

ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

3' 2025

Москва, Издательство РГАУ-МСХА

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



ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

3' 2025

Учредитель и издатель:**ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева**Адрес учредителя и издателя:
127434, Российская Федерация,
г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций**Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-58566 от 14 июля 2014 г.**Журнал включен в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ
для публикации трудов соискателей
ученых степеней кандидата и доктора наук
**Издание включено в систему РИНЦ,
CrossRef, AGRIS (Agricultural
Research Information System),
КиберЛенинка (Open Science)**Полнотекстовые версии доступны на сайте
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>Редактор *В.И. Марковская*
Компьютерный набор и верстка –
А.С. Лаврова
Перевод на английский язык –
В.Г. Рябчикова
Ответственный за выпуск –
*Н.Я. Филатова*Адрес редакции: 127434, Москва,
Приишниковая ул., 14, строение 7-7А
Тел.: 8 (499) 976-36-67
Email: pririodamgur@mail.ru
Сайт: environment.elpub.ruОтпечатано в типографии
ООО «Офсет Принт»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 39, корп. 1
Тел: 8 (499) 976-24-85,
8 (916) 503-02-43Подписано в печать 30.06.25 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, 2025**Главный научный редактор****Журавлева Л.А.**, д-р техн. наук, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Заместитель научного редактора****Бенин Д.М.**, канд. техн. наук, доцент, член-кор.
Российской академии водохозяйственных наук
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Члены редакционного совета****Алексеев А.С.**, д-р. геогр. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет имени С.М. Кирова,
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)**Балабанов В.И.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Безбородов Ю.Г.**, д-р. техн. наук, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Брянская Ю.В.**, д-р. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет» (г. Москва, Российская Федерация)**Волосухин В.А.**, д-р. техн. наук, профессор
Академия безопасности гидротехнических сооружений
(г. Новочеркасск, Российская Федерация)**Дубенок Н.Н.**, д-р. с.-х. наук, профессор, академик РАН
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Исмаилов Г.Х.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Кентбаев Е.Ж.**, д-р. с.-х. наук, профессор, Академик КазНАЕН
НАО «Казахский национальный исследовательский университет»
(г. Алматы, Республика Казахстан)**Кирейчева Л.В.**, д-р. техн. наук, профессор
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)**Косиченко Ю.М.**, д. техн. наук, профессор
ФГБНУ РосНИИПМ (г. Новочеркасск, Российская Федерация)**Лисичкин С.Е.**, д-р. техн. наук, с.н.с.
Филиал АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» (Москва, Российская Федерация)**Лихацевич А.П.**, д-р. техн. наук, член-кор. Академии Наук Белоруссии
Республиканское научное дочернее унитарное предприятие «Институт мелиорации»
(г. Минск, Республика Беларусь)**Матвеев С.М.**, д-р. биол. наук, профессор
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова
(г. Воронеж, Российская Федерация)**Мирзаев Б.С.**, д-р техн. наук, профессор
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(Ташкент, Узбекистан)**Михеев П.А.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Ольгаренко Г.В.**, д-р. с.-х. наук, профессор, член-корреспондент РАН
ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения
и сельхозводоснабжения Радуга (г. Коломна, Российская Федерация)**Попов И.И.**, PhD, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Пчелкин В.В.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Раткович Л.Д.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Рубин О.Д.**, д-р. техн. наук, с.н.с.
АО «Институт Гидропроект» (Москва, Российская Федерация)**Ханов Н.В.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Хлюстов В.К.**, д-р. с.-х. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Худаев И.Ж.**, канд. техн. наук., доцент
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(г. Ташкент, Узбекистан)**Шевченко В.А.**, д-р. с.-х. наук, профессор, академик РАН
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)**ПОДПИСКА:**электронный каталог «Пресса России» <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/t80746/>**Цена подписная**



ISSN 1997-6011

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

3' 2025

Founder and Publisher:**Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy**Address of Founder and Publisher:
49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian FederationThe journal is registered
by the Federal service for supervision
of communications, information technology
and mass media**Certificate of registration**
PI No FS 77-58566 dated July 14, 2014The journal is included in the list of publications
recommended by Higher Attestation Commission
of the Russian Federation for publishing papers
of those seeking PhD and DSc scientific degrees
**The issue is listed in the Russian Science
Citation Index, CrossRef,
AGRIS (Agricultural Research Information System),
Kiberleninka (Open Science)**Full versions are posted on the site
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>Editor *V.I. Markovskaya*Computer typesetting and makeup –
*A.S. Lavrova*Translation into English – *V.G. Ryabchikova*
Responsible for the issue of the journal –
*N.Ya. Filatova*Address of the editorial office:
building 7-7A, Pryanishnikova str., 14,
Moscow, 127434, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 976-36-67
Email: prirodangup@mail.ru
Website: environment.elpub.ruPrinted in typography
OOO "Offset Print"
127550, Moscow,
Dmitrovskoe shosse, 39, building 1
Tel.: +7 (499) 976-24-85,
+7 (916) 503-02-43Signed for print 30.06.25
Format 60 84/8, Circulation 500When using the materials of the journal
in any form reference to the journal is obligatory.© Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2025**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 (Novocheboksarsk, 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 (Novocheboksarsk, Russian Federation)**Sergey E. Lisichkin**, DSci. (Eng), Senior Researcher
Branch of JSC "Institute Hydroproject – "NIIES" (Moscow, Russian Federation)**Anatoly P. Likhatchevich**, DSci. (Eng),
Corresponding Member of the Academy of Sciences of Belarus
Republican scientific subsidiary unitary Enterprise "Institute of Land Reclamation"
(Minsk, Republic of Belarus)**Sergey M. Matveev**, DSci. (Bio), Professor
Voronezh state forestry engineering university named after G.F. Morozov (Voronezh, Russian Federation)**Bahadir S. Mirzaev**, DSci. (Eng), Professor
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers (Tashkent, Uzbekistan)**Pavel A. Mikheev**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Gennadiy V. Olgarenko**, DSci. (Agr), Professor,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences
All-Russian research institute of irrigation and agricultural water supply systems Raduga
(Kolomna, Russian Federation)**Ivan I. Popov**, PhD, Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Victor V. Pchelkin**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Lev D. Ratkovich**, Doctor of technical sciences, Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Oleg D. Rubin**, DSci. (Eng), Professor, Senior Researcher
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

О.В. Каблуков, О.М. Кузина, Ю.А. Мырксина

Оценка влияния конвергентных процессов на продуктивность сельскохозяйственных культур при мелиоративном воздействии.....6

Л.А. Журавлёва

Оценка перспективности прецизионного орошения.....14

С.Д. Исаева, Е.Л. Раткович

Аспекты оптимизации факторов, влияющих на продуктивность риса в Краснодарском крае21

М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов, Л.В. Храпонова

Прогнозирование температуры воздуха в культивационном сооружении после отключения системы отопления.....30

М.А. Карапетян, С.К. Тойгамбаев, Х.А. Абдулмажидов

Исследование состояния мелиоративных осушительных каналов, их восстановление и очистка38

Н.Ф. Рыжко, С.Н. Рыжко, Е.С. Смирнов, Е.А. Шишенин, С.А. Хорин

Способы экономии электроэнергии на насосных станциях при поливе многоопорными дождевальными машинами.....45

Гидротехническое строительство

А.П. Акпасов, М.И. Морозов, Д.А. Греков, М.Е. Кадомцева, Р.Б. Туктаров

Комплексная оценка технического состояния гидроузла на реке Малый Чембар в Пензенской области.....53

Н.В. Ханов, О.Н. Черных, Т.Ю. Жукова, Д.А. Алексеев, Х. Алабар

Результаты исследований гидравлических свойств противозерозионного бетонного полотна марки BeNotex SK63

Гидравлика и инженерная гидрология

В.А. Фартуков, М.И. Зборовская

Сравнительный анализ различных моделей осцилляций свободной поверхности водного потока.....69

А.В. Евграфов, Д.А. Москвичев, М.В. Климахина

Разработка программы для анализа, оценки и прогнозирования эвтрофикации водоемов на языке программирования Python.....77

В.Б. Жезмер

Разработка первоочередных мероприятий по повышению пропускной способности системы, производимых до осуществления капитального ремонта или реконструкции.....85

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

Н.В. Примаков, М.А. Бандурин, В.А. Волосухин

Оценка эффективности лесомелиоративных полос юга России при климатических изменениях93

Н.С. Севрюгина, А.Ю. Фомин, М.Н. Ахилбеков

Согласованность технологий содержания защитных лесополос и мелиоративных каналов..... 101

С.И. Некрасов, А.Ю. Фомин, А.С. Апатенко

Имитационная модель распространения и возникновения лесных пожаров с учетом ветровой динамики 108

Д.С. Степанова, В.А. Савченкова, М.А. Лавренов

Динамика лесоводственно-экологического состояния насаждений в условиях мегаполиса..... 117

А.В. Шемякина, Д.А. Голубев, К.Е. Гула, Н.А. Каюмов

Оценка естественного возобновления древесных пород на сплошных вырубках в Алданском лесничестве Республики Саха (Якутия)..... 127

А.М. Орлов, О.С. Громыко, А.П. Ковалев, Ю.А. Грищенкова

Оценка нелегального оборота лесопроductии на юге Дальнего Востока 135

И.С. Богущ, О.Б. Сокольская, В.В. Кругляк, А.А. Вергунова, Т.А. Андрушко

Комплексная оценка декоративности ильмовых насаждений в городской среде 142

Contents

Land reclamation, water economy and agrophysics

O.V. Kablukov, O.M. Kuzina, Yu.A. Myrksina Assessment of the impact of convergent processes on crop productivity during land reclamation.....	6
L.A. Zhuravleva Evaluation of the prospects of precision irrigation	14
S.D. Isaeva, E.L. Ratkovich Aspects of optimization of factors affecting rice productivity in the Krasnodar Territory	21
M.V. Pavlov, D.F. Karpov, L.V. Khraponova Air temperature prediction in a cultivation facility after heating system shutdown.....	30
M.A. Karapetyan, S.K. Toygambayev, K.A. Abdulmazhidov Study of the state of reclamation drainage canals, their restoration and cleaning.....	38
N.F. Ryzhko, S.N. Ryzhko, E.S. Smirnov, E.A. Shishenin, S.A. Khorin Ways to save energy at pumping stations when irrigating with multi-support sprinklers	45

Hydraulic engineering construction

A.P. Akpasov, M.I. Morozov, D.A. Grekov, M.E. Kadomtseva, R.B. Tuktarov Comprehensive assessment of the technical condition of the hydraulic structure on the Maly Chembar river in the Penza region.....	53
N.V. Khanov, O.N. Chernykh, T.Yu. Zhukova, D.A. Alekseev, H. Alabar Results of studying hydraulic properties of anti-erosion concrete sheet of benotex sk brand.....	63

Hydraulics and engineering hydrology

V.A. Fartukov, M.I. Zborovskaya Comparative analysis of different models of free surface oscillations of water flow	69
A.V. Evgrafov, D.A. Moskvichev, M.V. Klimakhina Development of a program for the analysis, assessment and forecasting of eutrophication of water bodies in the Python programming language	77
V.B. Zhezmer Development of priority measures to increase the capacity of the hydraulic reclamation system, produced before the implementation of major repairs or reconstruction.....	85

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

N.V. Primakov, M.A. Bandurin, V.A. Volosukhin Evaluation of the effectiveness of forest reclamation belts in the south of Russia under climate change	93
N.S. Sevryugina, A.Y. Fomin, M.N. Akhilbekov Coordination of technologies for the maintenance of protective forest belts and reclamation canals.....	101
S.I. Nekrasov, A.Y. Fomin, A.S. Apatenko Simulation model of the spread and occurrence of forest fires taking into account wind dynamics	108
D.S. Stepanova, V.A. Savchenkova, M.A. Lavrenov Dynamics of the forestry and ecological state of plantings in a megalopolis.....	117
A.V. Shemyakina, D.A. Golubev, K.E. Gula, N.A. Kayumov Assessment of the natural regeneration of tree species in continuous deforestation in the Aldan forestry of the republic of Sakha (Yakutia).....	127
A.M. Orlov, O.S. Gromyko, A.P. Kovalev, Yu.A. Grishchenova Assessment of illegal turnover of timber products in the south of the Far East	135
I.S. Bogush, O.B. Sokolskaya, V.V. Kruglyak, A.A. Vergunova, T.A. Andrushko Comprehensive assessment of the decorative effect of elm trees in an urban environment.....	142

Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Научная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-6-13>

УДК 631.67:631.524.84:631.559



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНВЕРГЕНТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПРИ МЕЛИОРАТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

О.В. Каблуков[✉], О.М. Кузина, Ю.А. Мырксина

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 19, корп. 28, Россия

Аннотация. Цель и направление исследований – разработка научно обоснованной методики по оценке влияния конвергентных процессов на влагопотребность и урожайность культур при мелиоративном воздействии. Сопутствующей целью является разработка алгоритма проектирования и управления технологическими процессами целенаправленного, экологически безупречного мелиоративного преобразования земель сельскохозяйственного назначения в складывающихся природно-климатических и хозяйственных условиях. Продуктивность сельхозкультур является вещественным результатом адаптационной селекции, совокупности агротехнологий, технологии орошения и водоотвода, продуктивности почвенного слоя, складывающихся климатических факторов и режима влажности в экотопах агроценоза. Технологии оросительных мелиораций служат источником воздействия и регулирующим фактором экотопов при природообустройстве, оказывают наиболее позитивное влияние на уровень продуктивности сельхозкультур по сравнению с другими агротехническими мероприятиями, особенно для условий аридного климата. Для оценки эффективности оросительных мелиораций рекомендуется использовать методики определения оптимальных диапазонов значений для комплексных факторов конвергентных процессов. Наиболее важный фактор – водопотребность сельхозкультур в конкретных природно-хозяйственных условиях агроценоза – научно обоснованный интегральный показатель для расчета параметров режима орошения с учетом его влияния на прогнозируемую урожайность. Разработанные с учетом рекомендаций по возделываемым культурам, модели прогнозируемой продуктивности позволяют описывать динамику режима водопотребления растений в заданных условиях агромелиоративной деятельности на орошаемых угодьях и получать обоснование критериев оценки эффективности конвергентных технологий, влияющих на водопотребность культур и агроценоза (агросистемы) при природообустройстве.

