64
	Длина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 10,12x + 13,599$	0,33
	Ширина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 12,766x + 13,565$	0,25
	Длина и ширина чешуй в шишках	Линейная	$y = 0,5876x + 0,3161$	0,32
Измайловский лесопарк (посадка 1885 г.), кв. 17	Длина и ширина шишек	Линейная	$y = 0,4788x + 1,0973$	0,56
	Длина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 14,697x + 0,3591$	0,58
	Ширина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 14,155x + 11,468$	0,22
	Длина и ширина чешуй в шишках	Линейная	$y = 0,4107x + 0,4308$	0,21
Измайловский лесопарк (посадка 1865 г.), кв. 30,31	Длина и ширина шишек	Линейная	$y = 0,4683x + 0,9475$	0,38
	Длина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 16,029x - 5,0574$	0,50
	Ширина шишек и количество их чешуй	Линейная	$y = 11,503x + 19,29$	0,15
	Длина и ширина чешуй в шишках	Линейная	$y = 0,3172x + 0,612$	0,16

Таблица 5. Распределение деревьев по категориям состояния

Table 5. Distribution of trees by condition category

Объект исследований	Распределение по категориям состояния, %					
	Среднее значение	1	2	3	4	5
Природный парк «Битцевский лес»	2,3	0	74	22	4	0
Порецкое участковое лесничество	1,2	83	13	4	0	0
Никольская лесная дача	1,2	89	7	4	0	0
Измайловский лесопарк (посадка 1885 г.)	1,1	92	6	2	0	0
Измайловский лесопарк (посадка 1865 г.)	1,1	94	6	0	0	0

Согласно проведенным исследованиям большинство деревьев лиственницы европейской в Порецком участковом лесничестве, Никольской лесной даче и Измайловском лесопарке не имеют признаков ослабления. Крона имеет нормальную форму с учетом возраста породы, условий место-произрастания и сезонного периода. Размеры шишек и хвои – нормальные, что подтверждается проведенными исследованиями изменчивости морфологических признаков. Однако в Битцевском парке у деревьев, произрастающих вблизи от МКАД, в большом количестве встречались сильно ослабленные деревья (22%) с явно выраженными признаками ухудшения состояния, с большим количеством усохших ветвей, и единично встречались также усыхающие деревья с сильно изреженной кроной и отсутствующим приростом. Выявлено большинство деревьев второй категории состояния – ослабленные (74%).

Деревья имели начальные признаки ослабления, крона разреженная, отдельные ветви засохли, однако наблюдался нормально развитый ствол.

Стоит отметить, что во всех приведенных объектах исследований были отмечены сильно ослабленные деревья.

Выводы

При исследовании морфологических признаков представлены результаты изменчивости, корреляционного и регрессионного анализа шишек лиственницы европейской.

Анализ изменчивости морфологических признаков показал, что деревья лиственницы европейской, произрастающие рядом с автомагистралью, не только не отстают по размерам шишек от прочих объектов исследований, но и превосходят их по длине шишек, длине и ширине семенных чешуй. Однако стоит отметить, что

данное насаждение уступает прочим объектам исследований по семеношению и охвоению.

Выявлено, что биометрические показатели шишек и хвои не выходят за рамки стандартных размеров, свойственных виду, и не показывают очень высокого варьирования (по шкале С.А. Мамаева). Это указывает на приспособленность лиственницы европейской к условиям центра Европейской части России.

Установленные корреляционные связи между морфологическими признаками шишек и семенных чешуй являются прямолинейными, что позволяет их использовать в практических целях. Регрессионный анализ показал, что наиболее точными являются модели связи длины шишек с их шириной и с числом чешуй

в шишках. Это вызвано тем, что ширина шишек зависит не только от генетической детерминации, но и от степени раскрытия их чешуй.

При оценке состояния деревьев отмечено, что деревья, произрастающие вблизи МКАД на территории Битцевского парка, являются ослабленными (74%) и сильно ослабленными (22%), что, несомненно, вызвано высокой антропогенной нагрузкой. В Порецком участковом лесничестве, Никольской лесной даче и Измайловском лесопарке большинство деревьев – без признаков ослабления.

Таким образом, результаты исследований указывают о приспособленности лиственницы европейской к условиям г. Москвы и Подмосковья.

Список использованных источников

1. Litkowiec M. Genetic status of Polish larch (*Larix decidua* subsp. *polonica* (Racib. Domin)) from Chelmowa Mountain: implications for gene conservation / Monika Litkowiec, Andrzej Lewandowski, Jarosław Burczyk. *Dendrobiology*, 2018. Vol. 80. P. 101-111.
2. Снешкене В. Болезни лиственницы (*Larix* Mill.) в Литве // Проблемы лесной фитопатологии и микологии: материалы IX Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения проф. Н.И. Федорова, [19-24 октября 2015]. Минск; Москва; Петрозаводск: БГТУ, 2015. С. 198-201.
3. Тупик П.В., Якимов Н.И. Исследование посевных качеств семян лиственницы европейской в зависимости от времени их заготовки // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 1. Лесное хозяйство, № 16, 2008. С. 219-222.
4. Штукин С.С., Шалима П.В., Козловская Л.И. Экономическая эффективность выращивания лиственницы в лесах Беларуси // Лесное и охотничье хозяйство, № 3, 2005. С. 21.
5. Sun Yu., Jin X., Pukkala T., Li F. Predicting Individual Tree Diameter of Larch (*Larix olgensis*) from UAV-LiDAR Data Using Six Different Algorithms // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 5. P. 1125. DOI: 10.3390/rs14051125.
6. Исаева Л.Г., Ершов В.В., Урбанавичюс Г.П., Боровичев Е.А. Интродукция кедр и лиственницы в условиях Кольского Заполярья // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 4(394). С. 41-57. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-41-57.
7. Кузьмин С.Р., Рубцов А.В., Барченков А.П., Карпук Т.В. Дифференциация климатипов лиственниц (*Larix* spp.) в географических культурах в лесостепи Средней Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 56. С. 170-188. DOI: 10.17223/19988591/56/8.
8. Путенихина К.В., Шигапов З.Х., Мкртчян М.А., Путенихин В.П. Корреляции количественных показателей шишек и семян кедр сибирского при интродукции // Хвойные бореальной зоны, 2015. № 1-2, С. 48-54.
9. Бронникова Д.М., Шахринова Н.В. Корреляционный анализ количественных признаков хвои сосны обыкновенной *Pinus Sylvestris* L. // Приволжский научный вестник. № 4 (56), 2016. С. 5-7.
10. Семенюк О.В., Бодров К.С., Стома Г.В., Яковлев А.С. Оценка стоимости экосистемных услуг природного парка «Битцевский лес» // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2019. № 3. С. 23-30.
11. Кузнецов В.А., Рыжова И.М., Стома Г.В. Изменение свойств почв лесопарков Москвы при высоком

References

1. Litkowiec M. Genetic status of Polish larch (*Larix decidua* subsp. *polonica* (Racib. Domin)) from Chelmowa Mountain: implications for gene conservation / Monika Litkowiec, Andrzej Lewandowski, Jarosław Burczyk. *Dendrobiology*, 2018. Vol. 80. P. 101-111.
2. Sneskene V. Diseases of larch (*Larix* Mill.) in Lithuania // Problems of forest phytopathology and mycology: Proceedings of the IX International Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of prof. N.I. Fedorov, [October 19-24, 2015]. Minsk; Moscow; Petrozavodsk: BSTU, 2015. P. 198-201.
3. Tupik P.V., Yakimov N.I. Study of sowing qualities of European larch seeds depending on the time of their harvesting // Transactions of the Belarusian State Technological University. Series 1. Forestry, No. 16, 2008. P. 219-222.
4. Shtukin S.S., Shalima P.V., Kozlovskaya L.I. Economic efficiency of growing larch in the forests of Belarus // Forestry and hunting, No. 3, 2005. P. 21.
5. Sun Yu., Jin X., Pukkala T., Li F. Predicting Individual Tree Diameter of Larch (*Larix olgensis*) from UAV-LiDAR Data Using Six Different Algorithms // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 5. P. 1125. DOI: 10.3390/rs14051125.
6. Исаева Л.Г., Ершов В.В., Урбанавичюс Г.П., Боровичев Е.А. Интродукция кедр и лиственницы в условиях Кольского Заполярья // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 4(394). С. 41-57. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-41-57.
7. Kuzmin S.R., Rubtsov A.V., Barchenkov A.P., Karpuk T.V. Differentiation of larch (*Larix* spp.) climatypes in geographical crops in the forest-steppe of Central Siberia // Bulletin of Tomsk State University. Biology. 2021. No. 56. P. 170-188. DOI: 10.17223/19988591/56/8.
8. Putenikhina K.V., Shigapov Z.Kh., Mkrtchyan M.A., Putenikhin V.P. Correlations of quantitative indicators of cones and seeds of Siberian pine during introduction // Conifers of the boreal zone, 2015. No. 1-2, pp. 48-54.
9. Bronnikova D.M., Shakhrianova N.V. Correlation analysis of quantitative characteristics of Scots pine needles *Pinus Sylvestris* L. // Privolzhsky Scientific Bulletin. No. 4 (56), 2016. P. 5-7.
10. Semenyuk O.V., Bodrov K.S., Stoma G.V., Yakovlev A.S. Assessment of the cost of ecosystem services of the Bitsevsky Forest Nature Park // Bulletin of Moscow University. Series 17: Soil Science. 2019. No. 3. P. 23-30.
11. Kuznetsov V.A., Ryzhova I.M., Stoma G.V. Changes in soil properties of Moscow forest parks under high recreational load // Soil Science.

уровне рекреационной нагрузки // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1270-1280.

12. Рыбакова Н.А., Глазунов Ю.Б. Рост культур лиственницы европейской в зоне влияния Московской кольцевой автодороги (МКАД) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 5. С. 54-61. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-54-61

13. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Маликов А.Н. Динамика роста лиственнично-еловых лесных культур К.Ф. Тюрмера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 11-16. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-11-16

14. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г. Опыт лесоводственного мониторинга в Никольской лесной даче. М.: МГУЛ, 2015. 112 с.

15. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г. Лесоводственная экскурсия в Измайловский лес. М.: МГУЛ, 2001. 42 с.

16. Лапин П.И. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений / П.И. Лапин, С.В. Сиднева // Опыт интродукции древесных растений (сборник научных трудов). М.: Главный ботанический сад АН СССР, 1973. С. 7-67.

Информация об авторах

Максим Александрович Лавренов, канд. с.-х. наук, доцент; RedearcherID: E-2995-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>, lavrenov@bmstu.ru

Павел Александрович Азарипин, аспирант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1128-1757>, exneps@gmail.com

Алексей Александрович Котов, доктор техн. наук, доцент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>, kotov@bmstu.ru

Вклад авторов

М.А. Лавренов – проведения исследований, проведение расчётов
П.А. Азарипин – подбор литературы и подготовка заключения
А.А. Котов – обоснование методики, анализ материалов исследований

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Поступила в редакцию / Received 12.11.2025

Поступила после доработки и рецензирования / Received 19.05.2026

Принята к публикации / Accepted 29.05.2026

12. Rybakova N.A., Glazunov Yu.B. Growth of European larch crops in the zone of influence of the Moscow Ring Road (MKAD) // Forestry Bulletin, 2019. Vol. 23. No. 5. Pp. 54-61. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-54-61

13. Merzlenko M.D., Melnik P.G., Malikov A.N. Growth dynamics of larch-spruce forest crops of K.F. Tyurmer // Forestry Bulletin, 2020. Vol. 24. No. 2. Pp. 11-16. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-11-16

14. Merzlenko M.D., Melnik P.G. Experience of forestry monitoring in Nikolskaya forest dacha. Moscow: Moscow State University of Forestry, 2015. 112 p.

15. Merzlenko M.D., Melnik P.G. Forestry excursion to the Izmailovsky forest. Moscow: Moscow State University of Forestry, 2001. 42 p.

16. Lapin P.I., Sidneva S.V. Evaluation of the prospects of introducing woody plants based on visual observations // Experience of introducing woody plants (collection of scientific papers). Moscow: Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences, 1973. pp. 7-67.

Information about the authors

Maxim A. Lavrenov, CSs (Agro), Associate Professor; Redearcher ID: E-2995-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>, lavrenov@bmstu.ru

Pavel A. Azarapin, Postgraduate Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1128-1757>, exneps@gmail.com

Alexey A. Kotov, DSs (Tech), Associate Professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>, kotov@bmstu.ru

Author's contribution

M.A. Lavrenov – conducting research, making calculations
P.A. Azarapin – selection of literature and preparation of a conclusion
A.A. Kotov – substantiation of the methodology, analysis of research materials

Оригинальная статья

УДК 630.431.2

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-123-128>



ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

О.Н. Дидманидзе¹, А.В. Евграфов^{2✉}, А.С. Гузалов³, А.В. Куриленко⁴, Д.А. Филимонов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; г. 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 filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0006-5484-5334

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по изучению процессов термического разложения сосны и лиственницы, а также свежих еловых опавов методом их изотермического разложения, что позволит оценить пожароопасность вышеописанного лесного горючего материала (ЛГМ). На практике зафиксированы случаи самовозгорания соснового опада в холодное время года после выпадения атмосферных осадков в виде снега, что документально зафиксировано в лесном массиве Воронежской области. Цель исследований – экспериментально определить температуру начала термического разложения с образованием газообразных продуктов горения некоторых лесных горючих материалов. Для проведения экспериментальных исследований на предмет термической деструкции были отобраны образцы лесных горючих материалов на территории Брянской области – таких, как опад сосны и лиственницы, а также свежие иголки ели. Была собрана термографическая установка, определена температура начала термической деструкции, или разложения, опада сосны (*Pinus sylvestris*), лиственницы (*Larix sibirica*) и ели (*Picea abies*).

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 26-16-00015 (URL: <https://rscf.ru/project/26-16-00015/>)

Ключевые слова: лесной горючий материал, возгорание, термографический анализ, лесные пожары, термическое разложение

Формат цитирования: Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Гузалов А.С., Куриленко А.В., Филимонов Д.А. Определение начальной температуры термической деструкции лесных горючих материалов. Природообустройство. 2026;Т.19(3):123-128. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-123-128>

Scientific article

DETERMINATION OF THERMAL DECOMPOSITION TEMPERATURE OF FOREST COMBUSTIBLE MATERIALS

O.N. Didmanidze¹, A.V. Evgrafov^{2✉}, A.S. Guzalov³, A.V. Kurilenko⁴, D.A. Filimonov⁵

^{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 filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0006-5484-5334

Abstract. This article presents the results of experimental studies investigating the thermal decomposition of pine and larch, as well as fresh spruce needles, using isothermal decomposition. This study will allow us to assess the fire hazard of the aforementioned forest fuels. Cases of spontaneous combustion of pine litter during the cold season, following precipitation in the form of snow, have been documented; this effect has been documented in a forested area of the Voronezh Region. The objective of the study was to experimentally determine the onset temperature of thermal decomposition, with the formation of gaseous combustion products, of certain forest fuels. To conduct experimental studies on thermal degradation, samples of forest combustible materials in the Bryansk region, such as pine and larch leaves, as well as fresh spruce needles,

were selected. A thermographic setup was assembled for laboratory experiments, and the onset temperature of thermal destruction, or decomposition, of pine (*Pinus sylvestris*), larch (*Larix sibirica*), and spruce (*Picea abies*) litter was determined.

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 26-16-00015 (URL: <https://rscf.ru/project/26-16-00015/>)

Keywords: forest combustible material, ignition, thermographic analysis, forest fires, thermal decomposition

For citation: Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Guzalov A.S., Kurilenko A.V., Filimonov D.A., Determination of thermal decomposition temperature of forest combustible materials. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(3):123-128. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-123-128>

Введение. Лесные пожары оказывают большое влияние на увеличение сезонной глубины промерзания почв, так как с выгоранием почвы и в результате уменьшения утепляющего воздействия происходит нарушение теплофизических параметров почвенных слоев. Это приводит к тому, что увеличивается поверхностный сток и повышается степень деградации почв за счет увеличения водной и ветровой эрозии на значительных площадях.

Причинами возникновения лесных пожаров являются такие теплофизические процессы, как вынужденное зажигание от нагретых тел, самовозгорание лесных горючих материалов.

Пожароопасный сезон в лесу длится с момента схода снегового покрова до наступления устойчивой дождливой осенней погоды, то есть с апреля по ноябрь. Сезон пожарной опасности в лесу подразделяют на пожароопасные периоды и периоды отсутствия пожарной опасности, которые возникают после выпадения осадков в количестве более 3 мм. Наиболее пожароопасным является период с июля по август, когда число пожаров достигает своего максимума. К наиболее пожароопасным лесным насаждениям относятся хвойные леса и лишайники [1].

Дым, образующийся при сгорании биологической массы лесной растительности (травы, листвы деревьев и кустарников, мхов, лишайников, торфяников, лесной подстилки и хвой), представляет собой аэрозольно-газовую смесь, содержащую вредные для окружающей среды и здоровья человека вещества [2].

Сжигание биомассы является основным глобальным источником газопылевых выбросов в атмосферу и считается одним из основных эко-токсикологических факторов риска для здоровья населения.

Массовый выброс углекислого газа от природных пожаров в РФ составляет до 400 млн т, что соответствует 18% всех годовых антропогенных выбросов парниковых газов в России [3].

Самовозгорание лесных горючих материалов является одной из причин лесных

пожаров [4]. Следует отметить, что лесные горючие материалы относятся к биотопливу, отличающемуся от синтетического тем, что окислитель, кислород, поступает через поры из окружающей среды, насыщает практически весь объем материала, обуславливая его большую пожароопасность и склонность к вынужденному зажиганию и самовозгоранию [5].

Таким образом, очевидно, что причинами возникновения лесных пожаров являются такие теплофизические процессы, как вынужденное зажигание от нагретых тел, самовозгорание лесных горючих материалов. Следует отметить, что пожароопасный сезон в лесу длится с момента схода снегового покрова до наступления устойчивой дождливой осенней погоды, то есть с апреля по ноябрь. Периоды отсутствия пожарной опасности возникают после выпадения атмосферных осадков, которые превышают 3 мм. В результате значительная часть теплоты разогрева лесного горючего материала расходуется на испарение из него влаги, а не на его разогрев, который приводит к возникновению процесса самовозгорания или вынужденного зажигания.

Цель исследований: изучение процессов термического разложения ЛГМ для определения их пожароопасности и склонности к возникновению процессов самовозгорания и вынужденного зажигания.

Материалы и методы исследований. Для проведения экспериментальных исследований на предмет термической деструкции были отобраны образцы лесных горючих материалов на территории Брянской области – таких, как опад сосны и лиственницы, а также свежие иглолки ели.

При проведении опытов образцы ЛГМ загружались в цилиндрический контейнер К60 из латунной сетки диаметром 30 мм и высотой 60 мм (рис. 1а).

Термографическая установка (рис. 1б) включала в себя: сушильный шкаф СНОЛ-3.5; термопары ДТКП-0.5-4; измеритель-регистратор 8 каналов ОВЕН; программное обеспечение

ОВЕН; контейнер из латунной сетки; 5-компонентный газоанализатор МЕТА АВТО-ТЕСТ-02.03П. Для определения изменения массы исследуемых образцов использовались весы АСЗЕТ СУ-513 (предел взвешивания – 510 г с точностью 0,001 г.

Размер цилиндрического контейнера К60 был определен из рекомендаций [6] для исследований превращений веществ в твердом состоянии применять образцы с отношением высоты к диаметру 2:1 для насыщения всего объема кислородом. Это особенно важно при проведении экспериментальных исследований на предмет возникновения процессов термического разложения материалов. При этом масса исследуемого вещества варьируется от нескольких граммов до нескольких десятков граммов [7, 8].

В контейнер загружались образцы исследуемого лесного горючего материала, которые выдерживались при температуре 25°C в помещении в течение 100 суток. В процессе исследований в экспериментальной термографической установке ТГ задавался изотермический режим при постоянной температуре 200°C. Предварительно установка выдерживалась при заданной температуре в течение 60 мин. В ходе эксперимента фиксировалось изменение параметров испытуемого образца, а именно его температурный режим и появление газообразных продуктов

термической деструкции с помощью газоанализатора. Оксиды азота NO_x появлялись раньше, чем CH и CO_2 , поэтому опыты проводились до их появления. Взвешивание образцов лесного горючего материала производилось до эксперимента и после его завершения для определения массы ЛГМ, подвергшейся термическому разложению.

Результаты и их обсуждение. Результаты экспериментальных исследований термической деструкции лесных горючих материалов представлены на рисунках 2-4. Следует отметить, что начальной считалась температура термического разложения ЛГМ, когда газоанализатор показывал значения концентрации оксидов азота NO_x в термографической установке в количестве 10 ppm, или 19,1 мг/м³, то есть когда процесс термического разложения становился устойчивым.

Как следует из данных графика (рис. 2), время до окончания термического разложения опада лиственницы составляет 29 мин при нагревании до температуры 195°C. Это означает, что за указанный промежуток времени при такой температуре происходит термическое разложение опада лиственницы, то есть он теряет свои исходные свойства и превращается в другие вещества. Этот процесс может включать в себя химические реакции, при которых изменяются состав и структура компонентов опада [9].

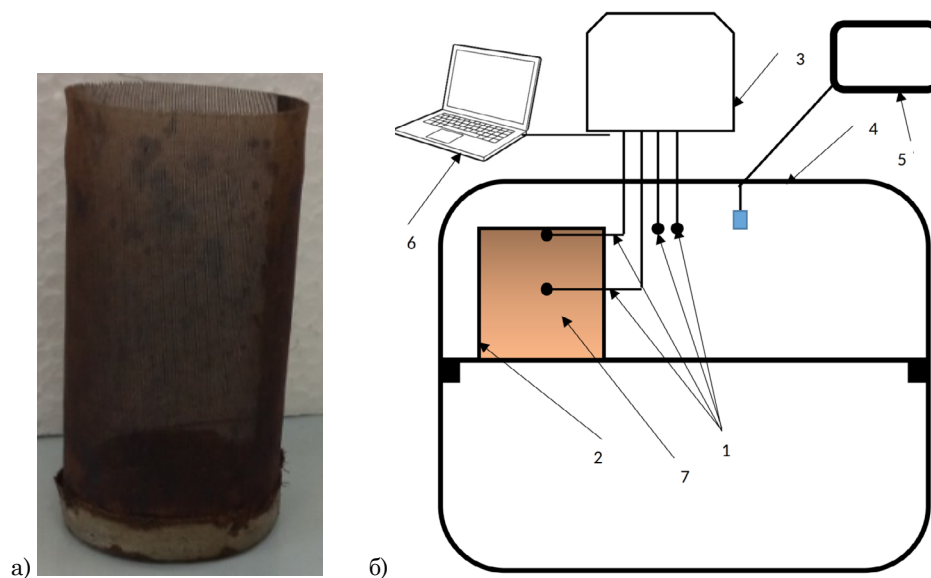


Рис. 1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки (б): 1 – термопары ДТКП-0.5-4; 2 – контейнер; 3 – измеритель-регистратор 4 канала ОВЕН; 4 – сушильный шкаф СНОЛ-3,5; 5 – пятикомпонентный газоанализатор; 6 – персональный компьютер с программным обеспечением ОВЕН; 7 – испытуемый образец лесного горючего материала

Fig. 1. Experimental setup

Diagram of the experimental facility, where (б): 1 – DTKP-0.5-4 thermocouples; 2 – container; 3 – OWEN 4-channel recorder meter; 4 – SNOL drying oven – 3.5; 5 – five-component gas analyzer; 6 – personal computer with OWEN software, 7 – test sample of forest combustible material

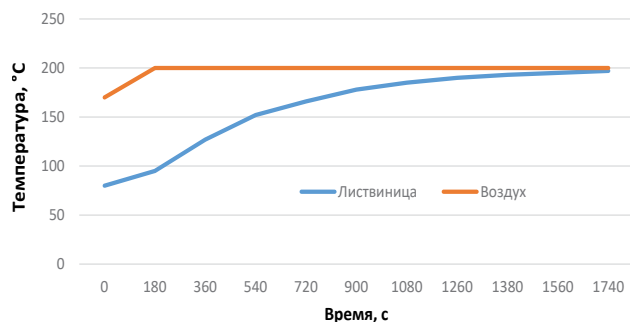


Рис. 2. Динамика термического разложения опада лиственницы до температуры 195°C и показаний газоанализатора $\text{NO}_x = 10 \text{ ppm}$

Fig. 2. Dynamics of thermal decomposition of larch litter, up to a temperature of 195°C and gas analyzer readings of $\text{NO}_x=10 \text{ ppm}$

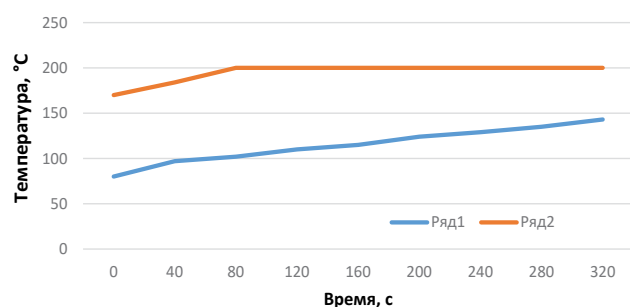


Рис. 3. Динамика термического разложения опада сосны до температуры 137°C и показаний газоанализатора $\text{NO}_x = 10 \text{ ppm}$

Fig. 3. Dynamics of thermal decomposition of pine litter, up to a temperature of 137°C and gas analyzer readings of $\text{NO}_x=10 \text{ ppm}$

При нагревании до температуры 137°C опад сосны разлагается термически за немного более чем 5 мин (рис. 3). Следовательно, за указанный промежуток времени при этой температуре органические вещества, содержащиеся в опаде сосны, подвергаются химическим изменениям, в результате которых происходит разложение на другие соединения. Этот процесс может включать в себя окисление, дегидратацию и другие реакции, приводящие к изменению структуры и состава веществ [10].

Из данных графика (рис. 4) следует, что при нагревании до температуры 115°C время, необходимое для завершения термического разложения опада ели, составляет немного более 3,5 мин. Такие показатели обуславливаются большим содержанием в ней смолистых веществ по сравнению с опадом сосны и лиственницы [10-12].

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что температура термического разложения опада лиственницы составила 195°C, сосны – 137°C, ели – 115°C. Время до начала термической деструкции составило 1740, 320 и 220 сек. соответственно.

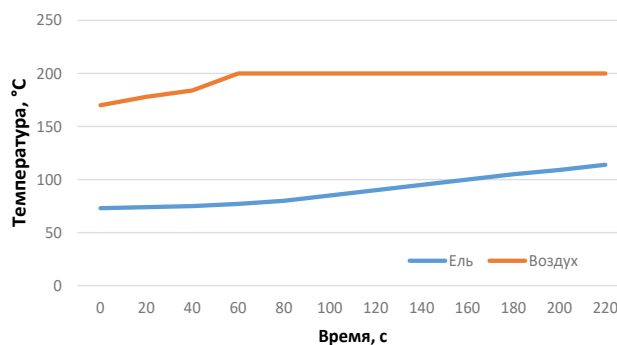


Рис. 4. Динамика термического разложения опада ели до температуры 115°C и показаний газоанализатора $\text{NO}_x = 10 \text{ ppm}$

Fig. 4. Dynamics of thermal decomposition of spruce litter, up to a temperature of 115°C and gas analyzer readings of $\text{NO}_x=10 \text{ ppm}$

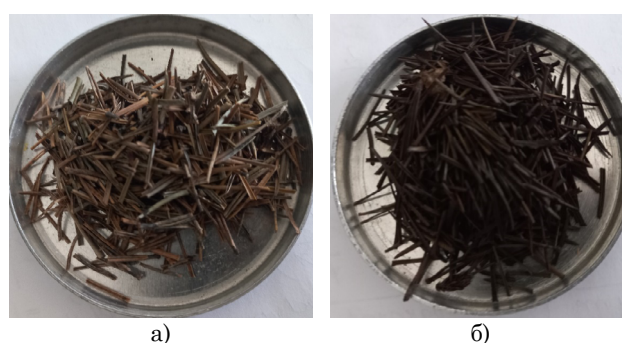


Рис. 5. Образцы опада сосны (фото):

а) – до эксперимента; б) – после эксперимента

Fig. 5. Photograph of pine litter samples:

а) – before the experiment, б) – after the experiment

При этом во время извлечения контейнеров с образцами из термографической установки визуально фиксировались дымовые частицы, а также их обугливание, что также подтверждает термическое разложение лесных горючих материалов [10-12].

Результаты взвешивания образцов до эксперимента и после него показали, что масса опада лиственницы уменьшилась на 15% от исходной, сосны – на 20,1%, а ели – на 24%. Начальные значения NO_x составляли от 1 до 5 ppm для опада сосны при 87°C, для опада ели – при 80°C, для опада лиственницы – при 154°C. Подчеркнем, что эти данные свидетельствуют о высокой пожарной опасности ЛГМ, особенно опада сосны и ели.

Выводы

1. При проведении термографических исследований лесных горючих материалов нежелательно их подготавливать перед проведением экспериментов способом стандартной сушки при температурах 90-100°C, поскольку уже при данных температурах начинается их термическое разложение.

2. В результате эксперимента установлено, что лесной горючий материал (ЛГМ) в виде опада лиственницы, сосны и ели демонстрирует различную степень уменьшения массы при нагревании. Наибольшее уменьшение массы наблюдается у опада ели.

3. Экспериментально определены температуры термического разложения для опада лиственницы (195°C), сосны (137°C) и ели (115°C). Это подтверждает высокую пожароопасность ЛГМ, особенно опада сосны и ели, которые начинают разлагаться при относительно низких температурах.

4. Время до начала термической деструкции также различается: у опада лиственницы

оно составляет 1740 сек., у сосны – 320 сек., у ели – 220 сек. Это указывает на то, что разные виды опада имеют различную устойчивость к нагреванию.

5. Визуальные наблюдения при извлечении контейнеров с образцами из термографической установки подтвердили термическое разложение ЛГМ, что свидетельствует о выделении дымовых частиц и обугливание образцов. На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что вероятность возникновения возгорания лесных горючих материалов ели и сосны в результате процессов самовозгорания и вынужденного зажигания достаточно велика.

Список использованных источников

1. Dhaundiyal A. & Gupta V.K. (2014). The Analysis of Pine Needles as a Substrate for Gasification. *Hydro Nepal Journal of Water Energy and Environment*. 15. 10.3126/hn.v15i0.11299
2. Fateh Talal & Richard Franck & Batiot, Benjamin & Rogaume, Thomas & Jocelyn, Luche & Zaida J. (2016). Characterization of the burning behavior and gaseous emissions of pine needles in a cone calorimeter – FTIR apparatus. *Fire Safety Journal*. 82. 91-100. 10.1016/j.firesaf.2016.03.008
3. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров: Монография. Новосибирск: Наука СО РАН, 2008. 404 с.
4. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1966. 491 с.
5. Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К. Термогравиметрическое и кинетическое исследование торфа и гидролизного лигнина // *Международный журнал экспериментального образования*. 2014. № 12. С. 20-27. EDN: TJYAEN
6. Бондарев В.Я., Гусева Л.М. Особенности подготовки сырья для пиролиза древесины // *Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии*. 2014. Т. 4. С. 106-110
7. Song J. Flaming Ignition of PMMA, PineWood and Pine Needle by External Radiation: Autoignition and Radiant Distance Effect. *Fire* 2023, 6, 163. <https://doi.org/10.3390/fire6040163>
8. Полищук Ю.М., Кокорина Н.В., Касаткин А.М. Анализ биоиндикационных свойств сосны сибирской для оценки воздействия факельного сжигания попутного газа на природную среду // *Вестник ЮГУ*. 2006. № 3 (4)
9. Лоскутов С.Р., Казарян Л.К., Пермякова Г.В. Пиролиз хвой *Pinus obovata* ledeb.: термические и термодинамические параметры, кинетика, механизмы реакций // *Химия растительного сырья*. 2025. № 3
10. Валеева А.Р., Валиуллина А.И., Бикбулатова Г.М., Башкиров В.Н. Уменьшение массовой доли свободного формальдегида в фенолоформальдегидных смолах с замещением фенола жидкими продуктами пиролиза древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2021. № 3. С. 94-102
11. Ofoefule, Akuzuo & Igweagwu, Jude & Ugwu, Matthias & Mgbadike, C & Chizoo, Esoneye. (2019). Effects of Pine Needle (*Pinus pinaster*) dust on the performance characteristics of subbituminous coal briquette for Energy Generation. 7. 1-6. 10.5281/zenodo.2639876
12. Петрунина Е.А., Рязанова Т.В., Анискина А.А., Пермякова Г.В., Стасова В.В. Сравнительный анализ физико-химических свойств коры лиственницы и сосны: термический анализ и аналитический пиролиз // *Сибирский лесной журнал*. 2022. № 4. С. 35-49

References

1. Dhaundiyal A. & Gupta V.K. (2014). The Analysis of Pine Needles as a Substrate for Gasification. *Hydro Nepal Journal of Water Energy and Environment*. 15. 10.3126/hn.v15i0.11299.
2. Fateh Talal & Richard Franck & Batiot, Benjamin & Rogaume, Thomas & Jocelyn, Luche & Zaida J. (2016). Characterization of the burning behavior and gaseous emissions of pine needles in a cone calorimeter – FTIR apparatus. *Fire Safety Journal*. 82.91-100. 10.1016/j.firesaf.2016.03.008.
3. Dorrer G.A. Dynamics of forest fires. Novosibirsk: Science SB RAS, 2008. 404 p.
4. D.A. Frank-Kamenetsky. Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics. Nauka, Moscow. 1966. 491 p. 3. Fundamentals of the Practical Theory of Combustion. Ed. by V.V. Pomerantsev. Energoizdat, Leningrad, 1986. 312 p.
5. P.A. Maryandyshev. Thermogravimetric and Kinetic Study of Peat and Hydrolytic Lignin. *International Journal of Experimental Education*. 2014. No. 12. pp. 20-27. EDN: TJYAEN
6. V.Ya. Bondarev L.M. Guseva. Features of the preparation of raw materials for wood pyrolysis // *Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy*, 2014, Vol. 4, P.. 106-110.
7. Song J. Flaming Ignition of PMMA, PineWood, and Pine Needle by External Radiation: Autoignition and Radiant Distance Effect. *Fire* 2023, 6, 163. <https://doi.org/10.3390/fire6040163>
8. Polischuk Y.M., Kokorina N.V., Kasatkin A.M. Analysis of bioindication properties of Siberian pine to assess the impact of associated gas flaring on the environment // *Bulletin of SUSU*. 2006. No. 3 (4).
9. Loskutov S.R., Kazaryan L.K., Permyakova G.V. Pyrolysis of *Picea obovata* ledeb. needles: thermal and thermodynamic parameters, kinetics, reaction mechanisms // *Chemistry of plant raw materials*. 2025. No. 3.
10. Valeeva A.R., Valiullina A.I., Bikbulatova G.M., Bashkirov V.N. Reduction of the mass fraction of free formaldehyde in phenol-formaldehyde resins with the replacement of phenol with liquid wood pyrolysis products // *Woodworking Industry*, 2021, No. 3, P. 94-102.
11. Ofoefule, Akuzuo & Igweagwu, Jude & Ugwu, Matthias & Mgbadike, C & Chizoo, Esoneye. (2019). Effects of Pine Needle (*Pinus pinaster*) dust on the performance characteristics of subbituminous coal briquette for Energy Generation. 7. 1-6. 10.5281/zenodo.2639876.
12. Petrunina E.A., Ryazanova T.V., Aniskina A.A., Permyakova G.V., Stasova V.V. Comparative analysis of the physicochemical properties of larch and pine bark: thermal analysis and analytical pyrolysis // *Siberian Forestry Journal*, 2022, No. 4, P. 35-49.

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, канд. техн. наук; ORCID: 0000-0003-3661-1121, AuthorID: 1099301; a.kurilenko@rgau-msha.ru

Дмитрий Александрович Филимонов, канд. техн. наук; ORCID: 0009-0006-5484-5334, filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru;

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); Associate Professor ORCID: 0000-0003-3526-4332, authorid: 1036988; aguzalov@mail.ru

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

Dmitry A. Filimonov, CSs (Tech), ORCID: 0009-0006-5484-5334, authorid: 1251247; filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru

Вклад авторов

О.Н. Дидманидзе – общее научное руководство исследованием, постановка проблемы и целей, разработка концепции эксперимента, координация проведения лабораторных испытаний, утверждение окончательного текста статьи.