Ключевые слова: продуктивность сельхозкультур, конвергентные технологии, водопотребность и водопотребление культур, экономическое и технологическое обоснование, режим орошения

Формат цитирования: Каблуков О.В., Кузина О.М., Мырксина Ю.А. Оценка влияния конвергентных процессов на продуктивность сельскохозяйственных культур при мелиоративном воздействии // Природообустройство. 2025. № 3. С. 6-13. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-6-13>

Original article

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CONVERGENT PROCESSES ON CROP PRODUCTIVITY DURING LAND RECLAMATION

O.V. Kablukov, O.M. Kuzina, Yu.A. Myrksina

Russian state agrarian university – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 19 Pryanishnikova St., bldg. 28, Moscow, 127434. Russia

Abstract. The purpose and direction of this study is to develop a scientifically based methodology for assessing the impact of convergent processes on moisture demand and crop yields during land reclamation. A related goal is to develop an algorithm for designing and managing technological processes

for purposeful, environmentally sound reclamation of agricultural land under prevailing climatic and economic conditions. The productivity of agricultural crops is a material result of adaptive breeding, a combination of agricultural technologies, irrigation and drainage technologies, soil layer productivity, emerging climatic factors and humidity conditions in ecotopes of the agrocenosis. Irrigation reclamation technologies serve as a source of influence and a regulating factor of ecotopes in environmental management, and have the most positive effect on the level of crop productivity compared to other agrotechnical measures, especially for arid climate conditions. To assess the effectiveness of irrigation reclamation, it is recommended to use methods for determining the optimal ranges of values for complex factors of convergent processes. The most important factor is the water demand of agricultural crops in specific natural and economic conditions of the agrocenosis – a scientifically based integral indicator for calculating the parameters of the irrigation regime, taking into account its impact on the projected yield. The models of predicted productivity developed taking into account the recommendations on cultivated crops make it possible to describe the dynamics of plant water consumption in the given conditions of agro-reclamation activities on irrigated lands and to obtain justification for criteria for evaluating the effectiveness of convergent technologies affecting the water demand of crops and agrocenosis (agrosystem) in environmental management.

Keywords: productivity of agricultural crops, convergent technologies, water demand and water consumption of crops, economic and technological justification, irrigation regime

Format of citation: Kablukov O.V., Kuzina O.M., Myrksina Yu.A. Assessment of the impact of convergent processes on crop productivity during land reclamation // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 6-13. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-6-13>

Введение. Урожайность сельскохозяйственных культур – основной показатель продуктивности воздействий мелиоративных процессов при природообустройстве – является комплексной результирующей совокупности факторов: достижений адаптивной селекции для условий орошения, агротехнических мероприятий, оптимальности питательного, теплового и влажностного режимов в активном слое почвы, позитивного влияния складывающихся параметров экотопов агроценоза. С урожайностью сельскохозяйственных культур взаимосвязаны ключевые индикаторы мелиоративного производства: производительность труда при поливах, фондоотдача, эффективность использования водных ресурсов, эффективность мелиорированных земель, и в итоге – рентабельность отраслей растениеводства и животноводства [1]. Прогнозирование урожайности на мелиорируемых землях является наиболее распространенной оптимизационной процедурой, которая выполняется с целью определения эффективности запроектированных или эксплуатационных технологических мероприятий.

Технологические процессы мелиоративных воздействий обеспечивают оптимальный уровень влажности корнеобитаемого слоя почвы, влагоемкости и водопроницаемости почвенных и подстилающих горизонтов, параметры структуры и агротехнические кондиции пахотного слоя почвы, внесения минеральных и органических удобрений, засоленности и степень промывки почв от засоления, воздействия водных потоков и капель дождя при орошении на состояние пахотного слоя и микроклимат приземного слоя воздуха,

недопущение эрозии и смыва почвы, состояния листовой поверхности растений и др. [2, 3]. Водохозяйственные эксплуатационные технологии обеспечивают нормативное техническое состояние сооружений и элементов мелиоративной сети и поливной техники, своевременность проведения запланированных мероприятий [3].

Функциональное назначение мелиоративных преобразующих и корректирующих воздействий достигается посредством конвергентных технологий, как правило, комплексных или гибридных по способу производства работ, пролонгированных во времени и масштабных по пространству применения. Конвергентный подход к созданию новых и совершенствованию существующих технологий оросительных мелиораций и оптимизации водопользования в АПК позволяет сформироваться устойчивой тенденции расширения функций процессов регулирования водного режима непосредственно в корнеобитаемом слое почвы. Оптимизация режима влажности почвы способствует увеличению продуктивности за счет корреляции взаимосвязи между потреблением необходимого количества воды растениями и технологией подачи воды в активный слой почвы. По отношению к мелиорации как синтетической сферы деятельности конвергенция проявляется и обнаруживается во фрагментарном слиянии методологий сопряженных аграрных направлений: агрофизики почв, агротехники, мелиоративного земледелия, гидротехники и водного хозяйства, прикладной экологии, комплексного природопользования и некоторых других [4].

Цель исследований: разработка научно обоснованной методики по оценке влияния конвергентных процессов на влагопотребность и урожайность культур при мелиоративном воздействии.

Сопутствующей целью является разработка алгоритма проектирования и управления технологическими процессами целенаправленного, экологически безупречного мелиоративного преобразования земель сельскохозяйственного назначения в складывающихся природно-климатических и хозяйственных условиях. По рассматриваемой проблеме опубликованные результаты научных исследований содержат противоречивые и неоднозначные выводы [5-7], поэтому обобщение и систематизация имеющихся сведений и баз данных являются задачей данной статьи.

Материалы и методы исследований.

Экономический смысл проведенных в данных исследованиях мелиоративных и агротехнических мероприятий заключается в повышении урожайности сельскохозяйственных культур на орошаемых угодьях за счет поддержания на оптимальном уровне параметров экотопов агроценоза в складывающихся погодных условиях [8, 9].

Проведенные исследования имели целью выявить преобладающие факторы, определяющие величину потребления воды полем на транспирацию, испарение, накопление органической массы и решение дополнительных задач, связанных с поддержанием высокого уровня плодородия почв. Для достижения цели решались задачи: по определению зависимости величины урожая от водного режима мелиорируемого поля для различных условий; по выявлению общих закономерностей трансформации водного режима на орошаемом поле в течение вегетации и методов их реализации при осуществлении мелиоративных мероприятий [10].

Исследования для целей прогнозирования урожайности культур были проведены для выяснения характера изменения расчетных значений биоклиматических коэффициентов в зависимости от обуславливающих их факторов, и в первую очередь – от величины влагообеспеченности для отдельных культур, выращиваемых в разных почвенных, климатических и хозяйственных условиях [11, 12].

Результаты и их обсуждение. Поскольку основным показателем оценки продуктивности мелиорированных земель является урожайность культур, необходима количественная оценка влияния на нее факторов техногенной и природной сред, управляемых средствами мелиоративного воздействия [13]. Плодородие – это

свойство почвы, которое имеет эмерджентную фактуру и появляется при конвергентном взаимодействии ее компонентов. При этом необходимо отметить, что повышение плодородия является одним из лимитирующих факторов (наряду с ограничениями по ресурсам) тактической цели – повышения урожайности, то есть при мелиоративном воздействии повышение урожайности должно не только не снижать естественного плодородия почв (не допускать эрозии, истощения, засоления, затопления, загрязнения ядохимикатами, удобрениями и т.п.), но и неуклонно способствовать его повышению, что выходит за рамки оптимумов управляемых факторов [13]. Среди основных управляемых факторов при мелиорации – водопотребление растений, которое определяется в первую очередь продуктивными влагозапасами в почве.

На рисунке 1 приведены данные исследований [14], которые отражают динамику накопления потенциального урожая кормовых трав и его качественных показателей (при заданной урожайности $200 \text{ ц} \cdot \text{га}^{-1}$) для варианта с тремя поливами, совмещаемыми с тремя подкормками. При формируемом в этом варианте опыта оптимальном объеме влагозапасов в почве устраняется дефицит азотного питания, исключается перерасход ресурсов, тем самым достигается удовлетворительное приближение уровня программируемого урожая к потенциальному уровню.

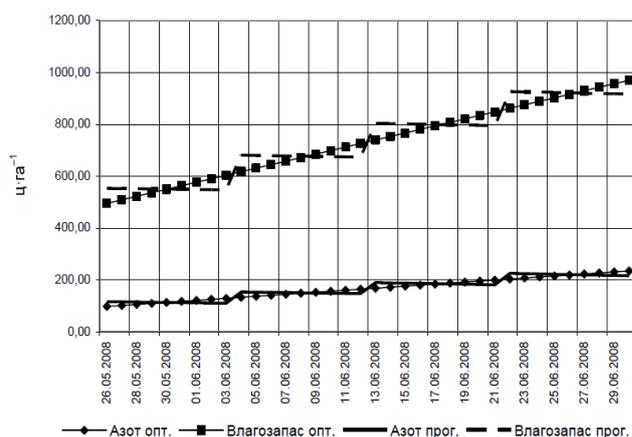


Рис. 1. Продуктивность динамики влагозапасов в почве и содержания доступного азота в почве «потенциального» (пот.) и программируемого (прог.) урожая для варианта технологии с тремя подкормками и тремя поливами кормовых трав [14]

Fig. 1. Productivity of the dynamics of moisture reserves in the soil and the content of available nitrogen in the soil of “potential” (pot.) and programmable (prog.) yields for a variant of the technology with three top dressing and three watering of forage grasses [14]

В орошаемом земледелии получили распространение методы прогнозирования урожайности по уровню влагообеспеченности растений для различных почв в зависимости от фаз развития растений и прироста биомассы. Современные прогностические алгоритмы, разработанные на базе искусственного интеллекта, используют десятки параметров, которые интегрируются по группам. Группы показателей в свою очередь отличаются способами расчета и набором учитываемых факторов. Такой подход позволяет получить высокую степень достоверности получаемых результатов. Например, методы прогнозирования на основе спектральных индексов в среднем показывают отклонение от истинной фактической урожайности культуры не более 10% [15].

Обоснование алгоритма имитационной системы моделирования в виде комплекса компьютерных программ, позволяющих рассчитывать и прогнозировать мелиоративное воздействие для получения позитивного результата целеполагания без негативных воздействий на сопряженные участки или территории. Под мелиоративным воздействием подразумевается направленное на систему (подсистему, процесс или иной объект) технологическое действие, оказывающее влияние на ее качество в заданном направлении для улучшения полезности.

Одной из областей использования методов системного анализа в теории эксплуатации мелиоративных систем является сфера (система) управления, отличающаяся значительным собственным разнообразием и построенная по иерархическому принципу. При моделировании технологических процессов в мелиорации в системе управления выделяются 3 подсистемы (рис. 2): принятие решения (*инициация*

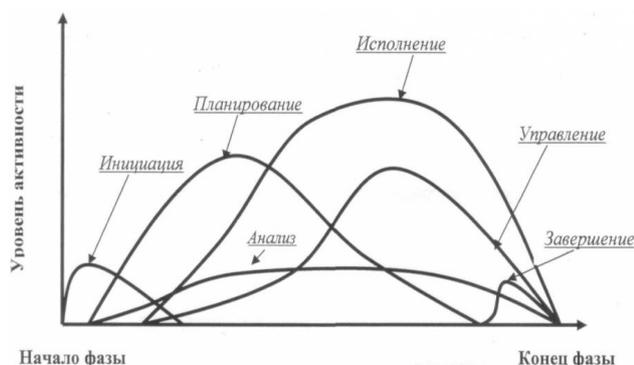


Рис. 2. Способы и виды отображения параметрической информации, используемой для моделирования технологических процессов в мелиорации
Fig. 2. Methods and types of displaying parametric information used for modeling technological processes in land reclamation

и планирование); управление выполнением решения (*управление*); решение с помощью различных технических или иных средств (*исполнение и завершение*) [16].

Режим орошения и производящая его техника полива как категории, определяющие интенсивность и длительность (темпоральность) конвергентного воздействия мелиораций на растение и среду его обитания (почва-приземный слой воздуха), тесно связаны друг с другом. Управление многоуровневого конвергентного взаимодействия факторов жизни растения не исчерпывается основным назначением техники полива – осуществления заданного режима орошения. Например, растения всегда требуют оптимально высокую влажность почвы, но для процессов почвообразования создание даже слабоброшывных режимов противопоказано, так как при этом замедляется накопление гумуса. Водно-физические свойства и продуктивность активного слоя почвы непосредственно определяют водопотребность растений в ходе вегетации и являются объектом мелиоративного воздействия. Продуктивность активного слоя почвы заключается в способности обеспечивать растение на протяжении вегетации элементами питания – продуктивным веществом.

Возникает непростая технологическая проблема разрешения противоречия между скоростью накопления продуктивного вещества и динамикой его расходования. Необходимы компромиссные оптимизационные мероприятия по снижению длительности и интенсивности водоподдачи и водораспределения. Опыт оптимизации или согласования требований растений и почвы в смысле сохранения и повышения ее плодородия показывает, что нужно ориентироваться на сбалансированную величину недополучения урожая по сравнению с потенциально возможной. Методика орошаемого земледелия по программируемой водопотребности не только повышает устойчивость агрогеосистемы, но и уменьшает потребность в ресурсах.

Для орошаемых культур, выращиваемых по технологии, учитывающих реальную водопотребность, предопределяется уменьшение оросительных норм в пределах 7-14%, и как следствие – уменьшение нагрузки на мелиорируемый агроценоз с прилегающими территориями [17]. Создание оптимальных мелиоративных режимов обеспечивается контроллинговыми методами при управлении объектами мелиоративных систем.

Конвергентные мелиоративные процессы способствуют и обеспечивают целенаправленное изменение условий функционирования

почв и управляемых экотопов агроценоза путем непосредственного воздействия на природные процессы влагооборота, в том числе на факторы формирования урожая – тепловой и питательный режимы почвы как наиболее продуктивные факторы жизни растений. Одновременно происходит управляемое воздействие на сопряженные конвергентные биогенные, геохимические и гравитационные процессы, в результате чего обеспечивается прямой экономический эффект в виде повышения интегральной продуктивности угодий [9, 16].

Таким образом, алгоритм создания информационно-аналитической базы интегральных показателей и моделей расчета водопотребности культур при конвергентных процессах мелиоративного воздействия для прогнозирования урожая включает в себя следующие элементы (рис. 3): наименование и назначение процесса (набор объектов); интенсивность и длительность процесса (переработка информации); описание объекта и характера воздействия.

Влияние на управляемые факторы жизни растений водного режима почвы и приземного воздуха (Θ) определяется функциональной зависимостью, в которой урожайность или ее прирост (ΔY_{\max}) – главный аргумент:

$$\Theta = \Delta Y_{\max} \prod_{i=1}^n [1 - (1 - f_i)^2], \quad (1)$$

где Θ – эффективность управления факторами развития растений; ΔY_{\max} – максимальный прирост урожайности

при оптимальном обеспечении управляемыми факторами; f_i – относительная величина i -го фактора, влияющего на урожайность; n – число факторов, влияющих на урожай.

Например, к потенциальным факторам урожайности корнеобитаемого слоя почвы относятся плотность, пористость, механический состав и прочность агрегатов, водно-физические константы (водопроницаемость, скорость впитывания и фильтрации, водоудерживающая способность, гидравлическая проводимость), химический состав (емкость поглощения, засоленность), биологический состав (содержание гумуса, уровень плодородия), а также степень аэрации, температура профиля, уровень залегания грунтовых вод. Среди активно влияющих на урожайность культур метеофакторов – все виды осадков, испаряемость, температура и влажность воздуха, направление и сила ветра, освещенность, напряженность солнечной радиации, продолжительность дня и продолжительность периода с положительными средними температурами воздуха.

На рисунке 4 представлен график влияния управляемых факторов жизни растений на урожайность.

Параметры факторов (f) определяются дефицитом ресурса (DR) данного агроценоза или угодья, которые вычисляются соотношением:

$$F = DR_i - DR_{\min} / DR_{\max} - DR_{\min}, \quad (2)$$

где $DR_{\min} < DR < DR_{\max}$ – соответственно значение i -го ресурса в данном регионе агроландшафта, верхнее и нижнее его граничные значения по экотопам агроценоза.

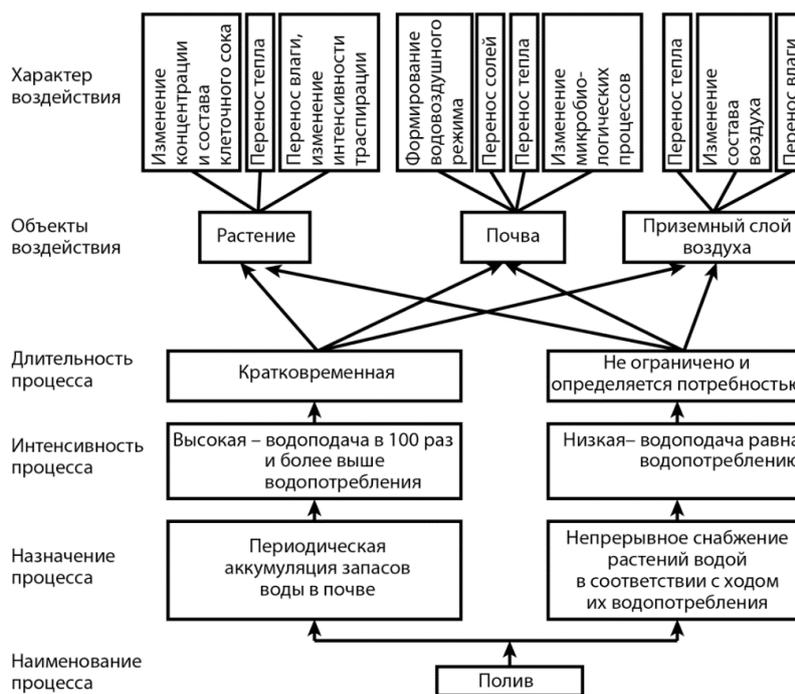


Рис. 3. Алгоритм воздействий конвергентных мелиоративных процессов на растение и среду [18]

Fig. 3. Algorithm of effects of convergent reclamation processes on plants and the environment [18]

Влияние отдельного фактора, находящегося на минимальном уровне и существенно влияющего на урожайность, оцениваются зависимостью:

$$\Theta_i = \Delta Y_i [1 - (1 - f_i)^2], \quad (3)$$

где ΔY_i – прирост урожайности при оптимальном обеспечении i -м фактором, например, влажностью корнеобитаемого слоя почвы.

На рисунке 5 приведены серии характерных графиков зависимости групп факторов, влияющих на урожайность, полученных путем интеграции опытных данных из различных источников [7, 8, 10-14].

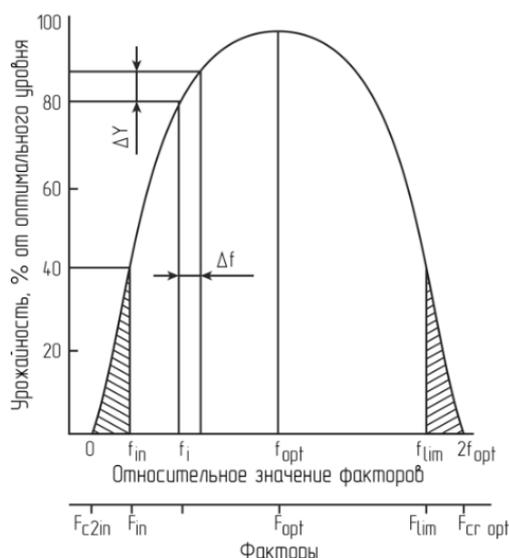


Рис. 4. Влияние управляемых факторов жизни растений на урожайность

Fig. 4. The influence of controlled plant life factors on yield

Выводы

Анализ мелиоративного воздействия посредством конвергентных технологий на компоненты окружающей среды, прежде всего на микроклимат приземного слоя воздуха, активный почвенный слой и в итоге на урожайность культивируемых растений, показывает, что формируются экологические и экономические условия функционирования экотопов агроценоза, связанные с необходимостью предупреждения истощения и сохранения водных ресурсов, деградации почв, сохранения биоразнообразия на севооборотных массивах, обоснования общей стратегии развития агропроизводства в регионе.

Актуальность использования понятия водопотребности для расчетов прогнозируемого уровня урожайности сельхозкультур севооборотного массива заключается в том, что при подборе соответствующей поливной техники, определении

Разработанные с учетом водопотребности культур, модели прогнозируемой урожайности позволяют описывать динамику режима водопотребления растений в условиях конкретной агрономелиоративной деятельности на орошаемых угодьях и получать обоснование критериев оценки эффективности конвергентных технологий, влияющих на водопотребность культур и агроценоза (агросистемы) при природообустройстве. Основное назначение параметра водопотребности – определить с высокой степенью достоверности достаточное количество воды при складывающихся природных и хозяйственных условиях для получения запрограммированного урожая каждой культуры севооборотного массива.

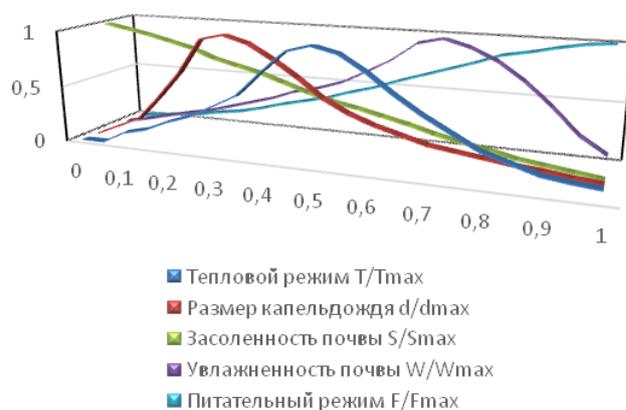


Рис. 5. Графическое отображение влияния природных и технологических управляемых факторов на урожайность культур

Fig. 5. Graphical representation of the influence of natural and technological controlled factors on crop yields

технологии и технических средств полива, при расчете технологических параметров режима орошения, назначении эксплуатационных норм орошения культур и норм полива для конкретных почв обеспечивается оптимальная динамика режима водопотребления растений в условиях конкретной агрономелиоративной деятельности на орошаемых угодьях и может быть получено обоснование объективных критериев оценки техногенных и природных компонентов, влияющих на водопотребность культур.

Экономическая функция управления конвергентными процессами, обеспечивающих заданные мелиоративные воздействия, заключается в сохранении, восстановлении и возможном повышении плодородия почв сельхозугодий. В то же время плодородие почвы как показатель не является конечной целью. Плодородие рассматривается как важнейший фактор получения наилучшего урожая возделываемых культур

при складывающихся природных условиях. Именно этот показатель является главной целью управляющих воздействий на мелиоративных системах. Вместе с тем следует учитывать

важное и непреложное обстоятельство того, что требования культивируемых растений и требования почвы не всегда совпадают – они могут вступать в противоречие.