А.В. Евграфов – разработка методологии экспериментальных исследований, привлечение финансирования (руководитель гранта РНФ № 26-16-00015), анализ полученных результатов (температурные зависимости, время зажигания), подготовка первоначального текста рукописи, формулировка выводов, визуализация данных.

А.С. Гузалов – непосредственное проведение экспериментальных исследований (работа с установкой, контейнерами К30), отбор образцов ЛГМ в Московской области, обработка первичных данных с газоанализатора и регистратора ОВЕН, участие в написании раздела «Материалы и методы».

А.В. Куриленко – подготовка образцов ЛГМ к лабораторным исследованиям, работа с литературными источниками по пожароопасности свойств ЛГМ, участие в анализе результатов и оформлении библиографического списка.

Д.А. Филимонов – 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 / Received 06.07.2026

Поступила после рецензирования / Received 27.07.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 28.07.2026

Contribution of the authors

O.N. Didmanidze – overall scientific supervision of the study, formulation of the problem and objectives, development of the experimental concept, coordination of laboratory testing, approval of the final text of the article.

A.V. Evgrafov – development of the experimental research methodology, funding acquisition (manager of the Russian Science Foundation grant No. 26-16-00015), analysis of the obtained results (temperature dependencies, ignition time), preparation of the initial manuscript, formulation of conclusions, and data visualization.

A.S. Guzalov – direct conduct of the experimental research (operation of the setup and K30 containers), collection of forest fuel samples in the Moscow region, processing of primary data from the OWEN gas analyzer and recorder, participation in writing the “Materials and Methods” section.

A.V. Kurilenko – preparation of forest fuel samples for laboratory testing, review of literary sources on the fire hazard and properties of forest fuel, participation in the analysis of the results and preparation of the bibliography.

D.A. Filimonov – technical preparation of the laboratory setup, ensuring the operation of measuring equipment, conducting statistical processing of experimental results, participating in data visualization and preparing graphic materials.

Оригинальная статья

УДК 630*1/9:551.583

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-129-135>



ТИПОЛОГИЯ КАЛЕНДАРНЫХ ЛЕТ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБОСНОВАНИЯ АДАПТАЦИИ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ

В.К. Хлюстов^{1✉}, С.Г. Кокорин²

^{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

¹ vkhlustov@rgau-msha.ru; ORCID:0000-0001-8323-5750

² kokorin@mail.ru; ORCID:0009-0003-9113-0555

Аннотация. Цель исследований – разработать и апробировать методику типологии календарных лет на основе кластерного анализа длинного временного ряда (1836-2025 гг.) для выявления качественных смен климатических режимов и обоснования стратегических направлений адаптации лесного хозяйства региона. Представлен ретроспективный анализ климатических изменений на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области за период 1836-2025 гг. на основе уникального месячного ряда данных. В отличие от традиционных подходов, базирующихся на анализе средних величин, предложена методика дискретной типологии календарных лет методом k-средних с выделением четырех устойчивых кластеров по комплексу гидротермических показателей. С применением непараметрических тестов Манна-Кендалла, оценщика Сенна и теста Петтита доказан необратимый переход региона в новую климатическую эпоху (Эпоха III), характеризующуюся доминированием экстремально жарких (80% частоты) и экстремально влажных (70% частоты) лет. Выявлены точки бифуркации климатической системы (1988 г. – для температуры, 1993 г. – для осадков). Обоснована неэффективность сохранения еловых монокультур в новых условиях и предложены приоритетные направления адаптации лесного хозяйства: смена лесообразующих пород, переход к регулируемой гидролесомелиорации и актуализация нормативов санитарной безопасности.

Ключевые слова: лесное хозяйство, изменение климата, типология лет, кластерный анализ, Ленинградская область, адаптация, экстремальные явления, тест Петтита, ельники

Для цитирования: Хлюстов В.К., Кокорин С.Г. Типология календарных лет как инструмент обоснования адаптации лесного хозяйства Ленинградской области к климатическим изменениям. Природообустройство. 2026;Т.19(3):129-135. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-129-135>

Scientific article

TYPOLOGY OF CALENDAR YEARS AS A TOOL FOR SUBSTANTIATING THE ADAPTATION OF FORESTRY IN THE LENINGRAD REGION TO CLIMATE CHANGE

V.K. Khlyustov^{1✉}, S.G. Kokorin²

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

¹ vkhlustov@rgau-msha.ru; ORCID:0000-0001-8323-5750

² kokorin@mail.ru; ORCID:0009-0003-9113-0555

Abstract. This article presents a retrospective analysis of climate changes in the territory of St. Petersburg and Leningrad region for the period from 1836 to 2025 based on a unique monthly data series. Unlike traditional approaches that rely on the analysis of average values, a method for discrete typology of calendar years using the k-means clustering technique was proposed, with four stable clusters identified according to a complex of hydrothermal indicators. Using nonparametric Mann-Kendall, Sen's estimator, and Pettitt tests, an irreversible transition of the region into a new climatic era (Era III) has been proven, characterized by the predominance of extremely hot (80% frequency) and extremely wet (70% frequency) years. Points of bifurcation of the climate system have been identified (1988 for temperature, 1993 for precipitation). The inefficiency of preserving spruce monocultures under new conditions has been justified, and priority directions for adapting forestry have been proposed: changing the dominant tree species, transitioning to regulated hydro-forest improvement, and updating safety sanitary norms.

Keywords: climate change, year typology, cluster analysis, forestry, Leningrad region, adaptation, extreme phenomena, Pettitt test, spruce stands

For citation: Khlyustov V.K., Kokorin S.G. Typology of calendar years as a tool for substantiating the adaptation of forestry in the Leningrad region to climate change. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):129-135. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-129-135>

Введение. Проблема адаптации лесного хозяйства к изменяющемуся климату является одной из наиболее острых для Северо-Западного региона России. В течение последних десятилетий проблема изменения климата приобрела глобальное значение, что проявляется через все климатические характеристики: температуру и влажность воздуха, количество и равномерность осадков. Согласно данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с 1976 по 2020 гг. среднегодовое повышение температуры воздуха в России составило 0,51°C за десятилетие [1]. В большинстве регионов Российской Федерации наблюдается тенденция увеличения годовых сумм атмосферных осадков в среднем со скоростью 2,2% за десятилетие [2].

Для хвойных лесов Ленинградской области, исторически формировавшихся в условиях умеренно-континентального климата, критическими становятся не столько изменения средних многолетних значений, сколько частота наступления лет с аномальными гидротермическими параметрами, провоцирующими вспышки вредителей, ветровалы и усыхание древостоев [3]. Изменение климатических факторов оказывает существенное воздействие на леса: на видовое разнообразие лесных насаждений, продуктивность и рост древостоев, а также на выполнение лесохозяйственных мероприятий [4, 5]. Традиционные подходы к оценке климатических трендов, основанные на анализе средних величин, часто маскируют рост частоты экстремальных событий, которые оказывают решающее влияние на устойчивость лесных экосистем [6].

Цель исследований: разработать и апробировать методику типологии календарных лет на основе кластерного анализа длинного временного ряда (1836-2025 гг.) для выявления качественных смен климатических режимов и обоснования стратегических направлений адаптации лесного хозяйства региона.

Материалы и методы исследований. Объект исследований – климатический режим территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Информационная база представлена уникальным массивом месячных данных о температуре воздуха и сумме осадков за период 1836-2025 гг. (190 лет наблюдений) (рис. 1),

дополненным результатами классификации календарных лет по четырем кластерам температуры и осадков [7].

Для оценки внутригодовой структуры экстремальных лет проведен детальный анализ среднемесячных значений температуры и сумм осадков с группировкой по сезонам: зима – декабрь-февраль; весна – март-май; лето – июнь-август; осень – сентябрь-ноябрь.

Методология исследований включала в себя следующее.

1. Кластеризация. Исходные данные были обработаны методом k-средних (k-means), что позволило выделить 4 устойчивых типа лет:

– Кластер 1: Холодные/Сухие.

– Кластер 2: Умеренные (климатическая норма XIX-XX вв.).

– Кластер 3: Теплые/Влажные.

– Кластер 4: Экстремально жаркие/Экстремально влажные.

2. Расчет частот. Для анализа динамики рассчитаны 10-летние скользящие частоты встречаемости каждого кластера в неперекрывающихся декадах (1836-1845, ..., 2016-2025).

3. Статистический анализ. Для оценки значимости трендов частот использованы тест Манна-Кендалла (Mann-Kendall test) [8] и оценщик наклона Сенна (Sen's slope estimator) [9]. Для выявления точек резкого изменения режима применен тест Петтита (Pettitt's test) [10]. Данные методы широко применяются в современной практике анализа климатических и гидрологических временных рядов [11, 12].

Результаты и их обсуждение. *Динамика частот климатических типов лет.* Анализ распределения кластеров по неперекрывающимся десятилетиям выявил три отчетливые эпохи в развитии климата региона (рис. 2).

На графике рисунка 2 по горизонтальной оси указаны десятилетия; по вертикальной оси – частота встречаемости кластера, %.

Эпоха I (1836-1975 гг.) – стабильный умеренный режим. В течение 140 лет доминировали годы Кластеров 1 и 2 (холодные и умеренные). Суммарная частота этих типов в отдельные десятилетия достигала 90-100%. Частота появления экстремально жарких лет (Кластер 4) стремилась к нулю, фиксируясь лишь как единичные случайные события. Данный период соответствует

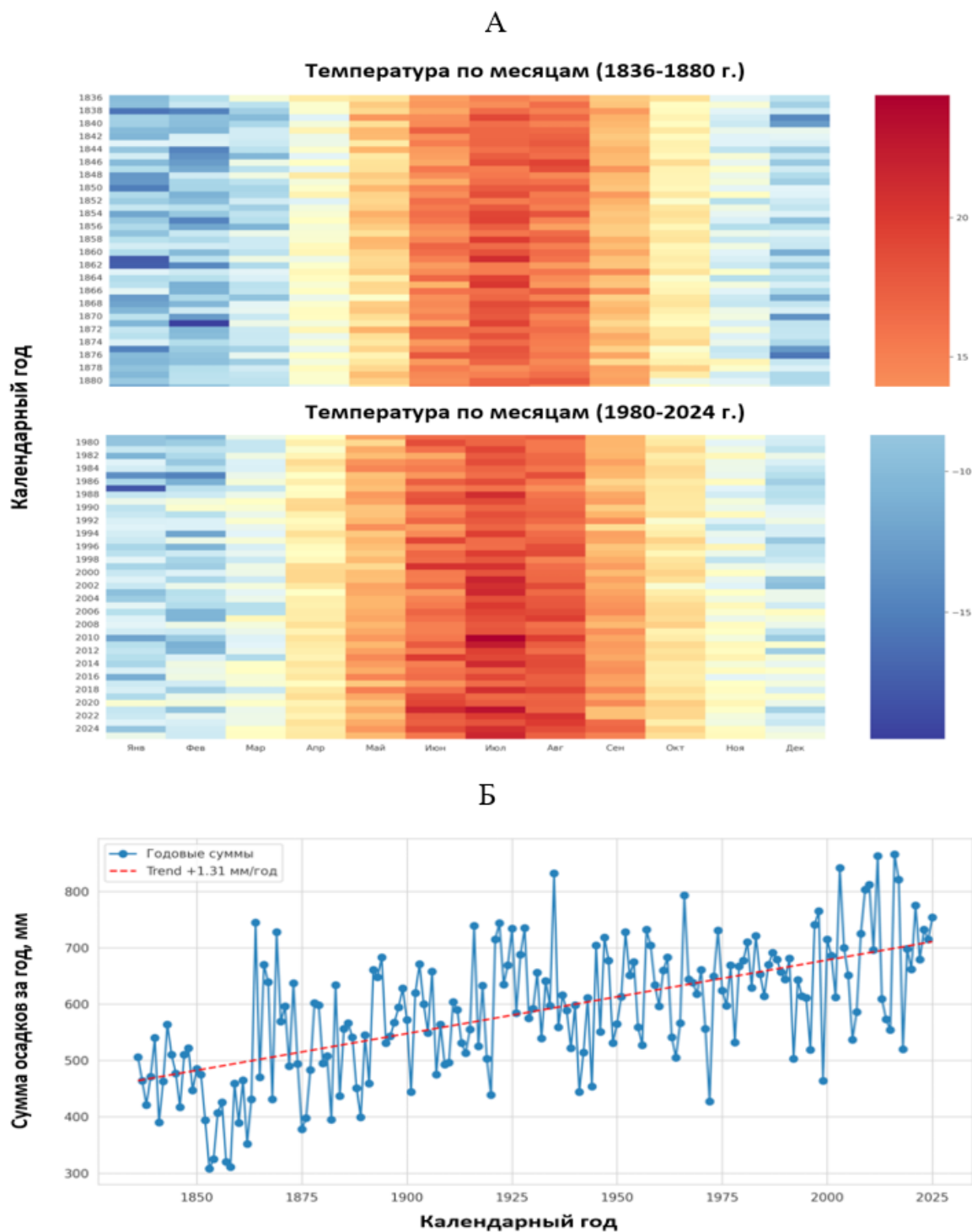


Рис. 1. Цветовая диаграмма среднемесячной температуры воздуха по годам (А) и флюктуации суммы осадков по годам (Б) за период 190 лет

Fig. 1. Color diagram of the average monthly air temperature by years (A) and fluctuations in the amount of precipitation by years (B) for a period of 190 years

исторической климатической норме, на которой базируются действующие лесоустроительные инструкции.

Эпоха II (1976-1995 гг.) – переходный период, характеризующийся ростом вариативности и началом вытеснения холодных лет теплыми (Кластер 3). Частота Кластера 4 начинает уверенный рост, достигая 10-30% в десятилетии.

Наблюдается дестабилизация прежнего равновесия.

Эпоха III (1996-2025 гг.) – эпоха экстремумов. В последние три десятилетия произошла фундаментальная смена режима. По данным последнего окна (2016-2025 гг.):

– частота экстремально жарких лет (Кластер 4) достигла 80%;

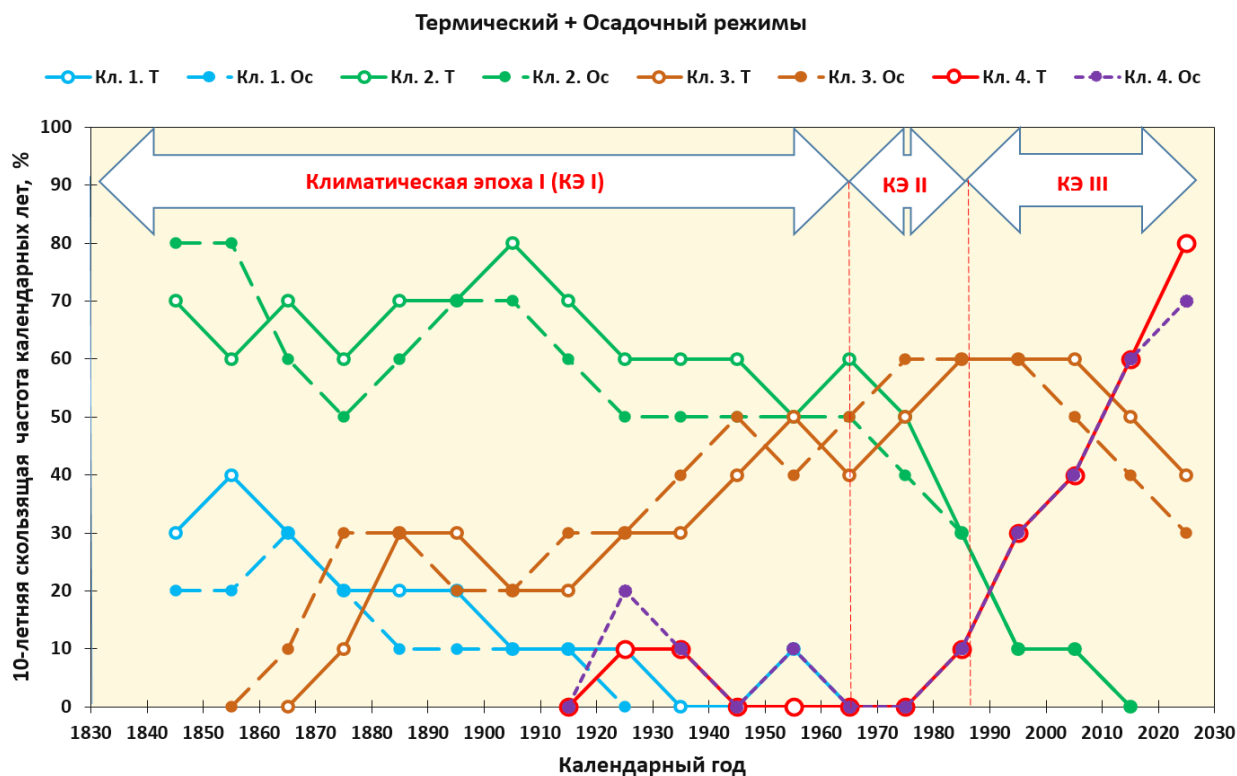


Рис. 2. Динамика 10-летней скользящей частоты календарных лет термического и осадочного режимов по кластерам и климатическим эпохам

Fig. 2. Dynamics of the 10-year sliding frequency of calendar years of the thermal and sedimentary regime by clusters and climatic epochs

– частота экстремально влажных лет (Кластер 4) составила 70%;

– доля холодных (Кластер 1) и умеренных (Кластер 2) лет снизилась до 0%.

Таким образом, климатическая «норма» сместилась в зону экстремальных значений. Годы, которые в XIX в. считались аномально теплыми и влажными, стали преобладающим типом. Полученные по представленной методике результаты убедительно указывают на значительную трансформацию климатических условий в регионе за последние десятилетия, что позволяет более детально оценить качественные сдвиги в климатической системе.

Гидротермическая структура экстремальных лет (Кластер 4). Детальный анализ месячных данных внутри лет, классифицированных как Кластер 4, выявил специфические черты нового климатического режима, критичные для лесного хозяйства.

Зимний период (декабрь-февраль): в годы Кластера 4 зима претерпевает фундаментальные изменения по сравнению с исторической нормой (Кластеры 1-2).

Температурный режим: средняя температура зимних месяцев в Кластере 4 составляет +0,4°C (против –9,4°C в Кластере 1).

Январь: среднее значение составляет –0,5°C. В отдельные годы (например, 2020, 2024 гг.) наблюдались положительные среднемесячные температуры, что исключает формирование устойчивого снежного покрова.

– Февраль: среднее значение составляет +0,9°C. Частые оттепели приводят к чередованию замерзания и оттаивания почвы.

Режим увлажнения: сумма осадков за зиму в Кластере 4 достигает в среднем 180-190 мм (в пересчете на воду), что на 40-50% выше, чем в сухие периоды. Однако из-за положительных температур эти осадки часто выпадают в виде дождя или мокрого снега, приводя к образованию ледяной корки на почве и стволах деревьев.

– Декабрь: средняя сумма осадков составляет 68 мм (максимум в ряду данных – более 100 мм в отдельные годы); январь – 59 мм; февраль – 54 мм.

Последствия для леса. Сочетание отсутствия снежного «одеяла» (по причине $t > 0^\circ\text{C}$) и промерзания почвы во время кратковременных похолоданий приводит к вымерзанию корней ели обыкновенной (*Picea abies*). Одновременно высокая влажность и положительная температура создают идеальные условия для развития грибных патогенов и преждевременного пробуждения стволовых вредителей.

Летний период (июнь-август). Лето в Кластере 4 характеризуется не только жарой, но и аномальным переувлажнением:

- средняя температура лета составляет +19,2°C (против +15,7°C в Кластере 1). Пик приходится на июль (+21,1°C);

- летняя сумма осадков достигает 326 мм, что значительно превышает испаряемость в отдельные периоды, вызывая временное переувлажнение почв даже на дренированных территориях;

- июльская средняя сумма осадков составляет 112 мм, при этом частота ливней (> 30 мм/сутки) возрастает в 3-4 раза по сравнению с нормой.

Статистическое подтверждение смены режимов. Результаты применения непараметрических тестов к рядам частот Кластера 4 подтверждают высокую значимость выявленных трендов.

1. Тест Манна-Кендалла: для частот жарких лет получено значение $Z = +5,8$ ($p < 0,001$), для влажных лет $Z = +5,4$ ($p < 0,001$). Это свидетельствует о высоко статистически значимом восходящем тренде.

2. Оценщик Сенна: наклон тренда составляет +2,1% за десятилетие для температуры и +1,9% для осадков. Это означает, что каждые 10 лет риск наступления критических условий возрастает более чем на 2%.

3. Тест Петтита: выявлены четкие точки бифуркации, разделяющие климатические эпохи:

- для температурного режима – 1988 г.;
- для гидрологического режима – 1993 г.

Значимость разрывов подтверждена низкими значениями p -value ($< 0,01$), что указывает на необратимый скачкообразный переход системы в новое состояние.

По горизонтальной оси (рис. 3) представлены десятилетия, по вертикальной оси – частота встречаемости Кластера 4. Вертикальными линиями обозначены точки бифуркации: 1988 г. – для температурного, 1993 г. – для осадочного режимов.

Последствия для лесного хозяйства Ленинградской области. Выявленная трансформация климата создает критические вызовы для современного лесного хозяйства. Наиболее уязвимыми породами являются хвойные, и прежде всего – чистые ельники.

1. Ель обыкновенная (*Picea abies*), являющаяся лесобразующей породой региона, находится в зоне максимального риска. Сочетание мягких бесснежных зим (средняя температура зимы в Кластере 4 – около +0,4°C) и жаркого влажного лета приводит:

- к вымерзанию корней ввиду отсутствия снежного покрова;

- к массовым вспышкам короеда-типографа (*Ips typographus*), цикл развития которого ускоряется в теплых условиях;

- к развитию корневых гнилей на переувлажненных почвах.

2. Увеличение частоты зимних оттепелей с мокрым снегом и дождем приводит к образованию ледяной корки на кронах и размоканию почв, что многократно увеличивает риск валежистости древостоев.

3. Действующие нормативы лесовосстановления и охраны лесов ориентированы на климат Эпохи I и II. На основе проведенного анализа сформулированы следующие стратегические направления адаптации лесного хозяйства Северо-Западного региона.

1. Трансформация породного состава предусматривает:

- поэтапный отказ от создания чистых еловых культур;

- внедрение в состав насаждений климатически устойчивых пород (лиственницы сибирской и европейской, которая устойчива к переувлажнению, дуба черешчатого, клена остролистного, ясеня обыкновенного).

2. Совершенствование лесозащитных мероприятий предусматривает:

- переход к мониторингу вредителей на основе суммы эффективных температур внутри выделенных кластеров;

- использование данных дистанционного мониторинга санитарного состояния лесов, что является эффективным способом своевременного выявления очагов усыхания и развития вредных организмов;

- сокращение нормативных сроков выборки зараженной древесины с 30 до 10-14 дней в весенне-летний период.

3. Гидролесомелиорация нового типа предусматривает:

- реконструкцию осушительных систем с переходом от простого осушения к регулируемому водному хозяйству (шлюзы-регуляторы) для управления уровнем грунтовых вод в условиях экстремальных ливней и зимних паводков.

4. Актуализация нормативов предполагает:

- пересмотр схем лесорастительного зонирования области с учетом новой частоты экстремумов;

- введение коэффициента климатического риска при проектировании лесовосстановительных работ.

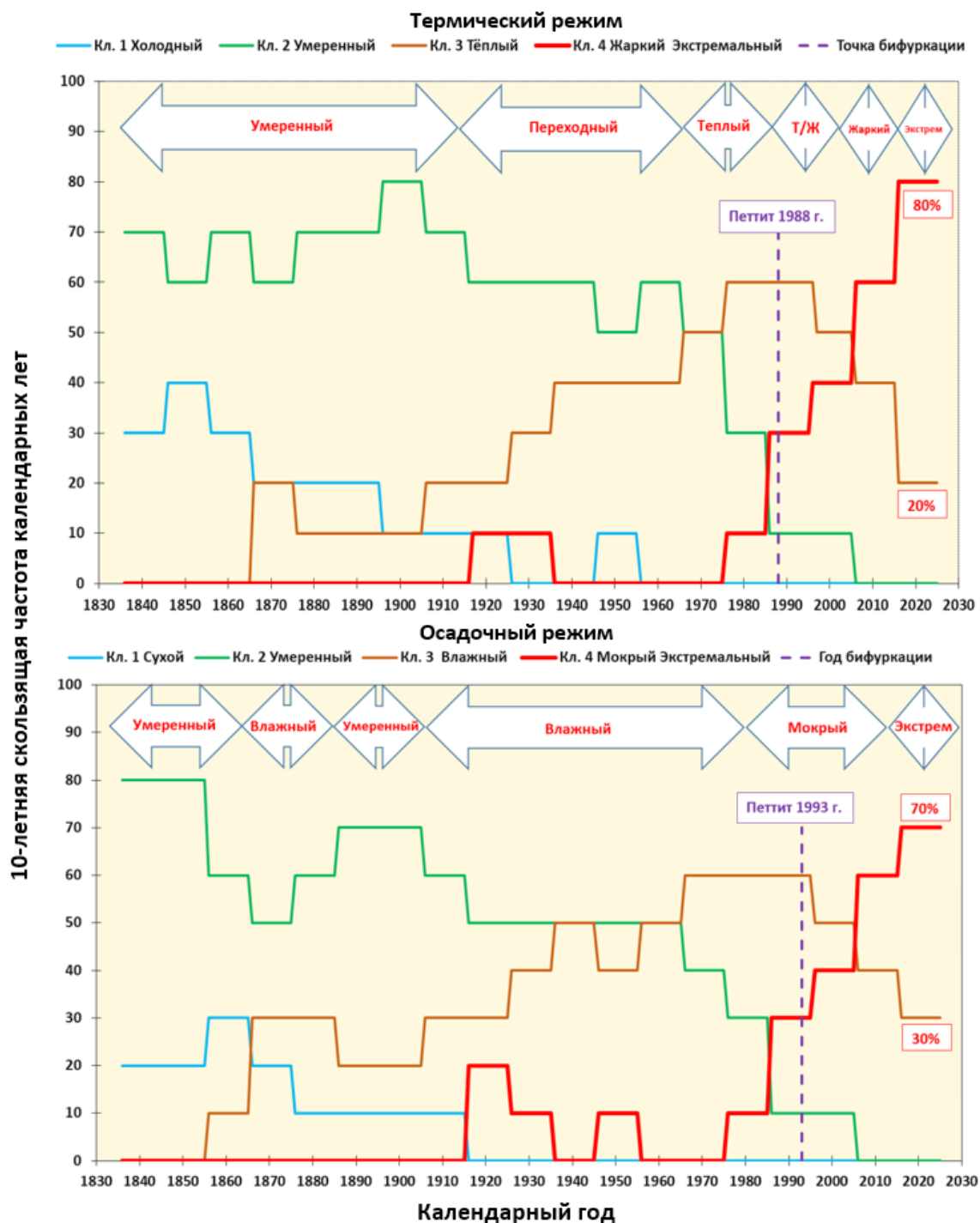


Рис. 3. Динамика 10-летней скользящей частоты календарных лет с обозначением точки перелома термического и осадочного режимов по критерию Петтита

Fig. 3. Dynamics of the 10-year sliding frequency of calendar years with the designation of the breaking point of thermal and sedimentary regimes according to the Pettit criterion

Выводы

Применение методики типологии календарных лет позволило доказать, что климат Ленинградской области претерпел качественную трансформацию, перейдя в Эпоху III с доминированием экстремально жарких и влажных условий. Традиционные подходы к управлению лесным фондом, основанные на сохранении исторического породного состава, становятся

экономически и экологически несостоятельными. Адаптация отрасли требует радикального пересмотра лесокультурной политики, приоритета смешанных насаждений и внедрения гибких систем управления водным режимом. Предложенная методика может быть рекомендована для использования при разработке лесных планов субъектов РФ и актуализации нормативно-правовой базы в условиях меняющегося климата.

Список использованных источников

1. Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород Европейского Севера России // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 2 (386). С. 9-25. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25. EDN: JHBDVE
2. Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г. и др. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531-546. DOI: 10.31857/S0024114821050077. EDN: OWSSBF
3. Замолодчиков Д.Г. Потенциальные уязвимости и адаптация лесов Приморского края к изменениям климата // Вестник ИРГЦХА. 2013. № 54. С. 56-63. EDN: PVDWQH
4. Мартынюк А.А., Филипчук А.Н. Изменения климата и леса: возможные последствия и план действий // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 1 (27). С. 276-279. EDN: YQESON
5. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Потенциальная древесная продуктивность лесов Московской области в условиях изменения климата // Лесохозяйственная информация. 2025. № 1. С. 36-48. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.04. EDN: YQESON
6. Торжков И.О., Кушнир Е.А., Константинов А.В. и др. Оценка влияния ожидаемых изменений климата на лесное хозяйство // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 40-49
7. Данные метеорологических наблюдений станции Санкт-Петербург (1836-2025 гг.). [Электронный ресурс] / Росгидромет. Режим доступа: <http://meteo.ru> (дата обращения: 20.05.2026)
8. Mann H.B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*. 1945. Vol. 13, № 3. Pp. 245-59. DOI: 10.2307/1907187
9. Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63, № 324. Pp. 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934
10. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // *Applied Statistics*. 1979. Vol. 28, № 2. Pp. 126-135. DOI: 10.2307/2346729
11. Gaponov V.M., Elizaryev A.N., Aksenov S.G., Longobardi A. Analysis of trends in annual time series of precipitation in the Republic of Bashkortostan, Russian Federation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 350. Art. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012003
12. Tarakanov D., Elizaryev A., Fashchevskaya T., Khasanov I., Mikhailov S. Changes in the hydrological regime and Climatic variability assessment within the Belaya River catchment, Russia // *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 93. Art. 04002. DOI: 10.1051/bioconf/20249304002

Информация об авторах

Виталий Константинович Хлюстов, д-р с.-х. наук, профессор, WoS ResearcherID AAE-7093-2022 Scopus AuthorID: 57210104945; ORCID: 0000-0001-8323-5750; SPIN-код: 4645-0960; AuthorID: 507286; vkhlustov@rgau-msha.ru

Сергей Геннадьевич Кокорин, аспирант, kokorins82@mail.ru; ORCID: 0009-0003-9113-0555

Вклад авторов

Хлюстов В.К. – разработка программы и проведение исследований

Кокорин С.Г. – сбор информации и разработка рекомендаций

Поступила в редакцию / Received 12.03.2026

Поступила после рецензирования / Received 24.05.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 27.05.2026

References

1. Prozherina N.A., Nakvasina E.N. Climate change and its influence on adaptation and intraspecific variability of coniferous species of the European North of Russia. *Forest Journal*. 2022. № 2(386). P. 9-25. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25. EDN: JHBDVE
2. Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., et al. Role of forests in the adaptation of natural systems to climate changes // *Dendrology*. 2021. № 5. P. 531-546. DOI: 10.31857/S0024114821050077. EDN: OWSSBF
3. Zamolodchikov D.G. Potential vulnerabilities and adaptation of the forests of the Primorsky Territory to climate changes // *Bulletin of IrSHA*, 2013. № 54. P. 56-63. EDN: PVDWQH
4. Martynyuk A.A., Filipchuk A.N. Changes in climate and forests: possible consequences and action plan // *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2017. V. 5. № 1(27). P. 276-279. EDN: YQESON
5. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gosteva D.Yu. Potential tree productivity of forests in the Moscow region in the conditions of climate change // *Forest management information*. 2025. № 1. P. 36-48. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.04. EDN: YQESON
6. Torzhkov I.O., Kushnir E.A., Konstantinov A.V., et al. Assessment of the influence of expected climate changes on forestry // *Meteorology and hydrology*. 2019. № 3. P. 40-49.
7. Meteorological observations of the St. Petersburg station (1836-2025) [Electronic resource] / *Roshydromet*. – Available at: <http://meteo.ru> (accessed: 20.05.2026).
8. Mann H.B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*. 1945. Vol. 13, № 3. P. 245-59. DOI: 10.2307/1907187.
9. Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63, № 324. P. 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
10. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // *Applied Statistics*. 1979. Vol. 28, № 2. P. 126-135. DOI: 10.2307/2346729.
11. Gaponov V.M., Elizaryev A.N., Aksenov S.G., Longobardi A. Analysis of trends in annual time series of precipitation in the Republic of Bashkortostan, Russian Federation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 350. Art. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012003.
12. Tarakanov D., Elizaryev A., Fashchevskaya T., Khasanov I., Mikhailov S. Changes in the hydrological regime and Climatic variability assessment within the Belaya River catchment, Russia // *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 93. Art. 04002. DOI: 10.1051/bioconf/20249304002.

Information about the authors

Vitaly K. Khlyustov, DSs (Agro), Professor, WoS ResearcherID AAE-7093-2022 Scopus AuthorID: 57210104945; ORCID: 0000-0001-8323-5750; SPIN-code: 4645-0960; AuthorID: 507286; vkhlustov@rgau-msha.ru

Sergey Kokorin, post graduate student, kokorins82@mail.ru; ORCID: 0009-0003-9113-0555

Contribution of the authors

Khlyustov V.K. – program development and research

Kokorin S.G. – collection of information and development of recommendations

Оригинальная статья

УДК 634.032.5; 581.58; 630.24:631.62

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-136-144>



АНАЛИЗ РОСТА И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИБРИДНОЙ ФОРМЫ ДУБА В ЗАСУШЛИВЫХ УСЛОВИЯХ

С.Н. Крючков¹, А.В. Солонкин², А.С. Соломенцева^{3✉},
С.А. Егоров⁴, А.К. Романенко⁵, Д.А. Горбушова⁶

^{1,2,3,4,5,6} Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук; г. Волгоград, Российская Федерация

¹ kryuchkovs@vfanc.ru; ORCID0000-0001-8338-6460

² mishamax73@mail.ru; ORCID0000-0002-1576-7824

³ alexis2425@mail.ru *ORCID0000-0002-5857-1004

⁴ egorov-sa@vfanc.ru; ORCID0000-0001-8234-7355

⁵ romanenko-ak@vfanc.ru; ORCID0000-0002-6705-6135

⁶ gorbushova-d@vfanc.ru; ORCID0009-0006-4978-4143

Аннотация. Цель исследования: изучение эффективности межэкотипического скрещивания дуба черешчатого с использованием Ольховского экотипа как источника ценных наследственных признаков. Объектами исследования послужили плюсовые деревья Чапурниковского (Красноармейский район Волгоградской области) и Ольховского (Ольховский район Волгоградской области) экотипов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания высокопродуктивных и устойчивых форм дуба для лесоразведения в условиях засушливого региона. Проведены исследования на маточной лесосеменной плантации площадью 3,5 га. Методы исследования включали биометрический анализ, рентгенографию семян с помощью передвижной рентгеновской установки ПРДУ-2, оценку физиологических показателей, дисперсионный анализ и статистическую обработку полученных данных. Выявленный гетерозисный эффект в ходе исследований был отмечен у гибридной формы, которая превосходила контрольные образцы по высоте и диаметру ($t = 2,8$ и $2,4$ соответственно). Диаметр ствола гибридной формы превысил показатели контроля на 15% (1,35 см у контроля и 1,55 см у гибрида). Водоудерживающая способность листьев гибрида составила 43,5-55,0% от начальной массы, что сравнимо с родительскими формами. Интенсивность транспирации гибрида (387 мг/г/час) оказалась на 16% ниже, чем у Чапурниковского экотипа (463 мг/г/час) и на 19% выше, чем у Ольховского (326 мг/г/час). Установлено преобладающее влияние материнского растения на развитие гибрида (55% вариативности фенотипических характеристик), проведенные исследования показали высокую однородность посадочного материала у *Q. robur* (Ольховский экотип) ($C_v < 15\%$). Рентгенографическое исследование позволило выявить внутренние дефекты желудей и определить качество посевного материала, а также установить влияние повреждений на дальнейшее состояние семенного материала. Полученные результаты имеют важное значение для развития селекционного семеноводства и создания устойчивых лесных культур в аридных регионах. Практическая значимость работы определяется возможностью использования разработанных подходов для создания высокопродуктивных насаждений дуба в условиях засушливого климата.

Работа выполнена по теме Государственного задания FNFE-2025-0009 «Создание новых генотипов, сортов, форм древесных, кустарниковых, культурных растений с высокоценными признаками продуктивности, качества, устойчивостью к био- и абиострессорам с использованием классических и современных методов селекции, новые инновационные технологии в питомниководстве и семеноводстве, для решения задач по предотвращению деградации и опустынивания агроландшафтов в условиях изменяющегося климата.»