Список использованных источников

1. Мелиоративный комплекс Российской Федерации: Информ. издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 304 с.
2. Каблуков О.В. Классифицирующие параметры мелиоративных воздействий и преобразований // Доклады ТСХА. Сборник статей, Выпуск 293, М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2021. С. 13-16.
3. Каблуков О.В. Формирование функциональных блоков гидромелиоративных систем высокого ранга организованности / О.В. Каблуков, К.С. Семенова // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 5. С. 18-24. <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2021-5-18-24>
4. Каблуков О.В. Ленд-девелопмент – новый профиль и направление природообустройства // Природообустройство. 2015. № 2. С. 24-27. EDN: UFEXEN
5. Развитие системы мелиорации в России – дополнительный фактор повышения плодородия полей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://agroday.ru/interview/razvitie_sistemy_melioracii_v_rossiidopolnitelnyi_faktor_povysheniya_plodorodija_polei/, 2013.
6. Ольгаренко И.В. Управление технологическими процессами на экологически сбалансированных оросительных системах // Мелиорация и водное хозяйство. 2007. № 4. С. 26-31. EDN: IBPFWN
7. Donghyun JeonYuna, Kang Solji, Lee Sehyun, Choi Yeonjun Sung, Tae-Ho Lee Changsoo, Kim Digitalizing A new trend of next-generation breeding based on genomic prediction. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1092584/full>
8. Методика оценки экономической эффективности мероприятий по реконструкции мелиоративных систем с учетом технического состояния гидромелиоративных объектов, вероятностного характера изменения природно-климатических условий, хозяйственных, экологических и социальных условий функционирования, мелиорируемых агроландшафтов, экологической ценности природных экосистем, степени эрозии, структуры природных ландшафтов и ущерба здоровью человека: Научное издание. Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015. 116 с.
9. Разработка научно-методического обоснования и определение перспективы использования водных ресурсов Северо-кавказского федерального округа Российской Федерации, а также научно обоснованных рекомендаций по повышению эффективности использования водных ресурсов Северо-кавказского федерального округа Российской Федерации при мелиорации земель сельскохозяйственного назначения на основе водного баланса территории (отчет о НИР заключительный за 2021-2023 гг.) отчет о НИР/НИОКР (итоговый) Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»: Коломна 2023. Номер государственной регистрации: 22312050005. 941 с.
10. Пчелкин В.В. Суммарное водопотребление люцерны на дерново-подзолистых почвах водоразделов Московской области / В.В. Пчелкин В.В., Ю.И. Сухарев, О.М. Кузина, С.О. Владимиров // Природообустройство. 2020. № 1. С. 47-53. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-47-54

References

1. Land reclamation complex of the Russian Federation: inform. edition. Moscow: FSBIU Rosinformagrotech, 2020. 304 p.
2. Kablukov O.V. Classifying parameters of reclamation impacts and transformations // In the collection: TLC REPORTS. Collection of articles, Issue 293, Moscow: Publishing House of RGAU-MSHA, 2021. P. 13-16
3. Kablukov O.V., Semenova K.S. Formation of functional blocks of hydro-reclamation systems of high degree of organization // Land reclamation and water management. 2021. No. 5. P. 18-24. <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2021-5-18-24>
4. Kablukov O.V. Land development – a new profile and direction of environmental management. / Prirodoobustrojstvo. 2015. No. 2. P. 24-27. EDN: UFEXEN
5. The development of the land reclamation system in Russia is an additional factor in increasing the fertility of fields [Electronic resource]. – Access mode: http://agroday.ru/interview/razvitie_sistemy_melioracii_v_rossii_dopolnitelnyi_faktor_povysheniya_plodorodija_polei/, 2013.
6. Olgarenko I.V. Management of technological processes on ecologically balanced irrigation systems // Melioration and water management. 2007. No. 4. P. 26-31. EDN: IBPFWN
7. Donghyun JeonYuna, Kang Solji, Lee Sehyun, Choi Yeonjun Sung, Tae-Ho Lee Changsoo, Kim Digitalizing A new trend of next-generation breeding based on genomic prediction. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1092584/full>
8. Methodology for assessing the economic effectiveness of measures for the reconstruction of reclamation systems, taking into account the technical condition of hydro-reclamation facilities, the probabilistic nature of changes in natural and climatic conditions, economic, environmental and social conditions for the functioning of reclaimed agrolandscapes, the ecological value of natural ecosystems, the degree of erosion, the structure of natural landscapes and damage to human health: scientific. the publication. Kolomna: IP Vorobyov O.M., 2015. 116 p.
9. Development of a scientific and methodological justification and determination of the prospects for the use of water resources in the North Caucasus Federal District of the Russian Federation, as well as scientifically sound recommendations for improving the efficiency of the use of water resources in the North Caucasus Federal District of the Russian Federation in land reclamation for agricultural purposes based on the water balance of the territory (final research report for 2021-2023) Research and Development report (final) All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation and Agricultural Supply Systems “Raduga”: Kolomna 2023. State registration number: 22312050005. 941 p.
10. Pchelkin V.V., Sukharev Yu.I., Kuzina O.M., Vladimirov S.O. Total water consumption of alfalfa on sod-podzolic soils of the Moscow region watersheds. / Prirodoobustrojstvo. 2020. No. 1. P. 47-53. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-47-54
11. Golovanov A.I., Pchelkin V.V., Gerasimov V.O., Kuzina O.M. The relationship between soil fertility and the water regime when growing potatoes on sod-podzolic soils. / Scientific life. 2018. No. 6. P. 85-94. EDN: XSFHUT

11. Голованов А.И. Взаимосвязь между плодородием почв и водным режимом при выращивании картофеля на дерново-подзолистых почвах / А.И. Голованов, В.В. Пчелкин, В.О. Герасимов, О.М. Кузина // Научная жизнь. 2018. № 6. С. 85-94. EDN: XSFHUT

12. Планирование водопользования при орошении сельскохозяйственных культур: Инструктивно-методическое изд. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 172 с. ISBN 978-5-7367-1023-2.

13. Данильченко Н.В. Биоклиматические основы нормирования орошения (на примере ЦЧО, Поволжья, Северо-Кавказского регионов). М.: МГУП. 2009. 187 с. ISBN 5-89231-156-2.

14. Михайленко И.М. Современные этапы развития теории мелиорации сельскохозяйственных земель // Агрофизика 2012 № 1(5) с. 10-16. EDN: OZDVLP

15. Guo Y., Chen S., Li X., Cunha M., Jayavelu S., Cammarano D., et al. (2022). Machine learning-based approaches for predicting SPAD values of maize using multispectral images. *Remote Sens.* 14 (6), 1337. doi: 10.3390/rs14061337.

16. Жеруков Т.Б. Новое в подходах программирования и прогнозирования эффективности сельскохозяйственных культур [Электронный ресурс] / Т.Б. Жеруков – Режим доступа: <http://novainfo.ru/article/8722>.

17. Методические указания по нормированию орошения с учетом корректировки биологических коэффициентов, дифференциации почвенно-климатических условий и пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических факторов: метод. указ. М.: 2022. 80 с. ISBN 978-5-7367-1699-9.

18. Механизация полива. Справочник / Штепа Б.Г., Носенко В.Ф., Винников Н.В. и др. М: Агропромиздат, 1990. 336 с

12. Planning of water use in irrigation of agricultural crops: tools. – method. ed., Moscow: Rosinformagrotech, 2014. 172 p. ISBN 978-5-7367-1023-2.

13. Danilchenko N.V. Bioclimatic principles of irrigation rationing (on the example of the Central Agricultural District, the Volga region, the North Caucasus regions). Moscow: MGUP. 2009. 187 p.

14. Mikhaylenko I.M. Modern stages of development of the theory of agricultural land reclamation // *Agrophysics* 2012. No. 1(5) P. 10-16. EDN: OZDVLP

15. Guo Y., Chen S., Li X., Cunha M., Jayavelu S., Cammarano D., et al. (2022). Machine learning-based approaches for predicting SPAD values of maize using multispectral images. *Remote Sens.* 14 (6), 1337. doi: 10.3390/rs14061337.

16. Zherukov T.B. New in approaches to programming and forecasting the effectiveness of agricultural crops [Electronic resource] / T.B. Zherukov – Access mode: <http://novainfo.ru/article/8722>.

17. Methodological guidelines for rationing irrigation, taking into account the correction of biological coefficients, differentiation of soil and climatic conditions and spatial and temporal variability of hydrometeorological factors: method. Decree, Moscow, 2022, 80 p. ISBN 978-5-7367-1699-9.

18. Mechanization of irrigation. Handbook / Shtepa B.G., Nosenko V.F., Vinnikov N.V. and others-Moscow: Agropromizdat, 1990. 336 p.

Об авторах

Олег Викторович Каблук, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сельскохозяйственных мелиораций; ORCID: 0000-0002-8022-7904; o.kablukov@rgau-msha.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, myrksina@rgau-msha.ru

About the authors

Oleg V. Kablukov, CSs (Eng), associate professor, associate professor of the department of agricultural land reclamation, ORCID: 0000-0002-8022-7904; o.kablukov@rgau-msha.ru

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

Yulia A. Myrksina, CSs (Econ), associate professor of the department of accounting, finance and taxation; myrksina@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Каблук О.В., Кузина О.М., Мырксина Ю.А. провели теоретические исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов

Каблук О.В. – разработка концепции статьи, обобщение и материалов исследований, редакция и написание текста

Кузина О.М. – сбор материалов и обработка экспериментальных данных,

Мырксина Ю.А. библиографический обзор и описание экономической части

Contribution of the authors

Kablukov O.V. – development of the concept of the article, presentation of the research materials, editing and writing of the text.

Kuzina O.M. – collection of materials and processing of experimental data,

Myrksina Yu.A. – bibliographical review and description of the economic part of the article.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 25.12.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review and revision 20.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 20.05.2025

Kablukov O.V., Kuzina O.M., Myrksina Yu.A. conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-14-20>

УДК 631.67:631.3



ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРЕЦИЗИОННОГО ОРОШЕНИЯ

Л.А. Журавлёва

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

Аннотация. Система прецизионного орошения – технология, позволяющая подавать дозированный объем воды непосредственно на требуемый участок поля, снизить затраты на ресурсы, обеспечивая экономически обоснованный и экологически безопасный полив. Целью работы явилась разработка технических средств и устройств на широкозахватные дождевальные машины для прецизионного орошения сельскохозяйственных культур, обеспечивающих соответствие объема воды требуемому уровню влагозапасов участков поля на момент их полива, а также оценка перспективности применения технологии. В статье рассмотрены возможности модернизации широкозахватной дождевальной машины, вариант с блочным управлением дождевателями по учащенной схеме и непосредственное управление дождевателем через индивидуальный электромагнитный клапан. Регулируемая подача воды осуществлялась с помощью программируемого логического управления и электромагнитных клапанов. Даны стратегия точного орошения и применяемые технические средства. Рассмотрены характеристики работы машин – в частности, изменение слоя осадков в зависимости от режима полива; зависимость между рабочим давлением и изменением расхода дождевателей. Дана оценка коэффициента эффективности полива Кристиансена при различных режимах полива. Сделаны выводы об эффективности и целесообразности применения технологии прецизионного орошения и даны рекомендации.

Финансирование. Работа выполнена за счет средств федерального бюджета в рамках государственного задания Министерства сельского хозяйства России (номер государственной регистрации темы 1022071100103-2-1.5.8.)

Ключевые слова: дождевальная машина, прецизионное орошение, расход, электромагнитные клапаны, дождеватель

Формат цитирования: Журавлёва Л.А. Оценка перспективности прецизионного орошения // Природообустройство. 2025. № 3. С. 14-20. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-14-20>

Scientific article

EVALUATION OF THE PROSPECTS OF PRECISION IRRIGATION

L.A. Zhuravleva

Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

Abstract. The precision irrigation system is a technology that allows you to supply a metered volume of water directly to the required area of the field, reducing resource costs, providing economically sound and environmentally safe irrigation. The purpose of the work was to develop technical means and devices for wide-range sprinklers for precision irrigation of agricultural crops, ensuring that the volume of water corresponds to the required level of moisture reserves of field areas at the time of their irrigation, and to assess the prospects for using the technology. The article discusses the possibilities of upgrading a wide-range sprinkler machine. A variant with block control of sprinklers according to the accelerated scheme and direct control of the sprinkler through an individual solenoid valve. The regulated water supply was carried out using programmable logic control and electromagnetic valves. The strategy of precision irrigation and the technical means used are given. The characteristics of the machines are considered. In particular, the change in the precipitation layer depending on the irrigation regime. Relationship between operating pressure and change in sprinkler flow. The Christiansen irrigation efficiency coefficient under different irrigation regimes is estimated. Conclusions are made about the effectiveness and expediency of using precision irrigation technology and recommendations are given. Option with frequent block control of sprinklers and direct control of the sprinkler via an individual solenoid valve. The controlled water supply

was carried out using programmable logic control and solenoid valves. The strategy of precision irrigation and the technical means used are given. The characteristics of the machines are considered. In particular, the change in the precipitation layer depending on the irrigation regime. Relationship between operating pressure and change in sprinkler flow. The Christiansen irrigation efficiency coefficient under different irrigation regimes is estimated. Conclusions are made about the effectiveness and expediency of using precision irrigation technology and recommendations are given.

Financing. The work was carried out at the expense of the federal budget within the framework of the state assignment of the Ministry of Agriculture of Russia (state registration number of the topic 1022071100103-2-1.5.8.)

Keywords: sprinkler machine, precision irrigation, flow rate, solenoid valves, sprinkler

Format of citation: Zhuravleva L.A. Evaluation of the prospects of precision irrigation // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 14-20. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-14-20>

Введение. Пространственная неоднородность почвы является одним из факторов, влияющих на изменение урожайности сельскохозяйственных культур в пределах поля. Почва неоднородна, и большинство химических и физических свойств значительно различаются в пределах одного участка.

Другие факторы, влияющие на изменение урожайности сельскохозяйственных культур в пределах поля, – антропогенные (уплотнение почвы, обработка, прокладка оросительно-осушительных систем), биологические (болезни, вредители), метеорологические (влажность, осадки, ветер), а также топографические (уклон) факторы. Неспособность традиционного земледелия учитывать изменения этих факторов в пределах поля не только оказывает негативное экономическое воздействие по причине снижения урожайности, но и негативно влияет на экологическое состояние окружающей среды ввиду чрезмерного применения агрохимикатов, удобрений и воды.

Пространственное распределение оросительной воды на полях необходимо рассматривать дифференцированно ввиду изменения свойств почвы, включая плодородие, текстуру, водоудерживающую способность, скорость инфильтрации, рельеф и выращивание различных агрокультур на одном и том же поле.

Таким образом, потребность в орошении может различаться в зависимости от участка конкретного поля. Кроме того, системы полива имеют некоторые недостатки – такие, как неравномерность орошения, испарение капель и потери на унос ветром. Потребность в орошении может различаться в разных зонах конкретного поля и должна варьироваться в зависимости от пространственной изменчивости почвы.

Дифференцированным системам и технологиям полива посвящены работы многих ученых [1-12]. Для реализации точного орошения необходимо выполнить несколько требований.

Во-первых, необходимо определить различия в потребностях в воде или зоны управления орошением. Площадь орошения с одинаковой глубиной полива или слоем осадков определяется на основе пространственных особенностей почвы. Одновременный учет состояния растений и различных свойств почвы требует весьма сложного и точного управления орошением. Для упрощения рациональным является учет только содержания доступной воды.

Во-вторых, система должна быть способной регулировать глубину полива или слой осадков на небольших отдельных участках. Точность здесь определяется системами позиционирования, возможностями датчиков влажности, дождевальной техникой, расположением дождевателей, равномерностью их работы, инертностью управления отдельными устройствами и системой управления в целом.

Цель исследований: разработка технических средств и устройств на широкозахватные дождевальные машины для прецизионного орошения сельскохозяйственных культур, обеспечивающих соответствие объема воды требуемому уровню влагозапасов участков поля на момент их полива, оценка перспективности применения технологии.

Материалы и методы исследований. В настоящее время можно выделить следующие методы реализации прецизионного орошения:

- Управление отдельными дождевателями или блоками с несколькими дождевателями.
- Изменение скорости движения дождевальной машины и деление на секторы полива.
- Динамическое регулирование расхода во всем трубопроводе.

Управление отдельными дождевателями или блоками с несколькими дождевателями может осуществляться путем их включения-отключения, то есть соотношением времени полива

и паузы или изменением проходного сечения сопла дождевателей.

Выбор способа зависит от конкретных условий полива: в частности, изменчивости свойств почвы, условий рельефа местности, хозяйственных факторов – таких, как расположение агрокультур и их разноименность.

В любом случае необходимо разбить поле на небольшие участки, а затем разработать индивидуальное управление каждым участком с использованием сельскохозяйственных ресурсов (удобрения, гербициды, вода) с учетом специфики участка. При этом участки могут иметь разную форму.

Количество воды, подаваемой в почву во время каждого полива, зависит от того, сколько времени прошло с момента последнего полива и сколько воды с тех пор использовала культура.

Первый вариант требует максимальной модернизации дождевальной машины. Регулируемая подача воды осуществляется с помощью программируемого логического управления и электромагнитных клапанов, (рис. 1).

Для внедрения точного орошения необходимо решить две основные задачи: определение границ участков и управление точным орошением.

Датчик положения преобразует угловое положение вала в цифровой код. Датчик положения был установлен в начале магистрали и подключен к блоку управления. Структура исследовательской стратегии для точного орошения представлена на рисунке 2.

Для оценки эффективности применения прецизионного орошения были проведены исследования двух конструктивных решений.

В первом варианте управление осуществлялось индивидуально каждым дождевателем однопролетной машины посредством электромагнитного клапана. Электромагнитные клапаны *Vaureihe* были установлены в начале каждой вертикальной трубы (гусака), которая подсоединена к спускным поливным трубкам. Спускные поливные трубы установлены через 2,2 м.

Второй вариант был смонтирован на одном из пролетов и включал в себя систему блочного управления дождевателями с учащенной их установкой через 0,5 м и дополнительной горизонтальной полимерной трубой (рис. 3). Внутренний диаметр трубок составлял 20,0 мм.

Определение зон управления орошением основывалось на измерении электропроводности почвы с помощью датчиков. В исследованиях использовалась система оценки влажности почвы *Seed'OS_5* [3]. Полевые испытания, связанные с мониторингом влажности почвы, включают в себя оценку и калибровку датчика влажности

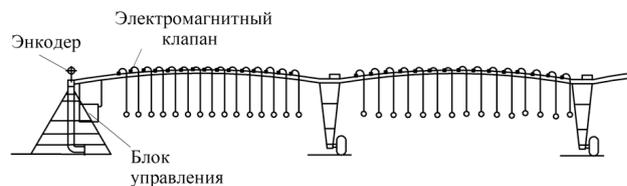


Рис. 1. Модернизация дождевальной машины
Fig. 1. Sprinkler machine upgrade

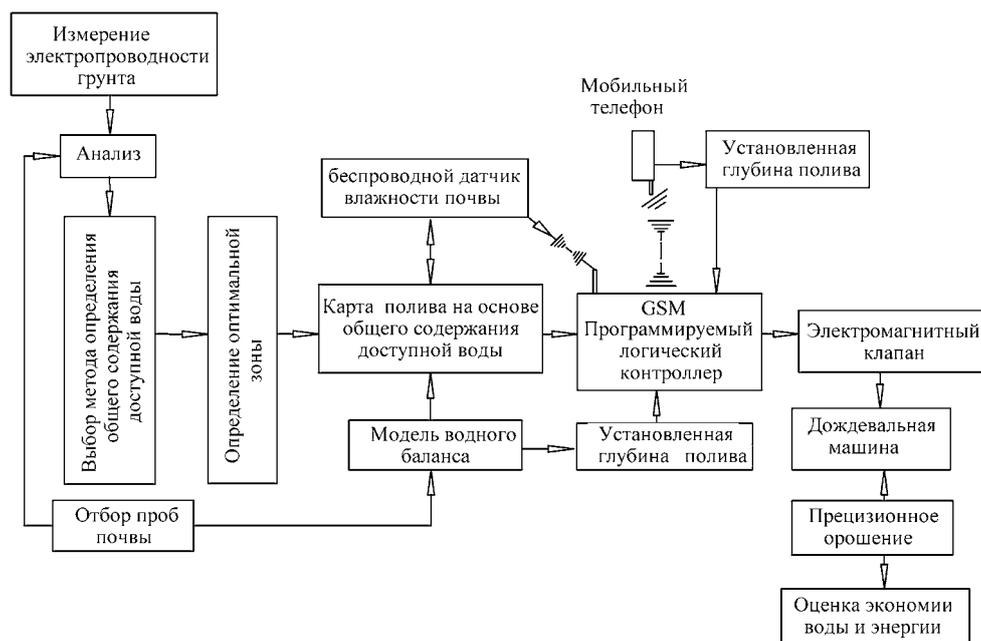


Рис. 2. Стратегия точного орошения
Fig. 2. Precision irrigation strategy

почвы для конкретной почвы, полевые испытания передачи данных.

Показания снимались по сетке на расстоянии 4-6 м друг от друга.

Полевые исследования проводились на каштановых среднесуглинистых почвах с наименьшей влагоемкостью 20% НВ. Культура – люцерна. Скорость ветра составляла менее 1,5 м/с. Дождевальная машина кругового полива –Reinke.

Количество подаваемой воды регулировалось временем включения-выключения клапана (пульсацией) и установкой таймера движения машины. Режим «Старт-стоп» также измеряется соотношением времени движения и стоянки машины (ПВ%).

При 80% клапан открывался на 80 с и закрывался на 20 с.

Рабочее давление составляло 0,05 МПа; 0,10 МПа; 0,12 МПа; 0,15 МПа; 0,20 МПа; 0,250 МПа.

Известно, что у широкозахватных дождевальных машин, у дождевателей, расположенных

у последней тележки, интенсивность полива достигает значительных величин, вызывая сток и провоцируя эрозионные процессы почвы. Величина допустимой интенсивности в общем виде зависит от типа почвы, уклона местности и диаметра капель. Рационально с учетом условий принять максимальные характеристики дождя: интенсивность – до 0,6 мм/мин, а диаметр капель – до 1,0 мм.

Результаты и их обсуждение. На поле были определены зоны полива с использованием измерений на основе датчиков. Основываясь на измерениях влажности почвы в пределах каждой зоны, можно определить дефицит влажности почвы и требуемое количество воды.

На основании градации было выделено 6 зон содержания доступной воды (рис. 4).

Проведенный анализ показал неравномерное распределение. Первая и шестая зоны – самые незначительные (2 и 3% соответственно). Суммарно на их долю приходится 0,33 га. Самыми большими являются вторая и третья зоны общей площадью 6 га. Среднее значение содержания доступной воды составляет 134 мм.

Количеством зон, на которые разбивается зона полива, можно регулировать большую или меньшую точность подачи воды. Увеличение количества зон больше 6, как правило, является нецелесообразным.

Программируемый логический контроллер и электромагнитные клапаны позволяли включать и выключать подачу воды при любой скорости с уровнем пульсации от 0 до 100% с интервалом в 100 с.

Сравнивая характеристики со стандартной технологией полива единой нормой, можно сделать вывод о том, что предлагаемая технология полива на данном участке полива не позволит значительно экономить ресурсы, но обеспечит экологически безопасный полив, а это особенно важно при рассмотрении орошения на перспективу.

Исследования показали, что датчики Seed'OS_5 являются надежными приборами и могут быть эффективно использованы для измерения содержания влаги в почве. Тем не менее расстояние между точками отбора проб должно быть уменьшено.

При втором варианте модернизации слой осадков, выданный машиной при разных режимах, определялся дождемерами. Сравнение требуемого слоя осадков и выданного при разных скоростях движения машины представлено в таблице 1.