Ключевые слова: дуб черешчатый, селекция, рост, развитие, засухоустойчивость

Формат цитирования: Крючков С.Н., Солонкин А.В., Соломенцева А.С., Егоров С.А., Романенко А.К., Горбушова Д.А. Анализ роста и физиологических показателей гибридной формы дуба в засушливых условиях. Природообустройство. 2026;Т.19(3):136-144. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-136-144>

ANALYSIS OF THE GROWTH AND PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF THE HYBRID FORM OF OAK IN ARID CONDITIONS

S.N. Kryuchkov¹, A.V. Solonkin², A.S. Solomentseva^{3✉},
S.A. Egorov⁴, A.K. Romanenko⁵, D.A. Gorbushova⁶

^{1,2,3,4,5,6} Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences; 97 Universitetskiiy ave., Volgograd, 400062, Russia

¹ kryuchkovs@vfanc.ru; ORCID0000-0001-8338-6460

² mishamax73@mail.ru; ORCID0000-0002-1576-7824

³ alexis2425@mail.ru *ORCID0000-0002-5857-1004

⁴ egorov-sa@vfanc.ru; ORCID0000-0001-8234-7355

⁵ romanenko-ak@vfanc.ru; ORCID0000-0002-6705-6135

⁶ gorbushova-d@vfanc.ru; ORCID0009-0006-4978-4143

Abstract. The aim of the study was to study the effectiveness of the interecotypic crossing of the black oak using the Alder ecotype as a source of valuable hereditary traits. The objects of the study were the positive trees of Chapurnikovskiy (Krasnoarmeyskiy district of the Volgograd region) and Olkhovskiy (Olkhovskiy district of the Volgograd region) ecotypes. The relevance of the study is due to the need to create highly productive and sustainable oak forms for afforestation in an arid region. Studies have been conducted on a 3.5-hectare royal forest seed plantation. The research methods included biometric analysis, radiography of seeds using a mobile X-ray unit PRDU-2, assessment of physiological parameters, analysis of variance and statistical processing of the data obtained. A pronounced heterotic effect was observed in the hybrid form, which exceeded the control samples in height and diameter ($t = 2,8$ and $2,4$, respectively). The diameter of the hybrid-shaped barrel exceeded the control values by 15% (1,35 cm for the control and 1,55 cm for the hybrid). The water retention capacity of the hybrid leaves was 43,5-55,0% of the initial mass, which is comparable to the parent forms. The transpiration rate of the hybrid (387 mg/g/hour) was 16% lower than that of the Chapurnik ecotype (463 mg/g/hour) and 19% higher than that of the Olkhovskiy (326 mg/g/hour). The predominant influence of the mother plant on the development of the hybrid has been established (55% of the variability of phenotypic characteristics), studies have shown a high uniformity of planting material in *Q. robur* (Olkhovskiy ecotype) ($C_v < 15\%$). X-ray examination revealed the internal defects of the acorns and determined the quality of the seed material, as well as the effect of damage on the further condition of the seed material. The results obtained are important for the development of selective seed production and the creation of sustainable forest crops in arid regions. The practical significance of the work is determined by the possibility of using the developed approaches to create highly productive oak plantations in arid climates.

The work was carried out on the topic of the State assignment FNFE – 2025-0009 «Creation of new genotypes, varieties, forms of woody, shrubby, cultivated plants with high-value signs of productivity, quality, resistance to bio- and abiostressors using classical and modern breeding methods, new innovative technologies in nursery and seed production, to solve problems of preventing degradation and desertification of agricultural landscapes in a changing climate».

Keywords: oak petiolate, breeding, growth, development, drought resistance

Format of citation: Kryuchkov S.N., Solonkin A.V., Solomentseva A.S., Egorov S.A., Romanenko A.K., Gorbushova D.A. Analysis of the growth and physiological parameters of the hybrid form of oak in arid conditions. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):136-144. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-136-144>

Введение. Для обеспечения долгосрочного развития лесного хозяйства страны необходимо придерживаться принципов непрерывного и рационального использования лесных ресурсов, а также активно работать над улучшением качественных характеристик лесных насаждений, с учётом увеличивающегося значения природоохранной, санитарно-гигиенической и рекреационной роли лесов [1]. Ведущее место в решении данной проблемы занимает селекция, поэтому

ее перевод на основу семеноводства и питомниководства приведет к повышению производительности, устойчивости и качественной структуры новых лесных насаждений. В зависимости от принадлежности к группе лесов и степени их освоённости, основными задачами селекции являются повышение продуктивности, устойчивости и качественной структуры насаждений [2]. Исследования в данной области позволяют обосновать возможность и целесообразность создания

сортов древесных пород для определенных типов условий местопроизрастания, типов лесных насаждений, а также проверить наследственные свойства плюсовых деревьев по их семенным потомствам, получить новые ценные для лесного хозяйства формы древесных пород, расширив гибридизационные работы на специальных коллекционных плантациях засушливого региона (Волгоградская область).

Цель исследований: оценка представителей рода Дуб (*Quercus*) с использованием в качестве опылителя Ольховского экотипа (Волгоградская область) – рекордно долголетнего плюсового дерева для получения в потомстве долговечных, устойчивых к комплексу неблагоприятных факторов растений – адаптационного гетерозиса.

Материалы и методы исследований. По мнению авторитетных ученых (И.В. Мичурин, А.С. Яблоков, С.С. Пятницкий, А.В. Альбенский) [3] – чем старше возраст дерева, тем сильнее оно передает при скрещивании свои свойства гибридам, чем и был обусловлен выбор формы для опыления. Внутривидовые скрещивания выделенных экотипов дуба проводились в Кировском ССК (г. Волгоград) на маточной лесосеменной плантации, в количестве 150 шт. деревьев на площади 3,5 га. Возраст – 19 лет, средняя высота опытных деревьев 7 м, диаметр – 16 см. Жизненность – 4 балла, хорошая (определялась по методике В.А. Алексеева [4]), плодоношение – 4 балла (хорошее), исследовалось по методике В.Г. Каппера, дополненной И.И. Рацем и С.Н. Крючковым [5]. Опыты включали в себя 2 выделенных экотипа плюсовых деревьев в Волгоградской области:

– Чапурниковский. Чапурниковская балка (Красноармейский район, координаты 48.483233N; 44.500671E). 36 плюсовых деревьев. Средний возраст 90-110 лет, средняя высота 22 м, диаметр 85 см. Условия произрастания – темно-цветные выщелоченные каштановые почвы, поражение растений болезнями и вредителями не отмечено.

– Ольховский. Памятник природы регионального значения «Дубы-великаны» в Ольховском районе Волгоградской области (координаты 49.79792669274N, 44.428132067878E). 6 плюсовых деревьев, возраст более 350 лет, высота 20 м, диаметр 170 см. Состояние хорошее (4 балла). Плодоносят обильно (рис. 1).

Для определения качества урожайности сформированных желудей использовалась многофункциональная передвижная рентгеновская установка ПРДУ-02.

Расчет доверительного интервала проводился по формуле:

$$x \pm t_{0,05} \cdot \sqrt{\frac{s}{n}} \quad (1)$$

где t -критерий Стьюдента, объем выборки (n) – 30 шт. растений на вариант, уровень значимости $p < 0,05$

Критерий Фишера рассчитывался по формуле:

$$F = \frac{\delta}{\delta_{\text{сред}}} \cdot 10, \quad (2)$$

где δ – дисперсия между и внутри группами, 10 – коэффициент масштабирования.

Биометрические показатели, возраст, оценку плодоношения у опытных отцовских и материнских растений фиксировали с помощью измерений высоты, диаметра на высоте 1,3 м и проекции кроны (С-Ю, З-В).

Вес 1000 шт. желудей с дерева определяли с помощью лабораторных весов ВК-600.

Засухоустойчивость определяли по методу Н.И. Туманова. Интенсивность транспирации оценивалась с помощью весового метода, который заключается в измерении количества воды, теряемой листьями через испарение. В ходе эксперимента лист дуба аккуратно срезали, сохраняя черешок. Для поддержания непрерывности водных потоков в проводящих сосудах, нижний срез черешка производили под водой. Далее черешок помещали в пробирку, наполненную водой, а для предотвращения испарения с поверхности



Рис. 1. Общий вид объектов исследований
Fig. 1. General view of the research objects

воды пространство вокруг черешка в пробирке герметизировали ватой. Прибор с листом помещали в спокойные условия без резких перепадов температур и сквозняков, взвешивая пробирку через каждые 2 часа повторно, по разнице в весе определяя количество испаренной растением воды.

Наблюдение за погодными условиями проводили путем ежедневного мониторинга и сбора информации на сайте Worldweather [6].

Координаты отмечались с помощью навигатора Garmin.

Результаты исследований были обработаны в программах Excel, Biostat, и Statistica.

Результаты и их обсуждение. В значительной степени влияют на проведение скрещиваний растений на питомниках погодные условия – через воздействие на процессы опыления, завязывания плодов и развития гибридных семян [7, 8]. Эти факторы могут как способствовать, так и препятствовать успешному скрещиванию, и только применение регуляторов и стимуляторов роста и плодоношения может в ряде случаев решить проблему воспроизводства отдельных пород [9, 10, 11].

На протяжении 3-летнего периода наблюдений самый низкий температурный показатель был зафиксирован в январе 2024 года (-6°C). В 2023 году средняя температура января составила -4°C , а в 2025 году $-5,5^{\circ}\text{C}$.

В апреле наблюдалось устойчивое повышение температуры по годам, увеличиваясь с $+11,5^{\circ}\text{C}$ в 2023 году до $+16,5^{\circ}\text{C}$ в 2025 году. Температурные показатели в мае были относительно одинаковыми по всем годам (в диапазоне от $+13,5^{\circ}\text{C}$ до $+16,5^{\circ}\text{C}$), май 2024 года был самым теплым. Июнь характеризовался стабильно жаркой погодой (от $+21^{\circ}\text{C}$ до $+23^{\circ}\text{C}$). В июле отмечался постепенный рост температуры: с $+23,5^{\circ}\text{C}$ в 2023 году до $+26^{\circ}\text{C}$ в 2025 году. Август 2023 года стал самым жарким месяцем ($+27,5^{\circ}\text{C}$), после чего последовало снижение температуры до $+23,5^{\circ}\text{C}$ в 2025 году.

В годы исследований была отмечена четко выраженная сезонность – минимальные значения температуры фиксировались в январе, максимальные – в июле-августе. Пиковые показатели влажности наблюдались зимой и поздней осенью, минимальные – летом. В 2023 году был отмечен аномально теплый февраль и засушливый август, в 2024 – холодный январь и повышение влажности в ноябре, в 2025 году повышенные положительные температуры наблюдались в сентябре и июле, высокие показатели влажности были зафиксированы в конце года. В целом, колебания температуры и влажности в годы проведения исследований и наблюдений соответствовали

естественным природным циклам, а отклонения укладывались в рамки многолетних климатических норм.

Выявление и отбор высококачественных (по посевным и наследственным признакам) желудей гибридов дуба, по мнению ряда авторов, имеет огромное значение для их дальнейшей акклиматизации, так как проращивание позволяет судить только о процентном соотношении полных и пустых желудей [12, 13, 14, 15]. Также, желуди могут в той или иной степени повреждаться при анализе, и в дальнейшем не могут быть использованы для выращивания. Наиболее перспективным способом выявления внутреннего строения и дефектов семян является рентгенография.

На рис. 2 представлен снимок рентгенографии желудей в 2023 г. с коэффициентом увеличения 2,3, мощностью 50 кВ, временем экспозиции в 1 секунду, на котором видно, что семена под номерами 3, 6 и 7 не имеют скрытых дефектов.

На рентгенографическом снимке присутствует наличие поврежденности – микротрещины внутри, а также энзимно-микозное истощение. Данный тип повреждения отмечается, в основном, при воздействии на растение комплекса абиотических и биотических факторов (длительные

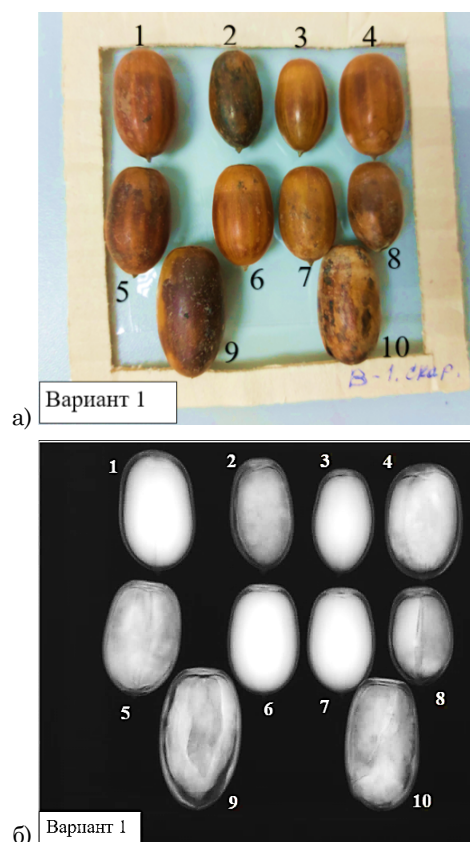


Рис. 2. Первоначальный вид желудей (а) и негатив рентгеновского снимка (б)

Fig. 2. The initial appearance of the acorns (a) and the negative of the X-ray image (b)

атмосферные осадки, сильные росы, сырые туманы и благоприятная температура). В ходе исследований было отмечено 3 группы поражения желудей: 1 – легкая (снижение урожайности на 20%), вес 1000 шт. желудей 3,1-3,7 кг; 2 – средняя (снижение урожайности на 30%), вес 1000 шт. желудей 2,5-2,7 кг; 3 – тяжелая (снижение урожайности на 40%), вес 1000 шт. желудей 1,9-2,3 кг. На состояние повлияли высокая влажность (80% при норме 50-60) и температура хранения (+8°C, при допустимой 0...+2°C) в период хранения. Наличие скрытых повреждений определило ослабленные растения, после непродолжительного хранения на повреждённых семенах количество плесени отмечалось в 3,5 раза чаще, чем на целых.

Анализ данных измерений и наблюдений за потомством в течение вегетационного периода выявил существенное превосходство гибридов *Q.*

robur (Чапурниковский) × *Q. robur* (Ольховский) по показателю прироста высоты, который показал 1,5-кратное увеличение в сравнении с контрольными образцами. Гибридные растения продемонстрировали улучшенные биометрические характеристики в сравнении с родительскими формами (табл. 1).

По результатам измерений, представленных в табл. 2, видна высокая однородность растений *Q. robur* (Ольховский) ($C_v < 15\%$). Чапурниковский экотип продемонстрировал более низкую стабильность, что может говорить о его генетической неоднородности или неблагоприятных условиях прорастания. По показателям доверительного интервала у гибрида был отмечен наименьший разброс среднего значения, что указывает на стабильность роста, также он достоверно превосходит Чапурниковский экотип по высоте

Таблица 1. Рост однолетних гибридных семян дуба
(сравнение с контрольными образцами)

Table 1. Growth of annual hybrid oak seedlings (comparison with control samples)

Генотип / Гибрид	Кол-во сеянцев, шт. / Number of seedlings, n, pcs.	Высота, см, сред. ± σ / Height, cm, average ± σ	CV, %	Диапазон высоты, см / Height range, cm	Диам. корн. шейки, мм, сред. ± σ / Diameter, neck root, mm, average ± σ	CV, %	Диапазон диаметра, мм / Diameter range, mm
<i>Q. robur</i> (Чапурниковский), контроль / (<i>Chapurnikovsky</i>), control	50	7,0 ± 1,2	17,1%	5,0-12,0	19,0 ± 2,1	11,1%	15-23
<i>Q. robur</i> (Чапурниковский) / (<i>Chapurnikovsky</i>) × <i>Q. robur</i> (Ольховский)	8	8,0 ± 2,8	35,0%	4,0-16,5	22,0 ± 4,5	20,5%	15-35
<i>Q. robur</i> (Ольховский), контроль / (<i>Olkhovsky</i>), control	15	7,0 ± 1,5	21,4%	5,0-11,0	15,0 ± 2,5	16,7%	12-25

*Примечание: n – количество сеянцев; сред. ± σ – среднее значение ± стандартное отклонение (σ – сигма); CV (коэффициент вариации) = (σ / среднее) × 100% – степень изменчивости признака; диапазон – минимум и максимум

*Note: n is the number of seedlings; average, ± σ is the average value ± standard deviation (σ – sigma); CV (coefficient of variation) = (σ / average) × 100% – the degree of variability of the trait; range – minimum and maximum

Таблица 2. Биометрические показатели гибридных и контрольных деревьев дуба

Table 2. Biometric indicators of hybrid and control oak trees

№*	Показатель / Indicator	2024 (ср.) / average	2025 (ср.) / average	Сред. за 2 года / Wednesday for 2 years	Абс. прирост / Abs. gain	Темп роста, % / Growth rate, %	Cv, %	Доверит. интервал (95%) / Confidence interval (95%)	t-критерий (p < 0,05) / The t-criterion	Индекс превосходства к контролю 2, % / The index of Excellence to control 2
1	H, см	27,5	39,7	33,6	12,2	144,4	11,0	33,6 ± 1,9	Да (t=2,8)	119,6
	D, см	1,4	1,7	1,55	0,3	121,4	13,5	1,55 ± 0,21	Да (t=2,4)	144,4
2	H, см	24,1	41,7	32,9	17,6	173,0	12,5	32,9 ± 2,1	–	117,1
	D, см	1,1	1,7	1,40	0,6	154,5	14,0	1,40 ± 0,20	–	130,8
3	H, см	21,8	34,4	28,1	12,6	157,8	15,0	28,1 ± 2,4	–	100 (база) / base
	D, см	1,1	1,6	1,35	0,5	145,5	16,0	1,35 ± 0,22	–	100 (база) / base

*Примечание: *1 – Гибрид *Q. robur* (Ч × О); 2 – Контроль 1 *Q. robur* (Ольховский); 3 – Контроль 2 *Q. robur* (Чапурниковский); Cv – коэффициент вариации, t-критерий Стьюдента, Ч × О – Чапурниковский × Ольховский, объём выборки (n) – 30 шт. растений на вариант, уровень значимости p < 0,05

*Note: *1 – Hybrid of *Q. robur* (B × O); 2 – Control 1 *Q. robur* (Olkhovsky); 3 – Control 2 *Q. robur* (Chapurnikovsky); Cv is the coefficient of variation, Student's t-criterion, H × O – Chapurnikovsky × Olkhovsky, sample size (n) – 30 plants per variant, significance level p < 0,05

и диаметру ($t = 2,8$ и $2,4$ соответственно), что указывает на сильный гетерозисный эффект.