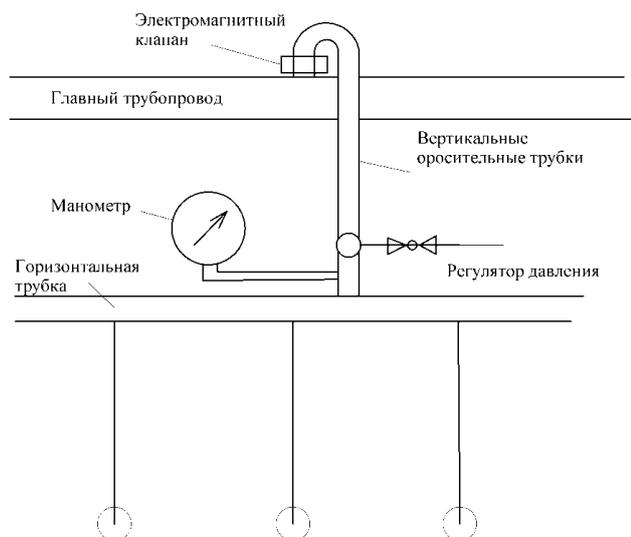


Рис. 3. Вариант с блочным управлением дождевателями по уащенной схеме

Fig. 3. Option with block control of sprinklers according to a quickened scheme

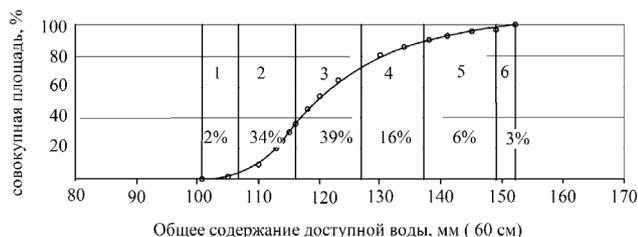


Рис. 4. Распределение доступной воды по площади

Fig. 4. Distribution of available water over the area

Таблица 1. Слой осадков при разных скоростях движения машины
Table 1. Precipitation layer at different speeds of the sprinkler machine

Пульсация % <i>Pulsation, %</i>	Скорость машины 15% <i>Machine speed 15%</i>		Скорость машины 30% <i>Machine speed 15%</i>	
	Измеренный слой осадков, мм <i>Measured precipitation layer, mm</i>	Теоретический слой осадков, мм <i>Theoretical precipitation layer, mm</i>	Измеренный слой осадков, мм <i>Measured precipitation layer, mm</i>	Теоретический слой осадков, мм <i>Theoretical precipitation layer, mm</i>
10	2,6	2,1	1,2	1,0
30	5,5	6,3	2,5	3,0
40	7,6	8,5	3,4	4,0
60	12,1	12,6	5,6	6,1
70	14,2	15,1	6,2	7,2
90	19,3	19,2	8,2	9,2
100	21,0	21,3	10,1	10,1

Поскольку клапаны имеют некоторую инертность срабатывания, необходимо было оценить их влияние. Результаты исследований не выявили значимого влияния ни в первом, ни во втором вариантах модернизации. Тем не менее измерения показали некоторые отклонения на границе зон управления с большим/меньшим слоем осадков, а также колебаний радиусов полива дождевателями.

Значительно большей проблемой явился подбор дождевателей с устойчивым радиусом полива и высокой равномерностью, поскольку наложение слоя осадков от соседних дождевателей влияет на точность подачи воды в целом.

Дождеватели Nelson irrigation PC-S3000, используемые в комплекте в первом варианте модернизации, имели относительно большой радиус полива, что указывает на необходимость использования дождевателей с меньшим радиусом полива, разработки новых и подбора существующих. Во втором варианте модернизации

использовались авторские дождеватели дефлекторного типа [3].

Радиус распыливания воды дождевателем не должен превышать расстояния между дождевателями.

Некоторое отклонение равномерности могло быть вызвано ветром, скорость которого на короткое время превышало максимальные значения, указанные в инструкции по эксплуатации.

Результаты исследований показали, что использование представленного метода подачи воды не оказало отрицательного влияния на равномерность подачи воды по сравнению с равномерностью подачи воды традиционной системой полива (табл. 2).

Исследования показали колебания давления в точках перехода в новую зону полива и при одновременном открытии или закрытии всех электромагнитных клапанов, что требует дополнительных гидравлических исследований. Одновременное закрытие всех

Таблица 2. Коэффициент однородности при различных режимах полива (второй вариант модернизации)

Table 2. Uniformity coefficient under different irrigation regimes (the second option of modernization)

Уровень пульсации клапана, % <i>Valve pulsation level, %</i>	Коэффициент эффективности полива Кристиансена <i>Christiansen irrigation efficiency coefficient</i>	
	при скорости 15% <i>at 15% speed</i>	при скорости 30% <i>at 30% speed</i>
10	76,6	73,9
30	89,8/*87	91,9/*89
40	90,9	89,4
60	94,3/*90	89,9/*88
70	94,1	90,7
90	96,4	96,8
100	97,4	94,8

* значения при первом варианте модернизации / values for the first upgrade option

электромагнитных клапанов возможно при проходе машины над неполиваемыми секторами (при поливе участков специфической формы, особенностей рельефа, непродуктивных участков почвы).

Изменения расхода составили порядка 10-15% при рабочих давлениях в диапазоне от 0,05-0,20 МПа. Результаты представлены на рисунке 5.

Для практического использования были разработаны графики соотношения уровня пульсации (процента включения-выключения клапана) и скорости машины (соотношения паузы-движения) для обеспечения требуемого слоя осадков (рис. 6).

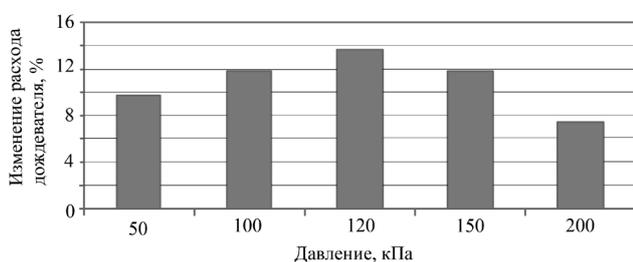


Рис. 5. Зависимость между рабочим давлением и изменением расхода дождевателя

Fig. 5. Relationship between operating pressure and change in sprinkler flow

Выводы

Для определения эффективности применения прецизионного орошения необходимо:

- Оцифровать предполагаемую площадь полива; определить характеристики почвы.
- Разработать карту общего содержания доступной воды.
- Зонировать площадь полива с обобщением близко расположенных зон. При разнице величины более 20% применение прецизионного полива экономически обосновано.
- Оценить площади участков разных зон содержания доступной воды. При наличии двух и более зон площадью каждой более 10%

Список использованных источников

1. Афанасьев Р.А. Агрохимическое обеспечение точного земледелия // Проблемы агрохимии и экологии. 2008. № 3. С. 46-52. EDN: JXDBDF
2. Витковская С.Е. Оценка пространственной неоднородности агрохимических параметров почвы в пределах делянки полевого опыта / С.Е. Витковская, А.А. Изосимова П.В. Леконтцев // Агрохимия. 2010. № 3. С. 75-82.
3. Журавлева Л.А. Технико-технологические решения и рекомендации по сохранению плодородия почв подверженных водной эрозии: Монография / Журавлева Л.А., Якобсон Б.Б. Москва, 2024. 115 с.

Организация поливов заключается в предварительном планировании на основании характеристик природной зоны, возделываемой культуры, гидрогеологии, хозяйственных факторов и картирования почв, а также факторов, обуславливающих необходимость корректировки режима на основании анализа информации, результатов оперативных метеоданных и измерений характеристик почвы.

Преимуществами разработанной системы являются повышение урожайности сельскохозяйственных культур, экономичное использование ресурсов за счет применения переменной нормы расхода, оптимизация или экономия воды и электроэнергии.

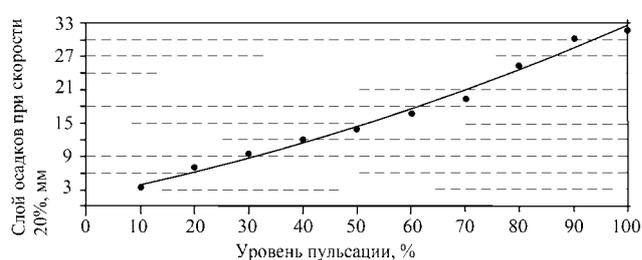


Рис. 6. Изменение слоя осадков в зависимости от режима полива

Fig. 6. Change in the precipitation layer depending on the irrigation regime

применение прецизионного полива экономически и экологически обосновано.

Прецизионное орошение позволяет снизить затраты на ресурсы. Эффективность зависит от соотношения составляющих параметров изменчивости опытного участка или поля. Поля, которые характеризуются пространственной изменчивостью, выигрывают от применения системы точного орошения.

Не вызывает сомнения экологическая целесообразность применения технологии прецизионного орошения, позволяющая избежать негативного воздействия на окружающую среду, повысить качество продукции и сэкономить ресурсы.

Referenes

1. Afanasjev R.A. Agro chemical provision of the precision farming // Problems of agro chemistry and ecology. 2008. № 3. P. 46-52. EDN: JXDBDF
2. Vitkovskaya S.E. Assessment of the spatial inhomogeneity of agrochemical parameters of soil within the plot of the field experiment / S.E. Vitkovskaya, A.A. Izosimova, P.V. Lekontsev // Agro chemistry. 2010. № 3. P. 75-82.
3. Zhuravleva L.A. Technical-technological solutions and recommendations on preservation of soil fertility subjected to water erosion: Monograph / Zhuravleva L.A., Yakobson B.B. Moscow, 2024. 115p.

4. Журавлева Л.А. Целесообразность внедрения “точного” земледелия // Научная жизнь. 2020. Т. 15. № 1 (101). С. 8-14. DOI: 10.35679/1991-9476-2020-15-1-8-14

5. Соловьев Д.А. Цифровые технологии в сельском хозяйстве / Д.А. Соловьев, Л.А. Р.Н. Бахтиев [и др.]. // Аграрный научный журнал. № 11. 2019. С. 95-98. DOI: 10.28983/asj.y2019i11pp95-98 EDN: ICTZCV

6. Степных Н.В. Цифровизация управления агротехнологиями / Н.В. Степных [и др.]. Куртамыш: ООО «Куртамышская типография», 2018. 43 с.

7. Якушев В.П. Информационные технологии в точном земледелии / В.П. Якушев, Р.А. Полуэктов, Э.И. Смолар, А.Г. Топаж // Агротехнический вестник. 2002. № 2. С. 36-39.

8. Abdrazakov F.K. The Studies of Water Flow characteristics in the Water Conducting belt of wide-coverage Sprinkling/ F.K. Abdrazakov, D.A. Solovev, D.A. Kolganov The Turkish Online. Journal of Design, Art and 0,125. Communication – TOJDAC

9. Mohapatra H. The Future of Smart Agriculture / H. Mohapatra, S.R. Mishra, K.M. Bhabendu // Publisher: NOVA. 2023.

10. Soloviev D.A. Robotic Irrigative Complex with intellectual Control System “CASCADE” / D.A. Soloviev, L.A. Zhuravleva, S.M. Bakirov // Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy. XVIII International Scientific and Practical Conference “Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy”. 2020.

11. Zhuravleva L. The method of calculating sprinklers for wide-reach sprinklers. BIO Web of Conferences, 2024.

12. Zhuravleva L. The technology of fertilizing irrigation with differentiated norms using wide-reach sprinkler machines. E3S Web of Conferences, 2024.

4. Zhuravleva L.A. Feasibility of introduction of “precise” agriculture // Scientific life. 2020. V. 15. № 1 (101). P. 8-14. DOI: 10.35679/1991-9476-2020-15-1-8-14

5. Solovjev D.A. Digital technologies in agriculture / D.A. Solovjev L.A., R.N. Bakhtiev [and others]. // Agrarian scientific journal. № 11. 2019. P. 95-98. DOI: 10.28983/asj.y2019i11pp95-98 EDN: ICTZCV

6. Stepnykh N.V. Digitization of management of agro technologies / N.V. Stepnykh [and others]. Kurtamysh: ООО «Kurtamysh printing house», 2018. 43 p.

7. Yakushev V.P. Information technologies in the precise agriculture / V.P. Yakushev, R.A. Poluektov, E.I. Smolyar, A.G. Topazh // Agro chemical bulletin. 2002. № 2. P. 36-39.

8. Abdrazakov F.K. The Studies of Water Flow characteristics in the Water Conducting belt of wide-coverage Sprinkling/ F.K. Abdrazakov, D.A. Solovev, D.A. Kolganov The Turkish Online. Journal of Design, Art and 0,125. Communication – TOJDAC.

9. Mohapatra H. The Future of Smart Agriculture / H. Mohapatra, S.R. Mishra, K.M. Bhabendu // Publisher: NOVA. 2023.

10. Soloviev D.A. Robotic Irrigative Complex with intellectual Control System “CASCADE” / D.A. Soloviev, L.A. Zhuravleva, S.M. Bakirov // Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy. XVIII International Scientific and Practical Conference “Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy”. 2020.

11. Zhuravleva L. The method of calculating sprinklers for wide-reach sprinklers. BIO Web of Conferences, 2024.

12. Zhuravleva L. The technology of fertilizing irrigation with differentiated norms using wide-reach sprinkler machines. E3S Web of Conferences, 2024.