Для того, чтобы объективно оценить достоверность влияния генетического фактора на изменчивость изучаемых признаков, была проведена обработка результатов замеров растений методом дисперсионного анализа (табл. 3).

По результатам исследований в насаждениях достоверно на 55 и 1% уровнях влияния фактора В – материнского вида, влияние отцовского фактора А недостоверно. Вычисление силы

влияния факторов позволило установить, что у опытных растений 55% изменчивости составляет влияние материнского дерева и 45% приходится на долю случайных стохастических факторов.

Для сравнения физиологических особенностей гибридов и контроля в летний период были проведены исследования по изучению некоторых физиологических показателей. Определялась водоудерживающая способность листьев и контрольных видов дуба в засушливый период (табл. 4).

Таблица 3. Анализ влияния факторов на рост в высоту гибридов и контрольных видов дуба

Table 3. Analysis of the influence of factors on the height of hybrids and control oak species

Вариации / Variations	Степени свободы / Degrees of freedom	Сумма квадратов / Sum of squares	Средние квадраты / Middle squares	Дисперсионные отношения / Variance relations G-функция / G-function	G табличные / G tabular	
					0,05	0,01
По фактору А / By factor A	1	1,51	1,51	0,122	4,0	7,2
По фактору В / By factor B	1	12,42	12,42	17,014	4,0	7,2
Остаточная / Residual	47	34,31	0,730			
Общая / General	49	48,24				

Таблица 4. Водоудерживающая способность листьев видов и гибридов дуба

Table 4. Water retention capacity of leaves of oak species and hybrids

Вариант опыта / An experience option	Вес до на- чала опыта, г / Weight before the start of the experi- ment, g	Период / Period	t, °C	Вес сухой массы, % / Dry weight, %	F-кри- терий / F-cri- terion	Примечание / Note
2024 год						
Q. robur (Чапурниковский) / Q. robur (Chapurnikovsky)	1,249	Начало лета (10 июня)	+34,8	40,8	4,1	Наиболее устойчив к испаре- нию влаги в начале лета / It is most resistant to moisture evaporation in early summer
Q. robur (Ольховский) / Q. robur (Olkhovsky)	1,517		+34,8	47,1	3,8	Высокая влагоёмкость / High moisture capacity
Гибрид: Чапурников- ский × Ольховский / Hybrid: Chapurnikovsky × Olkhovsky	1,472		+34,8	40,6	5,2	Значительные потери к 360 мин – низкая устойчивость / Significant losses by 360 min – low stability
Гибрид: Ольховский × Ча- пурниковский / Hybrid: Olkhovsky × Chapurnikovsky	2,098		+34,8	45,4	4,9	Средняя устойчивость, но вы- сокая начальная масса / Medium stability, but high initial mass
Среднее (начало лета) / Average (early summer)				43,5	4,5	–
2025 год						
Q. robur (Чапурниковский) / Q. robur (Chapurnikovsky)	1,276	Засуш-ливый (14 июля)	+39,6	55,3	6,3	Наиболее устойчив к высы- ханию при жаре / It is most resistant to drying in the heat
Q. robur (Ольховский) / Q. robur (Olkhovsky)	2,448		+39,6	57,2	5,7	Высокая масса, но сильные потери к концу / High mass, but heavy losses towards the end
Гибрид: Чапурников- ский × Ольховский / Hybrid: Chapurnikovsky × Olkhovsky	1,317		+39,6	54,1	6,1	Хорошая устойчивость, но усту- пает родительским формам / Good stability, but inferior to the parent forms
Гибрид: Ольховский × Ча- пурниковский / Hybrid: Olkhovsky × Chapurnikovsky	1,113		+39,6	53,6	7,0	Наибольшие различия в динамике – гетерозисный эффект / The biggest differences in dynamics are the heterotic effect
Среднее (засуха) / Average (drought)				55,0	6,3	–

Как видно из таблицы 5, в засушливый период листья гибрида *Q. robur* (Чапурниковский) × *Q. robur* (Ольховский) медленнее теряли воду в процессе завядания, чем *Q. robur* (Чапурниковский). Листья же гибрида *Q. robur* (Ольховский) × *Q. robur* (Чапурниковский), наоборот, быстрее теряли влагу, чем *Q. robur* (Ольховский). В целом, опыт позволил установить, что стойкость к завяданию у гибридных и контрольных видов *Q. robur* (Чапурниковский) × *Q. robur* (Ольховский) выше, чем у гибрида *Q. robur* (Чапурниковский) × *Q. robur* (Ольховский). При недостаточном увлажнении листья гибридных форм дуба по водоудерживающей способности заняли промежуточное положение.

Сопоставление данных по гибридным и контрольным дубам позволило выявить их физиологические отличия, оценить устойчивость

к стрессам и определить дальнейший потенциал для селекционной работы (табл. 5).

Результаты по расчету критерия Фишера свидетельствуют об отсутствии статистически значимых различий в уровне изменчивости между родительским сортом Чапурниковский и его гибридом. Следовательно, гибридный опытный образец можно считать не менее стабильным, чем его родитель при работе над повышением устойчивости к завяданию.

Исследования водного режима у гибрида и контрольных экотипов дуба позволили выявить различия в ходе их физиологических процессов, что дает основание сделать вывод о гетерогенности гибрида по сравнению с исходными видами, представляющими ценный материал для дальнейших селекционных работ.

Таблица 5. Данные интенсивности транспирации гибридных и контрольных видов дуба, мг/г/час

Table 5. Transpiration intensity data of hybrid and control oak species, mg/g/hour

Вариант опыта / An experience option	2 ч / 2 h	4 ч / 4 h	6 ч / 6 h	8 ч / 8 h	10 ч / 10 h	Σ за 10 ч / Σ in 10 h	Сред- нее (M) / Average	СО (σ)	Диспер- сия (σ²) / Variance
<i>Q. robur</i> (Чапурниковский) / <i>Q. robur</i> (Chapurnikovsky)	218	498	500	538	563	2317	463,4	142,8	20397,3
<i>Q. robur</i> (Ольховский) / <i>Q. robur</i> (Olkhovsky)	229	319	398	445	239	1630	326,0	87,4	7632,0
Гибрид: Чапурниковский × Ольховский / Hybrid: Chapurnikovsky × Olkhovsky	147	402	376	521	489	1935	387,0	145,4	21133,0
Гибрид: Ольховский × Чапурниковский / Hybrid: Olkhovsky × Chapurnikovsky	204	356	410	517	355	1842	368,4	106,3	11305,3

***Примечание:** дата опыта 18 июля, $t + 35,2$ °C, влажность воздуха 24%, ветер западный, 5,4 м/с

***Note:** the date of the experiment is July 18, $t + 35.2$ C, air humidity 24%, westerly wind, 5.4 m/s

Выводы

1. В ходе исследований была экспериментально подтверждена эффективность межэкотипического скрещивания дуба черешчатого (*Quercus robur*) между Чапурниковским и Ольховским экотипами. Наблюдаемый выраженный гетерозисный эффект у гибридной формы выражен в ее статистически значимом превосходстве по основным биометрическим показателям, включая высоту и диаметр, в сравнении с контрольными образцами растений, что дает возможность рекомендовать ее для дальнейшей селекционной работы и создания более продуктивных лесных культур.

2. Выявлено преобладающее воздействие родительского растения на морфогенез и видоизменение гибридных форм дуба. Установлено, что 55% вариабельности фенотипических характеристик детерминировано материнским генотипом,

что является существенным фактором при формировании селекционных программ и экстраполяции результатов гибридизации.

3. Установлен высокий адаптивный потенциал гибрида в условиях засухи Волгоградского региона. Он характеризуется промежуточными показателями водоудерживающей способности и транспирации относительно родительских линий, демонстрируя при этом существенную устойчивость к водному стрессу.

4. Доказана перспективность использования Ольховского экотипа для селекции благодаря его ценным наследственным признакам. Его возраст (более 350 лет) и способность передавать свои свойства гибридам позволяет создавать долговечные и устойчивые формы дуба, адаптированные к трудным лесорастительным условиям Волгоградской области.

Список использованных источников

1. Кулик К.Н., Беляев А.И., Пугачёва А.М. Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29, № 1(94). С. 4-14. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14. EDN: CSZXWA
2. Семенютина А.В., Хужахметова А.Ш., Долгих А.А., Сапронов В.В. Научные основы обогащения дендрофлоры малолесных регионов хозяйственно ценными растениями // Наука. Мысль: электронный периодический журнал. 2021. Т. 12, № 2. С. 35-51. DOI: 10.25726/v1064-3614-5462-o
3. Агролесомелиорация. Монография. / Е.А. Литвинов, А.М. Степанов, А.В. Семенютина [и др.]. Волгоград: Нива, 2008. 244 с. EDN: QKYUEIN
4. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51-57
5. Крючков С.Н., Солонкин А.В., Соломентсева А.С., Егоров С.А. Селекция и репродукция перспективных интродуцентов для степного лесоразведения. Монография. Волгоград: ФНИЦ агроэкологии РАН, 2025. 148 с. EDN: KZRXXH
6. Погода в Волгограде [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/volgograd/2021/> (дата обращения 05.12.2025).
7. Попова А.А., В.А. Славский. Селекция сеянцев дуба черешчатого на быстроту роста на основе морфологических и цитогенетических показателей // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 2(42). С. 15-23. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.2/2 EDN: PGNBTA
8. Камалов Р.М. Генетическая изменчивость популяций внутри лесосеменных районов и семеноводство *Quercus robur* L. // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2022. № 144. С. 19-24. DOI: 10.36305/0513-1634-2022-144-19-24 EDN: JERFVB
9. Егоров С.А. Влияние гуминовых препаратов на состояние древесных видов в засушливых условиях // Агрохимический вестник. 2023. № 4. С. 84-89. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-4-014 EDN: DCGTRO
10. Попова А.А. Цитогенетическая изменчивость апикальных меристем дуба черешчатого // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2021. № 3. С. 4-12. DOI: 10.21178/2079-6080.2021.3.4 EDN: SOIBGH
11. Царев А.П. Пионеры лесной селекции в Центральном Черноземном регионе // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 81-98. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/7
12. Иозус А.П., Завьялов А.А., Бойко С.Ю. Перспективные гибриды сосны *Pinus* L. и дуба *Quercus* L. Для сухой степи Нижнего Поволжья // Успехи современного естествознания. 2024. № 1. С. 14-19. DOI: 10.17513/use.38201
13. Калмыкова Е.В., Кузьмин П.А., Крылов П. А Оценка адаптивной способности представителей рода *Quercus* в условиях засушливого климата // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 40-45. DOI: 10.28983/asj.y2023i12pp40-45 EDN: ANKYJQ
14. Ромашкина И.В., Тихомирова Т.С., Шестиразов К.А. Анализ молекулярно-генетических механизмов устойчивости березы и дуба к дефициту воды и азота // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 241. С. 120-141. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.120-141. EDN: RCDQTD
15. Попова А.А., Молчанов В.В., Радькова Е.А. Современная геносистематика и биологические особенности естественно растущих и интродуцированных видов рода *Quercus* // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 1(41). С. 5-23. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/1 EDN: LOZUXB

References

1. Kulik K.N., Belyaev A.I., Pugacheva A.M. The role of protective afforestation in combating drought and desertification of agricultural landscapes // Arid ecosystems. 2023. Vol. 29, No. 1(94). P. 4-14. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14 EDN: CSZXWA
2. Semenytina A.V., Khuzhakhmetova A.Sh., Dolgikh A.A., Sapronov V.V. Scientific foundations of enriching the dendroflora of sparsely wooded regions with economically valuable plants // Science. Mysl: an electronic periodical. 2021. Vol. 12, No. 2. P. 35-51. DOI: 10.25726/v1064-3614-5462-o
3. Agroforestry / E.A. Litvinov, A.M. Stepanov, A.V. Semenytina [et al.]. Monografiya. Volgograd: Niva, 2008. 244 p.
4. Alekseev V.A. Diagnostics of the vital condition of trees and stands // Forestry science. 1989. No. 4. P. 51-57
5. Kryuchkov S.N., Solonkin A.V., Solomentseva A.S., Egorov S.A. Selection and reproduction of promising introducers for steppe afforestation / Monografiya. Volgograd: Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences, 2025. 148 p.
6. Weather in Volgograd [Electronic resource]. Access mode: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/volgograd/2021/> (accessed 05.12.2025).
7. Popova A.A., Slavsky V.A. Selection of oak seedlings for growth rate based on morphological and cytogenetic parameters // Forestry Engineering Journal. 2021. Vol. 11, No. 2(42). P. 15-23. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.2/2 EDN: PGNBTA
8. Kamalov R.M. Genetic variability of populations within forest-sown areas and seed production of *Quercus robur* L. // Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden. 2022. No. 144. P. 19-24. DOI: 10.36305/0513-1634-2022-144-19-24 EDN: JERFVB
9. Egorov S.A. The effect of humic preparations on the condition of tree species in arid conditions // Agrochemical Bulletin. 2023. No. 4. pp. 84-89. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-4-014 EDN: DCGTRO
10. Popova A.A. Cytogenetic variability of the apical meristems of the black oak // Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry. 2021. No. 3. pp. 4-12. DOI: 10.21178/2079-6080.2021.3.4 EDN: SOIBGH
11. Tsarev A.P. Pioneers of forest breeding in the Central Chernozem region // Forestry Engineering Journal. 2020. Vol. 10, No. 4(40). P. 81-98. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/7
12. Iozus A.P., Zavyalov A.A., Boyko S.Y. Promising hybrids of pine *Pinus* L. and oak *Quercus* L. For the dry steppe of the Lower Volga region // The successes of modern natural science. 2024. No. 1. P. 14-19. DOI: 10.17513/use.38201
13. Kalmykova E.V., Kuzmin P.A., Krylov P.A. Assessment of the adaptive ability of representatives of the genus *Quercus* in arid climate // Agrarian Scientific Journal. 2023. No. 12. P. 40-45. DOI: 10.28983/asj.y2023i12pp40-45 EDN: ANKYJQ
14. Romashkina I.V., Tikhomirova T.S., Shestibratov K.A. Analysis of the molecular and genetic mechanisms of birch and oak resistance to water and nitrogen deficiency // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2022. No. 241. P. 120-141. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.120-141 EDN: RCDQTD
15. Popova A.A., Molchanov V.V., Radkova E.A. Modern genosystematics and biological features of naturally growing and introduced species of the genus *Quercus* // Forestry engineering magazine. 2021. Vol. 11, No. 1(41). P. 5-23. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/1 EDN: LOZUXB

Информация об авторах

Сергей Николаевич Крючков, д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства; ORCID: 0000-0001-8338-6460; РИНЦ ID: 357954; kryuchkovs@vfanc.ru

Андрей Валерьевич Солонкин, д-р с.-х. наук, заведующий лабораторией селекции, семеноводства и питомниководства; ORCID: 0000-0002-1576-7824; mishamax73@mail.ru

Александра Сергеевна Соломенцева, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства; ORCID: 0000-0002-5857-1004; Scopus: 57220036834; РИНЦ ID: 756338; WOS Research ID: W-4142-2018; alexis2425@mail.ru * (автор-корреспондент)

Сергей Анатольевич Егоров, младший научный сотрудник лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства; ORCID: 0000-0001-8234-7355; РИНЦ ID: 1124794; egorov-sa@vfanc.ru

Алмагуль Кадыргалиевна Романенко, младший научный сотрудник лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства, аспирант; ORCID: 0000-0002-6705-6135; РИНЦ ID: 1125490; romanenko-ak@vfanc.ru

Дарья Алексеевна Горбушова, лаборант-исследователь лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства; ORCID: 0009-0006-4978-4143; РИНЦ ID: 1225036; gorbushova-d@vfanc.ru

Критерии авторства

С.Н. Крючков – инициирование исследования, формулировка гипотезы и цели

А.В. Солонкин – разработка протокола эксперимента

А.С. Соломенцева – разработка дизайна исследования (статистический план)

С.А. Егоров – статистический анализ данных и интерпретация результатов

А.К. Романенко – сбор данных и их анализ/интерпретация

Д.А. Горбушова – основной сбор данных (лабораторные опыты)

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interests

Поступила в редакцию / Received 29.01.2026

Поступила после рецензирования / Received 23.06.2026

Принята к публикации / Accepted 25.06.2026

Information about the authors

Sergey N. Kryuchkov, DSc (Agro), chief researcher of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding; ORCID: 0000-0001-8338-6460; RSCI ID: 357954; kryuchkovs@vfanc.ru

Andrey V. Solonkin, DSc (Agro), head of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding; ORCID: 0000-0002-1576-7824; mishamax73@mail.ru

Alexandra S. Solomentseva, CSc (Agro), leading researcher of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding; ORCID: 0000-0002-5857-1004; Scopus: 57220036834; RSCI ID: 756338; WOS Research ID: W-4142-2018; alexis2425@mail.ru* (author-correspondent)

Sergey A. Egorov, junior researcher of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding; ORCID: 0000-0001-8234-7355; RSCI ID: 1124794; egorov-sa@vfanc.ru

Almagul K. Romanenko, junior researcher of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding, post graduate student; ORCID: 0000-0002-6705-6135; RSCI ID: 1125490; romanenko-ak@vfanc.ru

Darya A. Gorbushova, laboratory research assistant of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding; ORCID: 0009-0006-4978-4143; RSCI ID: 1225036; gorbushova-d@vfanc.ru

Criteria of authorship

S.N. Kryuchkov – initiation of the study, formulation of the hypothesis and goal

A.V. Solonkin – development of the experiment protocol

A.S. Solomentseva – development of the study design (statistical plan)

S.A. Egorov – statistical analysis of data and interpretation of the results

A.K. Romanenko – data collection and analysis/interpretation

D.A. Gorbushova – main data collection (laboratory experiments)

Оригинальная статья

УДК 630*165.51

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-145-151>



ХАРАКТЕРИСТИКА НАСАЖДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ МУЖСКОГО МОНАСТЫРЕ ВО ИМЯ СВЯТЫХ ЦАРСТВЕННЫХ СТРАСТОТЕРПЦЕВ В УРОЧИЩЕ ГАНИНА ЯМА

Л.И. Аткина¹, Е.В. Москаленко^{2✉}, Л.П. Абрамова³

^{1, 2, 3} ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»; г. Екатеринбург, Российская Федерация

¹ atkinali@m.usfeu.ru; ORCID: 0000-0001-8578-936X

² moskalenkoev@m.usfeu.ru; ORCID: 0009-0009-6485-1895

³ abramovalp@m.usfeu.ru; ORCID: 0000-0002-2472-7787

Аннотация. Храмовый комплекс во имя Святых Царственных Страстотерпцев является крупнейшим по размерам монастырем Екатеринбургской епархии. Особенность территории – сохранение соснового насаждения, которое является зеленым фоном для оригинального архитектурного ансамбля монастыря. Цель исследований – характеристика насаждения и почвенных условий в границах храмового комплекса в урочище Ганина Яма. В результате исследований установлено, что древостой почти полностью сформирован из сосны обыкновенной, находящейся в ослабленном состоянии. Параметры деревьев на прихрамовой территории по показателям высоты ближе к аналогичным парковым городским насаждениям, в то время как диаметр стволов ближе к показателям сосняков пригородных лесов и лесных парков. Почвенные характеристики также имеют черты начальных этапов изменения отдельных показателей (порозности, кислотности, емкости поглощения), связанных с проведением мероприятий по созданию декоративных посадок вдоль дорожек и повышению посещаемости территории по сравнению с прилегающими насаждениями.