Об авторе

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

Критерии авторства / Criteria of authorship

Журавлёва Л.А. выполнила теоретические и практические исследования, на основании которых провела обобщение и написала рукопись, имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 16.02.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 25.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 25.05.2025

Information about the author

Larisa A. Zhuravleva, DSc (Eng), associate professor; ORCID: 0000-0002-1168-4001; Scopus:57204785451; RINTS ID: WOS Research ID: AAO-7123-2020; dfz@yandex.ru

Zhuravleva L.A. carried out theoretical studies, on the basis of which she generalized and wrote the manuscript. She has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-21-29>

УДК 633.18(470.62)



АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ РИСА В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ

С.Д. Исаева, Е.Л. Раткович ✉

ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, к. 2, Россия

Аннотация. Стандартная технология полива рисовых чеков затоплением является наиболее водоемкой. Экономическая эффективность мелиоративных проектов может быть рассчитана только на основе многофакторного анализа влияния ирригационно-хозяйственных факторов при возделывании риса на его продуктивность. Объектом исследований являлся участок Петровско-Анастасиевской оросительной системы в Краснодарском крае. В числе варьируемых переменных выбраны сорт риса, способ посева, глубина заделки семян, режим орошения. Соблюдение севооборота, внесение удобрений, роль режима поливов в разные фазы развития растений риса, ряд других факторов на данном этапе исследований не рассматривались. Цель исследований заключалась в разработке методики расчета оптимальной оросительной нормы, обеспечивающей наибольший экономический эффект возделывания риса с учетом сортовых особенностей культуры и способа посева в условиях Краснодарского края. Для решения задач была разработана версия программного модуля в среде Excel, позволяющая определять величину оросительной нормы и набор названных выше факторов, приводящих к наиболее экономичному решению и соответствующим проектным рекомендациям. В качестве базовой зависимости урожайности от оросительной нормы принята кривая Пирсона I-го типа с параметрами, подбираемыми на основании материалов полевых и лабораторных исследований. В режиме имитационного моделирования рассмотрены три действующих фактора: режим орошения, способ посева риса, сорт риса. Минимальный набор сценариев, оставленных для моделирования ситуации, составил 18 вариантов, что привело в рассмотренном примере к оросительной норме около 20 тыс. м³/га в условиях комбинированного орошения среднеспелых сортов риса. Направление дальнейших исследований связано с обоснованием функций продуктивности, расширением числа факторов влияния и уточнением удельных технико-экономических показателей.

Ключевые слова: многофакторный анализ, полив рисовых чеков затоплением, кривая Пирсона I-го типа, комбинированное орошение, оросительная норма, сорт риса, способ посева

Формат цитирования: Исаева С.Д., Раткович Е.Л. Аспекты оптимизации факторов, влияющих на продуктивность риса в Краснодарском крае // Природообустройство. 2025. № 3. С. 21-29. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-21-29>

Original article

ASPECTS OF OPTIMIZATION OF FACTORS AFFECTING RICE PRODUCTIVITY IN THE KRASNODAR TERRITORY

S.D. Isaeva, E.L. Ratkovich ✉

N. Kostyakov Federal State Budgetary Scientific Research Center VNIIGiM, 44 Bolshaya Akademicheskaya str., room 2, Moscow, 127434, Russia

Abstract. The standard technology of irrigation of rice paddies by flooding is the most water-intensive. The economic efficiency of land reclamation projects can be calculated only on the basis of a multifactorial analysis of the impact of irrigation and economic factors in rice cultivation on its productivity. The object of research was a section of the Petrovsko-Anastasievskaya irrigation system in the Krasnodar Territory. The rice variety, the method of sowing, the depth of seed embedding, and the irrigation regime were selected as the variables. Crop rotation, fertilization, the role of irrigation regime in different phases of rice plant development, and a number of other factors were not considered at this stage of the research. The purpose of the research was to develop a methodology for calculating the optimal irrigation rate, which ensures the greatest economic effect from rice cultivation, considering the rice paddy fields flooding regime, varietal characteristics of the crop and the method of sowing in the Krasnodar Territory. To solve this problem, an Excel version of the software module was developed, which allows determining the irrigation rate and a set of the above-mentioned factors leading to the most cost-effective solution and appropriate design recommendations. The Pearson curve of type I with parameters selected based on field and laboratory research materials was adopted as the basic

dependence of yield on irrigation rate. In the simulation mode, three operating factors are considered: the irrigation regime; the method of sowing rice, and the rice variety. The minimum set of scenarios left for modeling the situation was 18 variants, which led in the considered example to an irrigation rate of about 20 thousand m³/ha under conditions of combined irrigation of medium-ripened rice varieties. The direction of further research is related to the substantiation of basic dependence of yield on irrigation rate, the expansion of the number of influencing factors and the refinement of single cost indicators.

Keywords: multifactorial analysis, irrigation of rice paddies fields by flooding, Pearson curve type I, combined irrigation, irrigation rate, rice variety, sowing method

Format of citation: Isaeva S.D., Ratkovich E.L. Aspects of optimization of factors affecting rice productivity in the Krasnodar Territory // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 21-29. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-21-29>

Введение. Возделывание риса требует наибольшего среди сельскохозяйственных культур объема водных ресурсов для орошения при стандартной технологии полива затоплением. Экономическая целесообразность эксплуатации оросительных систем определяется совокупностью затрат на реализацию агротехнологических приемов, орошения и других мелиоративно-хозяйственных мероприятий и, соответственно, дополнительным доходом благодаря их проведению.

Более 80% производства риса в России приходится на Краснодарский край, где были проведены исследования. Средняя урожайность риса в России в производственных условиях оценивается в 50-60 ц/га, но в ряде стран может превышать 100 ц/га, как в Австралии и в Египте [1].

Проведенные исследования направлены на анализ влияния ирригационно-хозяйственных факторов (прежде всего орошения) на продуктивность риса при его возделывании. Практическое приложение исследований – это совершенствование проектных решений для повышения урожайности культуры с учетом особенностей системы. Объектом исследований является участок Петровско-Анастасиевской оросительной системы (ПАОС) в Краснодарском крае (рис. 1). В качестве факторов влияния на урожайность выбраны режим орошения, способ посева, сорт риса, глубина заделки семян. Для упрощения постановки цели и решения задач на первом этапе исследований выполнена определенная схематизация, при которой вне рассмотрения оставлены такие действующие факторы, как соблюдение севооборота, внесение удобрений, относительное снижение урожайности во второй год эксплуатации чека, роль режима поливов в разные фазы развития растений риса.

Цель исследований: разработка методики расчета оптимальной оросительной нормы, обеспечивающей наибольший экономический эффект возделывания риса, с учетом сортовых особенностей культуры и способа посева в условиях Краснодарского края.

Для достижения цели и решения задач была разработана предварительная версия программного модуля в среде Excel, позволяющая получать необходимые величины оросительной нормы при разных хозяйственных факторах, определяющих проектные рекомендации.

Материалы и методы исследований.

Величина оросительной нормы является одним из основных факторов урожайности и подлежит оптимизации. В общем случае величина оросительной нормы рассчитывается исходя из дефицита водного баланса сельскохозяйственных культур с учетом региональных особенностей объекта и вида культуры [2]. В разных источниках при математическом описании зависимости урожайности от нормы орошения применяются различные методические приемы. В предлагаемой методике в качестве базовой зависимости урожайности от оросительной нормы $Y = f(M)$ принята кривая Пирсона I-го типа с параметрами, подбираемыми на основании материалов полевых и лабораторных исследований. В данном случае для подбора параметров функций урожайности использовались материалы обоснования рациональных режимов водоподачи на рисовых системах Нижней Кубани [3, 4].

Многолетние исследования ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова» показали, что в Краснодарском крае основными при посеве риса являются разбросной, рядовой, перекрестный и перекрестно-диагональный способы. Указанные способы также могут быть дифференцированы по глубине заделки семян. Нужно отметить, что приводимые в различных публикациях абсолютные цифры урожайности в зависимости от оросительной нормы существенно разнятся. В связи с этим для моделирования выполнен анализ не абсолютных значений урожайности, а соотношение их величин при разных способах посева. Например, по Краснодарскому краю соотношение урожайности при перекрестном, рядовом и разбросном способах посева можно примерно представить как 0,8:0,9:1,00 соответственно, что подлежит уточнению с учетом

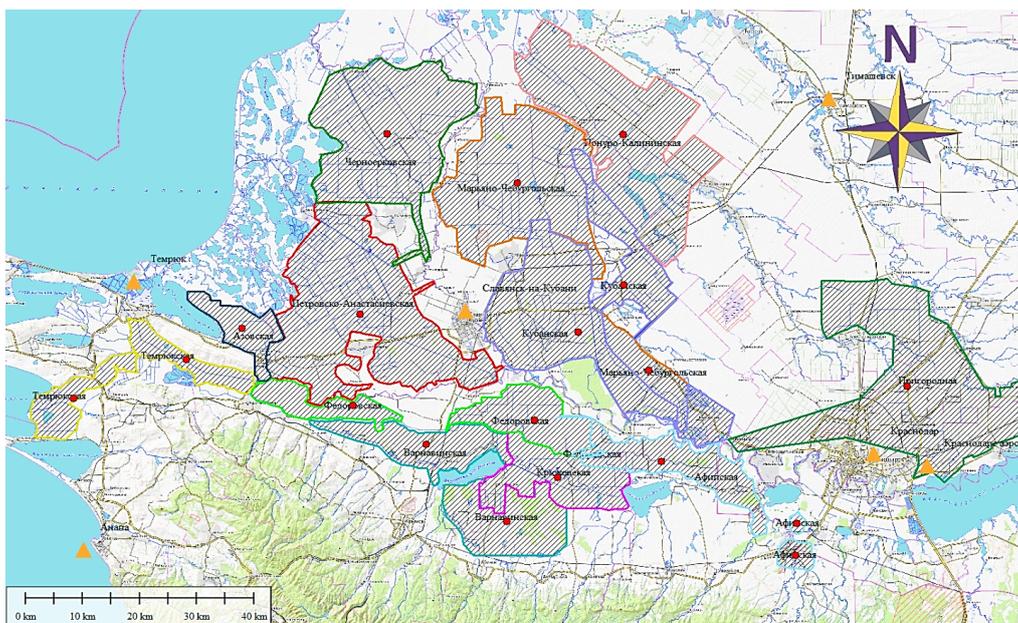


Рис. 1. Местоположение Петровско-Анастасиевской оросительной системы

Fig1. Location of the Petrovsko-Anastasievskaya irrigation system

сложившейся практики рисосеяния. Фактически в регионе применяются главным образом разбросной и рядовой способы [5].

Важным фактором урожайности в конкретных природно-хозяйственных условиях является сорт риса. В то же время многообразие сортов затрудняет объективную оценку предпочтений без дополнительных исследований с учетом природно-климатических и хозяйственных условий региона. Поэтому соотношение урожайности в зависимости от сортовой принадлежности принято в работе в упрощенной форме по двум сортовым группам риса: среднеспелой (занимает в посевах более 75%) и среднепозднеспелой. Роль группы риса в формировании урожайности неодинаково проявляется в многообразных агроэкологических условиях. При выборе сортов и определении их оптимального соотношения в структуре севооборота необходимо учитывать в первую очередь конкретные условия возделывания культуры.

Достаточно объективный подход с точки зрения многофакторного анализа урожайности представлен в работе [6]. По аналогии с предложенным в ней подходом рассмотрены три действующих фактора: режим орошения (постоянное затопление, укороченный режим затопления и комбинированное орошение); способ посева риса (разбросной, рядовой, перекрестный), сорт риса (среднеспелый и среднепозднеспелый).

В модели не учитывается такой важный фактор, как структура севооборота, поскольку ее обоснование является отдельной задачей со своими особенностями. Предлагаемая методика соответствует возделыванию монокультуры, однако

в процессе дальнейших исследований предполагается внесение дополнительных методических изменений в решения, связанные с рассмотрением рисового севооборота.

Минимальный набор сценариев, оставленных нами для моделирования ситуации, составил 18 вариантов. Число вариантов, закладываемых в модель, в дальнейшем будет увеличиваться по мере накопления материалов для количественной оценки роли факторов в формировании урожайности.

Моделирование функции урожайности риса в зависимости от оросительной нормы. Установлено, что кривая урожайности, или, в относительных координатах, кривая продуктивности, по форме соответствует функции плотности распределения вероятностей – таких, как β - и γ -распределения. Оба распределения принадлежат семейству кривых Пирсона, I и III типов соответственно. Решение с применением кривой Пирсона I типа для этих целей в свое время было реализовано В.В. Шабановым [7] как достаточно хорошо соответствующее теоретической гипотезе и экспериментальным данным. Мода распределения соответствует оптимальной оросительной норме, значение которой смещается с изменением режима орошения. Принимая данный методический прием за основу, вводим в функцию относительной продуктивности риса описанные выше пропорции по урожайности в зависимости от способа полива, и сокращаем нормы при переходе от комбинированного орошения (с наибольшей ординатой оптимума) к укороченному режиму и постоянному затоплению. Подбор параметров

функции распределения и масштабных коэффициентов определил начальные искомые зависимости, которые скорректированы с помощью коэффициентов, отражающих режим орошения, величину оросительной нормы и способ посева (табл. 1, 2, рис. 2). Параметры функций, как уже отмечено, подобраны по материалам проекта Петровско-Анастасиевской оросительной системы (ПАОС), в котором авторы принимали участие в смежных исследованиях по разработке гидродинамической модели объекта [8].