Исследования проводились в июне 2024 г. по благословению игумена монастыря Мелитона (Зыбина).

Ключевые слова: сосновые насаждения, храмовый комплекс Ганина Яма, почвы

Формат цитирования: Аткина Л.И., Москаленко Е.В., Абрамова Л.П. Характеристика насаждений на территории мужского монастыря во имя Святых Царственных Страстотерпцев в урочище Ганина Яма. Природообустройство. 2026;Т.19(3):145-151. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-145-151>

Scientific article

CHARACTERISTICS OF PLANTINGS ON THE TERRITORY OF THE MONASTERY IN THE NAME OF THE HOLY ROYAL PASSION-BEARERS IN THE GANINA YAMA TRACT

L.I. Atkina¹, E.V. Moskalenko², L.P. Abramova³

^{1, 2, 3} Ural State Forest Engineering University; Yekaterinburg, Russian Federation

¹ atkinali@m.usfeu.ru ORCID: 0000-0001-8578-936X

² moskalenkoev@m.usfeu.ru ORCID: 0009-0009-6485-1895

³ abramovalp@m.usfeu.ru ORCID: 0000-0002-2472-7787

Abstract. The Temple complex in the name of the Holy Imperial Passionists (Monastery), is the largest by size monastery of the Ekaterinburg diocese. Feature of the territory – preservation of a pine grove, which is a green background for the original architectural ensemble of the monastery. The aim of the work is to characterize the planting and soil conditions within the boundaries of the temple complex in the Ganin Yam precinct. Research has found that the tree is almost entirely formed from a weakened, persimmon pine. The parameters of trees in the vortex area are closer to similar urban park areas, while the diameter of stems is closer to those of the suburban forests and forest parks. The soil characteristics also have features of the initial stages of changes in individual indicators (airiness, acidity, absorption capacity) related to the implementation of measures for creating decorative landings along the paths and increasing the attendance of the territory compared with adjacent sites.

Research was carried out in June 2024 by the blessing of the Abbot of the Monastery of Meliton (Zybin)

Keywords: temple complex, soils, Ganina Pit, pine plantations

Format of citation: Atkina L.I., Moskalenko E.V., Abramova L.P. Characteristics of plantings on the territory of the monastery in the name of the Holy Royal Passion-Bearers in the Ganina Yama tract. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):145-151. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-145-151>

Введение. За последние десятилетия в вопросах изучения прихрамовых территорий монастырей появилось немало интересных работ [1, 2, 3]. В настоящий момент они рассматриваются как самостоятельный вид, подчиненный определенным законам планировки, несущим символическую нагрузку, включающая подсистемы ландшафтно-градостроительной среды, структурно-функциональных зон территории монастыря, архитектуры храмов и других зданий [4, 5]. Монастырские сады – значительная часть национальной художественной культуры – требуют изучения, осмысления и восстановления [6].

Храмовый комплекс во имя Святых Царственных Страстотерпцев (монастырь) был основан 28 декабря 2000 г. по благословению Святейшего Патриарха Московского и всея Руси Алексия II. Его можно классифицировать как крупнейший по размерам (7,5 га) монастырь Екатеринбургской епархии. Создание храмового комплекса тесно переплетено с историей последних дней царской семьи и их слуг.

На территории монастыря находятся 7 храмов, корпус для монашествующих, подсобные помещения, яблоневый сад, хозяйство, игуменский дом, 2 церковные лавки, 2 трапезные и кладбище [7, 8].

Монастырская территория насыщена символическими объектами, связанными с царской семьей: шахта № 7, мемориальные скульптуры царствующих персон, царский крест, яблоневый сад, сиреневая аллея [9].

Особенностью территории является сохранение природной среды – соснового насаждения, которое является зеленым фоном для оригинального архитектурного ансамбля монастыря. Массив разбит на участки дорожно-тропиночной сетью и площадками с размещенными на них храмами. Основную часть территории занимают сосновый массив, дорожки оформлены посадками различных декоративных растений.

До настоящего времени отсутствуют описание лесного массива, характеристика растущих деревьев, подроста, подлеска, живого напочвенного покрова, а также почвенных условий. Эти данные необходимы как для оценки современного состояния насаждений, так и для мониторинга возможных изменений в будущем.

Посещаемость людьми комплекса исчисляется тысячами, что формирует значительную антропогенную нагрузку на природные компоненты и не может не отражаться на их состоянии.

Цель исследований: характеристика насаждения и почвенных условий в границах храмового комплекса во имя Святых Царственных Страстотерпцев в урочище Ганина Яма.

Для получения результатов были сформулированы следующие задачи: установить видовой состав древесного яруса, подроста, подлеска, живого напочвенного покрова, провести подеревную инвентаризацию с указанием морфологических особенностей и определением балла санитарного состояния деревьев; дать общую характеристику почв под фрагментами естественных насаждений.

Материалы и методы исследований. Объектом исследований является насаждение, которое визуально выглядит как однородное, что связано с преобладанием ровного рельефа территории. Для закладки пробной площади был выбран наиболее значительный по площади участок сложной формы, расположенный между яблоневым садом и монашеским кладбищем. Весь участок (рис. 1) рассмотрен как пробная площадь с учетом рекомендаций в соответствии с требованиями ОСТ 56-69-83 «Пробные площади лесоустroительные. Метод закладки» [10]. Размер участка – 0,4 га. Почвенные условия определены ранее по методике М.И. Герасимовой, М.Н. Строгановой [11]. Почвы, не затронутые антропогенезом, классифицированы по справочнику «Почвы Свердловской области» [12].

Подеревная инвентаризация на лесном участке и статистическая обработка результатов проведены по традиционной методике [13]. Санитарное состояние определено по шкале категорий состояния деревьев [14]. При средневзвешенном балле санитарного состояния до 1,5 древостой оценивался как здоровый, при значении от 1,6 до 2,5 – как ослабленный, от 2,6 до 3,5 – сильно ослабленный, от 3,6 до 4,5 – усыхающий, свыше 4,5 – погибший.

Результаты и их обсуждение. В результате исследований установлено, что на пробной площади произрастает 101 дерево, из них 93 дерева *Pinus sylvestris* (L.) и 8 деревьев *Betula pendula* (Roth.) Количество деревьев на пробной площади немного меньше, чем требуют нормативы, но при увеличении территории возникает опасность захвата посадок, сформированных искусственно вдоль дорожек. Состав насаждения по запасу – 10С, класс возраста определен как IV. Густота насаждения – 250 шт. на 1 га, что соответствует рекомендациям паркового насаждения.

При статистической обработке материалов установлено, что коэффициент вариации

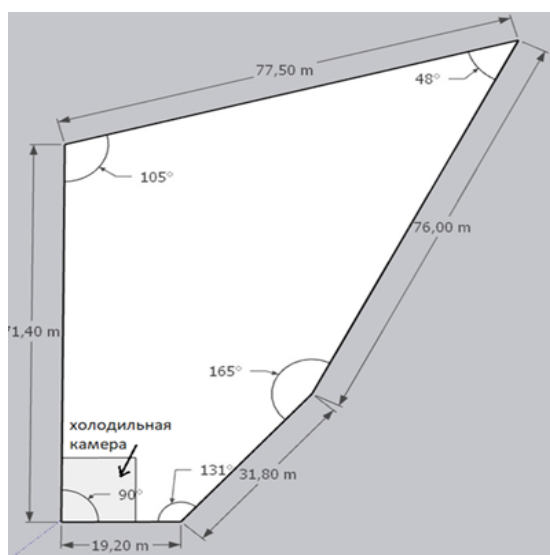


Рис. 1. Схема пробной площади и общий облик насаждения

Fig. 1. The scheme of the test area and the general appearance of the plantation

высотных отметок гораздо ниже, чем показателей диаметра. Балл санитарного состояния деревьев варьируется в средних пределах. По всем измерениям коэффициент точности исследований – менее 5%, что подтверждает достоверность полученных результатов (табл. 1).

При средней высоте дерева *Pinus sylvestris* (L.) $28,0 \pm 0,04$ м средний диаметр ствола

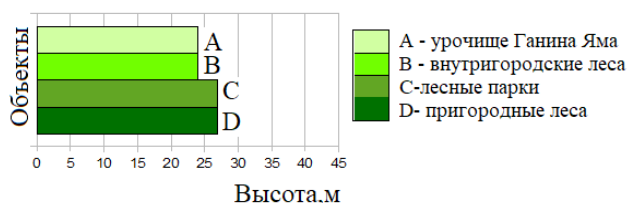


Рис. 2. Средние показатели высоты деревьев на объектах различного расположения г. Екатеринбурга и на прихрамовой территории

Fig. 2. Average height of trees at sites of various locations in Yekaterinburg and on the temple grounds

Таблица.1. Средние морфологические показатели деревьев *Pinus sylvestris* (L.) и их санитарное состояние*

Table.1. Average morphological parameters of *Pinus sylvestris* (L.) trees and their sanitary condition*

Параметры / Parameters	¹ X	² ±x	³ V, %	⁴ P, %
Высота _{1,3} , м / Height, m	28,00	0,04	0,7	0,07
Диаметр, см / Diameter, cm	41,90	6,7	19,45	2,03
Средний балл санитарного состояния / The average score of the sanitary condition	2,80	0,02	15,71	1,64

*В таблице использованы следующие обозначения: ¹ – среднее статистическое (X); ² – ошибка среднего ($\pm x$); ³ – коэффициент вариации (V, %); ⁴ – коэффициент точности P, %.

*The following notation is used in the table: ¹ statistical average (X); ² average error ($\pm x$); ³ coefficient of variability (V, %); ⁴ is the accuracy factor (P, %).

достигает $41,90 \pm 6,7$ см. Балл санитарного состояния – $2,8 \pm 0,02$, что свидетельствует о наличии большого количества ослабленных деревьев и подтверждено при визуальном осмотре (вертикальные трещины на стволах).

В работе С.А. Шавнина с соавт. [15] приведены результаты анализа параметров 48 насаждений *Pinus sylvestris* (L.) примерно IV-V классов и выше, расположенных в разных частях г. Екатеринбурга и его пригороде. В результате сравнения их данных и параметров насаждения на прихрамовой территории (рис. 2) можно утверждать, что показатель высоты насаждений ближе к парковым насаждениям, расположенным внутри города.

В то же время диаметр стволов ближе к показателям сосняков пригородных лесов и лесных парков (рис. 3).

Отличительной особенностью насаждения в Ганиной Яме является более низкая густота, чем у остальных изученных городских насаждений, – 250 дер. на 1 га, тогда как на изученных С.А. Шавниным с соавт. [9] – 320-340 дер.

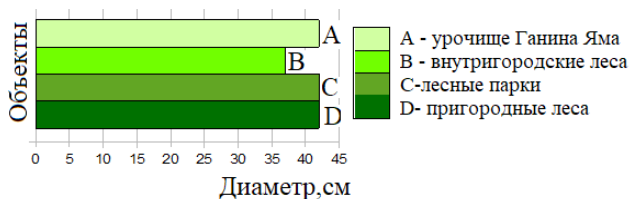


Рис. 3. Средние показатели диаметра деревьев на объектах различного расположения г. Екатеринбурга и на прихрамовой территории

Fig. 3. Average diameter of trees at sites of various locations in Yekaterinburg and on the temple grounds

в насаждениях на 1 га. Это результат ландшафтных рубок, проведенных в насаждениях прихрамовой территории для придания насаждению паркового облика, в результате чего были удалены сильно ослабленные и усыхающие деревья.

Кроме *Pinus sylvestris* (L.), на пробной площади обнаружено 8 шт. *Betula pendula* (Roth) (табл. 2). Средняя высота изученных *Betula pendula* (Roth) составляет 17,6 м (варьируются от 13 до 24 м), средний диаметр ствола – 21 см, средний балл санитарного состояния – 2,1. Это свидетельствует о сильно ослабленном состоянии, что подтверждено визуальным осмотром (преимущественно дефекты стволов).

Таким образом, *Pinus sylvestris* (L.) в насаждении – выше *Betula pendula* (Roth) более чем на 10 м и по диаметру больше почти на 20 см; древостой разреженный. Очевидно, что *Betula pendula* (Roth) выросли из ранее существующего подроста при полном отсутствии молодых деревьев *Pinus sylvestris* (L.). Преобладающая порода в подлеске – *Sorbus aucuparia* (L.), деревья которой встречаются единично.

Живой напочвенный покров носит следы антропогенного воздействия, о чем говорит обилие *Taraxacum officinale* (L.). Также обнаружены виды, характерные для лесных полей, окружающих монастырь: *Trifolium repens* (L.), *Fragaria vesca* (L.), *Pulmonaria officinalis* (L.), *Alchemilla vulgaris* (L.), *Equisetum sylvaticum* (L.), *Veronica chamaedrus* (L.), *Betonica officinalis* (L.), *Geranium sylvaticum* (L.), *Maianthemum bifolium* (L.), *Dryopteris filix-mas* (L.). Из кустарничков присутствуют *Vaccinium myrtillus* (L.) и *Vaccinium vitis-idaea* (L.). Проективное покрытие живого напочвенного покрова составляет 100%. Явный доминирующий вид не обнаружен. Можно предположить, что разрастание многих травянистых видов произошло также по причине искусственного осветления насаждения.

Ранее было проведено обследование почвенных условий на территории монастыря и прилегающего лесного массива [16]. На прихрамовой территории тип почв определен как дерновые, подтип – типичные дерновые, род – бескарбонатные, вид – маломощные, разновидность – суглинистые (табл. 3, рис. 4).

Таблица. 2. Морфологические показатели деревьев *Betula pendula* (Roth) и их санитарное состояние*

Table. 2. Morphological parameters of *Betula pendula* (Roth) trees and their sanitary condition*

Показатели / Indicators	Высота ^{1,3} , м / Height, m	Диаметр, см / Diameter, cm	Средний балл санитарного состояния / The average score of the sanitary condition
Среднее / Average	17,6	21,4	2,1
Размах колебаний / Swing range	13-24	16-23	2-3

Таблица. 3. Описание почвенных горизонтов в лесном массиве на прихрамовой территории

Table.3. Description of soil horizons in the forest area in the temple area

Горизонт / Horizon	Мощность / Power	Описание / Description
A0	0-6 см	лесная подстилка; окраска серовато-бурая; состоит из хвои, шишек / forest litter; the color is grayish-brown; consists of needles, cones
A1	6-10 см	элювиальный горизонт; окраска темно-бурая; механический состав – средний суглинок; структура зернистая, мелко-комковатая; рыхлое сложение; по влажности почва свежая; распределение древесных корней по всему горизонту; новообразования и включения отсутствуют; резкий характер перехода горизонта / eluvial horizon; the color is dark brown; mechanical composition – medium loam; the structure is granular, finely lumpy; loose build; in terms of moisture, the soil is fresh; distribution of tree roots over the entire horizon; neoplasms and inclusions are absent; the abrupt nature of the transition of the horizon
B1	10-15 см	иллювиальный горизонт; окраска бурая; механический состав – тяжелый суглинок; призматическая структура; плотноватое сложение; по влажности почва свежая; распределение древесных корней по всему горизонту; резкий характер перехода горизонта; распределён не по всему разрезу, а небольшими вкраплениями, наблюдается только с правой стороны разреза / illuvial horizon; the color is brown; mechanical composition – heavy loam; prismatic structure; dense build; in terms of moisture, the soil is fresh; distribution of tree roots over the entire horizon; the abrupt nature of the transition of the horizon; It is not distributed over the entire incision, but in small inclusions, observed only on the right side of the incision
BC	15-43 см	переходный горизонт; окраска ярко-бурая; механический состав – лёгкий суглинок; непрочная призматическая структура; плотное сложение; по влажности почва свежая; резкий характер перехода горизонта; присутствуют обломки горных пород; наблюдаются линзы песка / transition horizon; the color is bright brown; mechanical composition – light loam; fragile prismatic structure; dense build; in terms of moisture, the soil is fresh; the abrupt nature of the transition of the horizon; there are fragments of rocks; Lenses of sand are observed
C	43 и более см / 43 and more cm	светло-бурая окраска; постепенный характер перехода горизонта / light brown color; the gradual nature of the transition of the horizon



Рис. 4. Общий облик почвенного разреза в сосняке на прихрамовой территории

Fig. 4. The general appearance of the soil section in the pine forest on the temple grounds

Для сравнения были изучены также образцы почв с участков, расположенных за пределами храмового комплекса, но в аналогичных условиях произрастания.

На основе данных показателя скелетности можно утверждать, что почвы под всеми сосновыми насаждениями можно характеризовать как мелкоземлистые (показатель – менее 10%). Но в пределах природного массива в почве отмечается гораздо меньше каменистых включений по сравнению с образцами, взятыми на территории храмового комплекса (табл. 4).

Порозность, как и ожидалось, под пологом насаждений вблизи монастыря оказалась выше на 13%. Это связано с отсутствием антропогенного воздействия в виде уплотнения при пешеходном

передвижении, то есть даже при наличии разветвленной дорожно-тропиночной сети происходит уплотнение почвы.

Показатели удельного веса и объемного веса изменяются слабо по всем образцам независимо от расположения – от 2,3 до 2,5; объемный вес также не имеет значительных различий на территории храма и составляет от около 1 г/см³, а на прилегающей территории – 0,8 г/см³.

Почвы на участке (А) можно определить как слабокислые, что связано с добавлением привозимых грунтов при посадке декоративных древесных, в то время как на лесном участке (Б) за границами монастыря почва определяется как среднекислая (табл. 4).

Обеспеченность питательными веществами как на территории храмового комплекса, так и в прилегающих насаждениях, очень низкая, что характерно для почв с сосновыми насаждениями. Нуждаемость почв в известковании определяют прежде всего по степени насыщенности почв основаниями. У всех образцов она повышенная, что говорит об отсутствии потребности в известковании. Емкость поглощения почвы под пологом естественных насаждений, составляющая около 23,3 мг-экв на 100 г почвы, характерна для серой лесной среднесуглинистой почвы. В то же время в пределах сосняков на прихрамовой территории этот показатель составил 40 мг-экв на 100 г почвы, что ближе к черноземам.

Таблица. 4. Характеристика почвенных образцов, взятых на территории соснового массива храмового комплекса и лесного массива на прилегающей территории*

Table. 4. Characteristics of soil samples taken on the territory of the pine massif of the temple complex and the forest area in the adjacent territory*

Показатели / Indicators	Участки / Land plots	
	¹ А	² Б
Скелетность, % / Skeletality	7,7	4,4
Удельный вес (масса) / Specific gravity (mass)	2,35	2,5
Объемный вес (D), г/см ³ / Volume weight	1,08	0,81
Порозность, % / Porosity	53,9	66,6
pH KCl потенциальная / pH KCl potential	5,9	4,7
Гидролитическая кислотность (H), мг-экв на 100 г почвы / Hydrolytic acidity	7,2	6,8
Сумма обменных оснований (S) мг-экв на 100 г почвы / The sum of the exchange grounds	35,6	42,9
Емкость поглощения (E), мг-экв на 100 г почвы / Absorption capacity	16,2	23,3
Степень насыщенности основаниями (V), % / Degree of saturation with bases	83	70
Обеспеченность питательными веществами, мг на 100 г почвы / Подвижный фосфор (PO ₂₅) / Nutrient supply, mg per 100 g of soil / Mobile phosphorus	5	4

*В таблице использованы следующие обозначения: ¹ – участок соснового массива на прихрамовой территории комплекса (А); ² – участок лесного массива на прилегающей к храмовому комплексу территории (Б).

*The following designations are used in the table: ¹ – a section of a pine forest on the temple territory of the complex (А); ² – a section of a forest on the territory adjacent to the temple complex (Б).

Выводы

В результате комплексного обследования естественного насаждения на территории храмового комплекса во имя Святых Царственных Страстотерпцев (в урочище Ганина Яма) установлено, что спелый древостой почти полностью сформирован из *Pinus sylvestris* (L.), находящейся в ослабленном состоянии. Параметры сосняка на прихрамовой территории по показателям высоты ближе к парковым городским аналогичным насаждениям, в то время как диаметр стволов ближе к показателям сосняков пригородных лесов и лесных парков. Придание насаждению паркового облика произошло в результате осветления и снижения густоты древостоя в 2020 г., что способствовало увеличению радиального прироста *Pinus sylvestris* (L.). Почвенные

характеристики также имеют черты начальных этапов изменения отдельных показателей (порозности, кислотности, емкости поглощения), связанных с проведением мероприятий по созданию декоративных посадок вдоль дорожек и повышению посещаемости территории по сравнению с прилегающими насаждениями.

Насаждения территории монастыря во имя Святых Царственных Страстотерпцев, также, как и архитектура храмов, формируют облик характерный для места уединения идущий корнями к особенностям архитектурно-ландшафтного комплекса древнерусских монастырей со своим аскетическим идеалом красоты [17]. Полученные результаты позволяют проводить мониторинг состояния древостоя в условиях нового для города объекта ограниченного пользования – прихрамовой территории.

Список использованных источников

1. Медведева А.А. Русские монастырские сады: Вопросы ландшафтной организации. Автореферата по на соискание степени кандидат архитектуры. СПб, 2002. 24 с.
2. Курдяева Н.С. Развитие исследований парковых комплексов православных монастырей и их результаты. // «Ученые заметки ТОГУ» 2014, Том 5, № 4, С. 1245-1248 https://ejournal.togudv.ru/media/ejournal/articles-2014/TGU_5_350.
3. Сапелин А.Ю. Садоостроение и садонаполнение территорий русских монастырей и боярских усадеб в допетровское время. Подбор альтернативного ассортимента для их имитации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2018. Т. 22. № 3. С. 21-28. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-3-21-28.
4. 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.
5. Черный В.Д. Русские средневековые сады. М.: Рукописные памятники Древней Руси, 2010. 176 с.
6. Благовидова Н.Г. Духовно-просветительские комплексы в структуре города // Наука, образование и экспериментальное проектирование. Тезисы докладов международной научно-практической конференции. Материалы научно-практической конференции. Т. 1. М., 2011. С. 72-73.
7. Аткина Л.И. Баланс территорий храмовых комплексов Екатеринбурга // Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики: Материалы XII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 2019. С. 267-269. URL: <http://bitstream/123456789/8610/1/lesh19-084.pdf> (дата обращения: 08.06.2025)
8. Аткина Л.И., Москаленко Е.В. Особенности озеленения прихрамовых территорий Свердловской области // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2022. С. 117-120. URL: <https://naukaip.ru/wpcontent/uploads/2022/06/MK-1427-1.pdf> (дата обращения: 08.06.2025)
9. Аткина Л.И., Москаленко Е.В. История формирования яблоневого сада монастыря во имя Св. Царственных Страстотерпцев в урочище Ганина Яма // Инновационные механизмы и стратегические приоритеты научно-технического развития: Материалы Международной научно-практической конференции. Уфа: Аэтерна, 2022. С. 15-17. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-442.pdf> (дата обращения: 15.06.2025)

References

1. Medvedeva A.A. Russian Monastery Gardens: Landscape Organization Issues. Abstract for the degree of Candidate of Architecture. St. Petersburg, 2002. 24 p.
2. N.S. Kurdyayeva. Development of Research on the Park Complexes of Orthodox Monasteries and Their Results. // "Scientific Notes of PSU" 2014, Vol. 5, No. 4, pp. 1245-1248 https://ejournal.togudv.ru/media/ejournal/articles-2014/TGU_5_350.
3. Sapelin A.Yu. Gardening and Gardening of Russian Monasteries and Boyar Estates in Pre-Petrine Times. Selection of an Alternative Assortment for Their Imitation // Forestry Bulletin, 2018. Vol. 22, No. 3, pp. 21-28. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-3-21-28.
4. Malienko O.V., Sokolskaya O.B. Features of landscape-architectural organization of churches and monasteries: domestic experience // International Research Journal. 2019. No. 1-2 (79). Pp. 109-111.
5. Cherny V.D. Russian medieval gardens. Moscow: Manuscript monuments of Ancient Rus, 2010. 176 p.
6. Blagovidova N.G. Spiritual and educational complexes in the structure of the city // Science, education and experimental design. Abstracts of the international scientific and practical conference. Proceedings of the scientific and practical conference. Vol. 1. Moscow, 2011. Pp. 72-73.
7. Atkina L.I. The balance of the territories of the temple complexes of Yekaterinburg // Forest science in the implementation of the concept of the Ural School of Engineering: socio-economic and environmental problems of the forest sector of the economy: Mater. XII International Scientific and Technical conf. Yekaterinburg, 2019. pp. 267-269. URL: <http://bitstream/123456789/8610/1/lesh19-084.pdf> (accessed: 06/08/2025) The balance of territories of Yekaterinburg temple complexes"
8. Atkina L.I., Moskalenko E.V. Features of landscaping of temple territories of the Sverdlovsk region // Modern scientific research: current issues, achievements and innovations. Penza: ICNS "Science and Education". 2022. pp. 117-120. URL: <https://naukaip.ru/wpcontent/uploads/2022/06/MK-1427-1.pdf> (accessed 06/08/2025)
9. Atkina L.I., Moskalenko E.V. The history of the formation of the apple orchard of the monastery in the name of the Holy Royal Passion-Bearers of the Ganina Yama tract // Innovative mechanisms and strategic priorities of scientific and technical development: Mater. International Scientific and Practical Conference Ufa. Aeterna 2022. pp. 15-17. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-442.pdf> (accessed 06/15/2025)

10. Пробные площади лесоустroительные. Метод заклад-ки. ОСТ 56-69-83. Москва, 1983. 24 с.
11. Герасимова М.И. Антропогенные почвы // Москва: Издательство Юрайт, 2019. С. 237
12. Гафуров Ф.Г. Почвы Свердловской области // Екате-ринбург: Издательство Уральского университета, 2008. 396 с.
13. Нагимов З.Я., Зубова С.С., Сычугова О.В., Орехо-ва О.Н. и др. Таксация отдельного дерева: Учебное пособие. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2020. 160 с.
14. О Правилах санитарной безопасности в лесах. Шкала категорий состояния деревьев безопасности в лесах: Поста-новление Правительства РФ от 9 декабря 2020 г. № 2047. Приложение № 1. URL: [https://www.consultant.ru/docu-ment/cons_doc_LAW_217315/7c9aa459ec2b805aa487e00e30bc5ad2b9ceff9f](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_217315/7c9aa459ec2b805aa487e00e30bc5ad2b9ceff9f) (дата обращения: 08.06.2025)
15. Шавнин С.А., Веселкин Д.В., Воробейчик Е.Л., Га-лако В.А. и др. Факторы трансформации сосновых насажде-ний в районе города Екатеринбург // Лесоведение. 2015. № 5. С. 346-355
16. Аткина Л.И., Абрамова Л.П., Москаленко Е.В. Ана-лиз состава почвы в монастыре во имя Святых Царствен-ных Страстотерпцев в урочище Ганина Яма // Эффектив-ный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-э-кономические и экологические проблемы лесного ком-плекса: Материалы XV Международной научно-техни-ческой конференции. Екатеринбург, 2024. С. 33-36. URL: https://usfeu.ru/media/filer_public/cf/a8/cfa8a5cc-0410-4dbb-b991-2e11e2884a17/9_atkina_moskalenko_osobennosti_ozeleneniia_khramovogoispravlennyi.pdf (дата обращения: 08.06.2025)
17. Маркарян Д.А. (иеромонах Дометиян). Некоторые особенности архитектурно-ландшафтного комплекса дре-нерусского монастыря // Вестник РГТУ. Серия «Философия. Социология. Искусствоведение». 2018. № 3 (13). С. 99-110. DOI: 10.28995/2073-6401-2018-3-99-110
10. The trial areas are forestry. The bookmark method. OST 56-69-83. / Moscow, 1983. 24 p.
11. Gerasimova M.I. Anthropogenic soils/M.I. Gerasimo-va// Moscow: Yurait Publishing House, 2019. P. 237.
12. Gafurov F.G. Povi of the Sverdlovsk region // Yekat-erinnburg: Ural Publishing House, 2008. 396 p..
13. Nagimov Z.Ya., Zubova S.S., Sychugova O.V., Orekho-va O.N., Grigoriev A.A. Taxation of a separate tree. Study guide/ and others. Yekaterinnburg: Ural. State Forestry Com-mittee. Univ., 2020. 160 p.
14. On the Rules for Sanitary Safety in Forests. Scale of Categories of Safety in Forests. Decree of the Government of the Russian Federation, No. 2047 dated December 9, 2020. Appendix No.1. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_217315/7c9aa459ec2b805aa487e00e30bc5ad2b9ceff9f / (accessed on 08.06.2025)
15. Shavnin S.A., Veselkin D.V., Vorobeichik E.L., Gala-ko V.A., Vlasenko V.E. Factors of transformation of pine plan-tations in the Yekaterinnburg area// Forestry science. 2015. No. 5. P. 346-355.
16. Atkina L.I., Abramova L.P., Moskalenko E.V. Analy-sis of soil composition in the monastery of the Holy Royal Pas-sion-Bearers in the Ganina Yama tract // Effective response to modern challenges, taking into account the interaction of man and nature, man and technology: socio-economic and environmen-tal problems of the forest complex: Mater. XV International Sci-entific and Technical conf. Yekaterinnburg, 2024. P. 33-36. URL: https://usfeu.ru/media/filer_public/cf/a8/cfa8a5cc-0410-4dbb-b991-2e11e2884a17/9_atkina_moskalenko_osobennosti_ozeleneniia_khramovogoispravlennyi.pdf (date of request: 06/08/2025)
17. Markaryan D.A. (Hieromonk Dometian). Some Features of the Architectural and Landscape Complex of an Old Russian Monastery // Bulletin of the Russian State University for the Humanities. Series "Philosophy. Sociology. Art Criticism". 2018. No. 3 (13). P. 99-110. DOI: 10.28995/2073-6401-2018-3-99-110

Информация об авторах

Людмила Ивановна Аткина, д-р с.-х. наук, про-фессор кафедры ландшафтного строительства; ORCID: 0000-0001-8578-936X; atkinali@m.usfeu.ru

Елена Витальевна Москаленко, старший препо-даватель кафедры ландшафтного строительства; ORCID: 0009-0009-6485-1895; moskalenkoev@m.usfeu.ru

Абрамова Любовь Павловна, канд. с.-х. наук, до-цент кафедры лесоводства; ORCID: 0000-0002-2472-7787; abramovalp@m.usfeu.ru

Критерии авторства

Аткина Л.И., Москаленко Е.В., Абрамова Л.П. 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 заявляет об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received 17.06.2025

Поступила после рецензирования / Received 15.05.2026

Принята к публикации / Accepted 16.05.2026

Information about the authors

Lyudmila I. Atkina, DSc (Agro), professor of the depart-ment of landscape engineering; ORCID: 0000-0001-8578-936X; atkinali@m.usfeu.ru

Elena V. Moskalenko, senior lecturer at the depart-ment of landscape engineering; ORCID: 0009-0009-6485-1895; moskalenkoev@m.usfeu.ru

Lyubov P. Abramova, CSc (Agro), associate professor of the department of forestry; ORCID: 0000-0002-2472-7787; abramovalp@m.usfeu.ru

Authorship criteria

Atkina L.I., Moskalenko E.V., Abramova L.P. performed theo-retical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have a copyright on the article and are re-sponsible for plagiarism.

ПЕРЕЧЕНЬ ТРЕБОВАНИЙ И УСЛОВИЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ

Общие требования к изданию

Принимается ранее не опубликованное автором произведение – научная статья, практическая или обзорная статья, научная рецензия и отзыв в следующие **рубрики журнала**:

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика (технические науки);

4.1.6. Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация (сельскохозяйственные науки).

Все принятые статьи проходят процедуру обязательного рецензирования

Выбор рецензента осуществляет Редакционный совет

Структура статьи

Индекс УДК (слева).

ФИО автора(ов): инициалы, фамилия автора(ов).

Полное название представляемой организации (вуза), в которой они работают.

Название статьи без сокращений.

Аннотация статьи на русском и английском языках: рекомендуемый объем 150...250 слов (не более 2000 символов); необходимо осветить цель исследования, методы, результаты (желательно с приведением количественных данных), четко сформулировать выводы.

Ключевые слова на русском и английском языках: рекомендуемый объем от 5 до 10 слов или словосочетаний.

Автоматизированный перевод с помощью программных систем запрещается!

Текст статьи, с включенным иллюстративным материалом (таблицы, рисунки) **излагать структурировано**:

- введение;
- материал и методы;
- результаты и обсуждение;
- выводы (заключение);
- библиографический список.

Библиографический список должен быть составлен в соответствии с последовательностью ссылок в тексте. Количество источников не менее 10.

Сведения об авторах. Полностью указывается фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание автора(ов) и название организации, в которой они работают, телефон, электронный адрес, идентификаторы ORCID, SCOPUS.

Требования к оформлению статьи

- **Текстовый редактор** – Microsoft Word.
- **Шрифт** – Times New Roman (**Размер шрифта** – 14 пт).
- **Межстрочный интервал** – 1,5.
- **Ориентация** – книжная, без приостановки страниц, без переносов, желательно без постраничных сносок.
- **Оформление заголовка** – без выделения строчных букв прописными.
- **Набор формул.** Использовать редактор формул Math Type 5.x (и выше; в приоритете), либо Equation 3.0, шрифт Times New Roman, размер 11 пт, выравнивание по левому краю без абзацного отступа. Для удобства при верстке **длина формулы, набранной в редакторе формул, не должна превышать 8 см** (возможно разделение длинного уравнения на строки с дублированием символов на месте переноса).

Недопустимо вставлять уравнения в текст в виде растровых либо векторных изображений. Простые математические выражения, не содержащие дробей, корней, сложных индексов и т.д. (цифры и буквы (русские, латинские, греческие; знаки, имеющиеся в таблице символов), размещаются в тексте без использования специальных программ. Формулы должны создаваться одним объектом, а не состоять из частей. **Править стили отдельных букв** (приводить их к прямому начертанию) в уравнении, набранном в разрешённых программах, **неприемлемо**.

Нумеровать только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Суммарное число формул – не более 10. Экспликация к формулам набирается шрифтом Times New Roman, размер 14 пт, одним абзацем, но без абзацного отступа, выравнивание по ширине страницы.

• **Рисунки** выполнять на компьютере в виде отдельного файла: в растровых форматах TIFF, JPG с разрешением не менее 300 dpi; в векторных форматах CDR, DWG, EPS. Выполнение рисунка средствами Microsoft Word допускается для схем.

• **Фотографии** выполнять с разрешением не менее 300 dpi.

Обрезка рисунков и фотографий должна производиться до вставки в документ Microsoft Word.

При приеме статьи автор подписывает согласие на передачу Редакции периодического издания «Природообустройство» (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) прав на издание и распространение статьи без ограничения срока, района распространения журнала и без выплаты вознаграждения.

Отрицательная рецензия, а также несоответствие статьи хотя бы одному из перечисленных условий может служить основанием для отказа в публикации.

Прием статей

По вопросам публикации статей обращаться по телефону: 8 (499) 976-36-67.

E-mail: prirodamgup@mail.ru

<https://www.timacad.ru/about/struktura-universiteta/izdaniia/nauchnyi-zhurnal-prirodoobustroistvo>