Разумеется, анализируемые зависимости подлежат уточнению для конкретного проекта, но такого рода исследования выходят за рамки статьи. В то же время уточнение параметров функции урожайности в зависимости от действующих факторов предусмотрено в модели расчета по мере накопления материала.

Расчетные формулы, заложенные в программном модуле, приводятся ниже:

Y – потенциальная урожайность, т/га;

Y_{\max} – максимальная урожайность в зависимости от режима затопления, т/га;

$$S(m) = \frac{1}{I(\alpha, \beta)} \cdot m^{\alpha-1} \cdot (1-m)^{\beta-1}; \quad (1)$$

$$I(\alpha, \beta) = \int_0^1 m^{\alpha-1} \cdot (1-m)^{\beta-1} dm; \quad (2)$$

$m = \frac{M}{M_{\max}}$ – относительная оросительная норма в долях максимальной теоретической нормы орошения; $S(m) = \frac{Y}{Y_{\max}}$ –

относительная продуктивность $\rightarrow Y = S(m) \cdot Y_{\max}$; α, β – формальные параметры бета-функции, подобранные для условий Петровско-Анастасиевской оросительной системы.

Различие в показателях продуктивности для разных сценариев достигается заданием соответствующих коэффициентов, определенных таблицами 1, 2 и графиками рисунка 2. Функции, указанные в формулах (1) и (2), рассчитываются с помощью встроенного в Excel набора статистических функций.

Модель выбора оптимального сценария возделывания риса в зависимости от совокупности влияющих факторов. Очевидно, что выбор наиболее выигрышного варианта невозможен без установленной системы критериев. Применение многокритериальной оптимизации на данном этапе сочли нецелесообразным в силу недостаточной информационной базы. Поэтому в качестве единственного критерия (функционала целевой функции) использован максимум ежегодного чистого дохода (ЕЧД). Учет дисконтирования ЕЧД в данном случае не влияет на результат решения. Удельные финансово-экономические стоимостные показатели приняты с ориентацией на работы [9-11]. Отметим, что для предлагаемой нами методики абсолютные цифры данных являются непринципиальными, поскольку их замена в программном модуле не представляет труда. Ниже приводятся расчетные формулы для оценки экономической эффективности по значению ЕЧД:

$$ЕЧД = CP - EZ, \text{ руб.}; \quad (3)$$

CP – стоимость урожая за вычетом затрат на реализацию риса, руб.; EZ – ежегодные затраты, руб.;

$$CP = Y \cdot F_{\text{оп}} \cdot t_r, \text{ руб.}; \quad (4)$$

Y – фактическая урожайность, т/га; $F_{\text{оп}}$ – площадь орошаемых земель, га; t_r – рыночная стоимость риса, руб/т;

Таблица 1. Параметры функций урожайности риса (Y) в зависимости от режима орошения и оросительной нормы (M) по вариантам сценариев

Table 1. Parameters of rice yield functions (Y) depending on irrigation regime and irrigation rate (M) according to scenario options

Краевые значения урожайности Y и оросительной нормы M <i>Marginal yield Y and irrigation rate values</i>		Параметры кривой Пирсона I типа <i>the Pearson curve parameters of type I</i>		Комбинированный режим <i>combined mode</i>	Укороченный режим <i>shortened mode</i>	Постоянное затопление <i>permanent flooding</i>
Y_{\min} / Y_{\min}	4,00	т/га / t / ha	A	6,000	2,500	1,585
Y_{\max} / Y_{\max}	12,00	т/га / t / ha	B	2,250	1,500	1,250
M_{\min} / M_{\min}	10,00	тыс. м ³ /га <i>ths m³ / ha</i>	μ – мода распределения <i>μ – distribution mode</i>	0,800	0,750	0,701
M_{\max} / M_{\max}	25,00	тыс. м ³ /га <i>ths m³ / ha</i>				
$M_{\text{опт-комб}} / M_{\text{opt-comb}}$	20,00	тыс. м ³ /га <i>ths m³ / ha</i>	соотношение урожайностей <i>yield ratio</i>	1,000	0,817	0,500
$M_{\text{опт-укор}} / M_{\text{opt-short.}}$	18,75	тыс. м ³ /га <i>ths m³ / ha</i>				

Таблица 2. Расчетные координаты функций относительной урожайности S ($S = Y/Y_{\max}$) и урожайности Y риса в зависимости от режима орошения и оросительных норм

Table 2. Calculated coordinates of the relative productivity functions S ($S = Y/Y_{\max}$) and yield Y of rice paddies depending on irrigation regime and irrigation rate

Совмещенные кривые относительной продуктивности риса (S) при различных режимах орошения <i>Combined curves of the relative rice productivity (S) under different modes of irrigation</i>				Совмещенные кривые урожайности риса Y (ц/га) в зависимости от оросительной нормы (тыс. м ³ /га) при различных режимах орошения <i>Combined curves of the rice yield Y (c/ha) depending on the irrigation rate (thousand m³/ha) under different modes of irrigation</i>			
$m = M/M_{\max}$	$S_{\text{комб}}$	$S_{\text{част}}$	$S_{\text{пост}}$	M	$Y_{\text{комб}}$	$Y_{\text{част}}$	$Y_{\text{пост}}$
0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,050	0,000	0,027	0,142	1,25	0,00	3,29	17,09
0,100	0,000	0,075	0,211	2,50	0,02	9,06	25,30
0,150	0,001	0,135	0,263	3,75	0,17	16,17	31,61
0,200	0,006	0,201	0,307	5,00	0,66	24,15	36,84
0,250	0,016	0,272	0,344	6,25	1,87	32,68	41,31
0,300	0,036	0,346	0,376	7,50	4,26	41,50	45,17
0,350	0,070	0,420	0,404	8,75	8,39	50,40	48,53
0,400	0,123	0,493	0,429	10,00	14,81	59,16	51,43
0,450	0,199	0,563	0,449	11,25	23,93	67,58	53,91
0,500	0,300	0,629	0,467	12,50	35,98	75,47	55,99
0,550	0,423	0,688	0,481	13,75	50,79	82,60	57,66
0,600	0,564	0,739	0,491	15,00	67,73	88,74	58,91
0,700	0,851	0,807	0,500	17,50	102,17	96,84	60,00
0,750	0,957	0,817	0,497	18,75	114,86	98,04	59,69
0,800	1,000	0,805	0,489	20,00	120,00	96,60	58,62
0,850	0,945	0,764	0,471	21,25	113,41	91,63	56,52
0,900	0,758	0,679	0,440	22,50	90,92	81,51	52,81
0,950	0,417	0,521	0,382	23,75	50,09	62,50	45,84
0,999	0,004	0,079	0,148	24,98	0,48	9,53	17,75

$$EZ = CB + СП; \quad (5)$$

$$CB = t_w \cdot M \cdot F_{op}; \quad СП = t_{noc} \cdot n_{выс} \cdot F_{op}$$

CB – стоимость водоподачи, руб.; t_w – стоимость подачи одного кубометра, руб/м³; $СП$ – стоимость посева, руб.; t_{noc} – стоимость посева с учетом стоимости семян, руб/т; $n_{выс}$ – норма высева, т/га.

Формулируем задачу оптимизации в общей постановке: найти оптимальные значения переменных M, i, j, k , при которых ежегодный чистый доход ($EЧД$), зависящий от урожайности Y , достигает максимума.

Константы:

$$F_{op}, t_p, t_w, t_{noc}, n_{выс}.$$

Управляемые (варьируемые) переменные: M – непрерывная переменная (оросительная норма); $M_{\min} \leq M \leq M_{\max}$; i, j, k – дискретные целочисленные переменные, набор которых определяет свою функцию урожайности; $i \in \{1, 2, 3\}$ – индекс режима орошения; $j \in \{1, 2, 3\}$ – индекс способа посева; $k \in \{1, 2\}$ – индекс сорта

Целевая функция (функционал):

$$EЧД = f(Y(i, j, k, M)) \rightarrow \max.$$

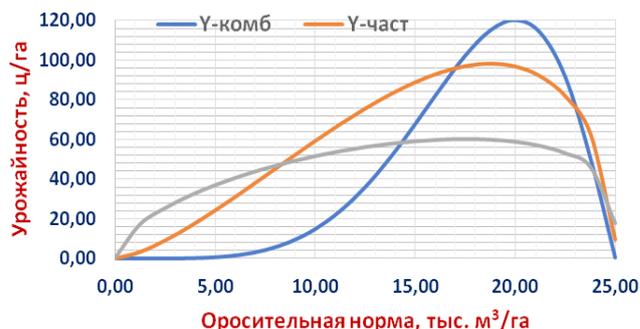


Рис. 2. Кривые урожайности риса на Петровско-Анастасиевской оросительной системе

Fig. 2. Curves of rice yields on the Petrovsko-Anastasievskaya irrigation system

Алгоритм модели сводится к вычислению максимального ежегодного чистого дохода для каждого из 18 рассмотренных сценариев с определением глобального оптимума и построением зависимости максимального $EЧД$ от оросительной нормы M . В условиях дефицита водных ресурсов возможны компромиссные решения, не являющиеся самыми экономически выигрышными.

Решением задачи являются: режим орошения; значение оросительной нормы; способ посева; группа сортов риса.

Результаты моделирования представлены в таблице 3.

Стоимостные показатели во многом условны, поскольку их значения будут уточняться вместе с расширением перечня факторов влияния.

В работе выполнен цикл расчетов в имитационном режиме поиска варианта с максимальной величиной ЕЧД. Оптимизация осуществляется методом «обобщенного понижающего градиента» для гладких нелинейных задач посредством процедуры поиска решения «Solver».



Рис. 3. Анализирующая кривая – функция ЕЧД = f (M)

Fig. 3. Analysis curve – EFR function = f (M)

Таблица 3. Параметры модельного расчета

Table 3. Model calculation parameters

Показатели Indicators	Режим орошения / Irrigation regime		
	Комбинированный режим (i = 1) Combined mode (i = 1)	Укороченный режим (i = 2) Shortened mode (i = 2)	Постоянное затопление (i = 3) Permanent flooding (i = 3)
Орошаемая площадь участка исследований ПАОС, га Irrigated area of the PAOS study site, ha	135	135	135
Максимальные значения урожайности, тыс. м ³ /га Maximum yield values, thousand m ³ /ha	12,000	9,804	6,000
Коэффициенты сокращения максимальной урожайности при разных режимах орошения Coefficients of maximum yield reduction under different regimes of irrigation	1,000	0,817	0,500
Коэффициенты сокращения урожайности в зависимости от способа посева Coefficients of yield reduction depending on the sowing method	Способы посева / Methods of sowing		
	Разбросной broadcast	Рядовой drill	Перекрестный cross
	1,00	0,90	0,80
Стоимость водоподачи, установленная на 2025 год, руб. /м ³ , Cost of water supply established for 2025, rubles / m ³	3,05	3,05	3,05
Коэффициенты сокращения урожайности в зависимости от сорта риса Coefficients of yield reduction depending on the rice variety	Сорта семян / Varieties of seeds		
	Среднепозднеспелый Mid ripening	среднепозднеспелый late ripening	
	1,00	0,75	
Норма высева, т/га / Sowing rate, kg / ha	0,240	0,240	0,240
Стоимость посева, включая стоимость семян – тыс. руб/т (принято условно) Cost of sowing, including cost of seeds – thousand rubles / t (accepted conditionally)	50,0	60,0	80,0
Задаваемая оросительная норма (при посеве с заделкой семян) до моделирования, м ³ /га The defined irrigation rate (under sowing with seeds embedding) up to modeling, m ³ /ha	10 000		
Рыночная стоимость риса, тыс. руб/т Selling price of rice, thousand rubles / t	90		
Стоимость реализации продукции в % от цены (принята условно) Cost of sales of produce in % from the price	20		
Оптимальная оросительная норма (результат моделирования), м ³ /га Optimal irrigation rate (result of modeling), m ³ /ha	19389		

По результатам расчетов построена анализирующая зависимость (рис. 3).

Как следует из данных таблицы 3 и рисунка 3, оптимальный вариант соответствует оросительной норме 19390 м³/га, при котором

получена урожайность 11,87 т/га в случае комбинированного орошения с перекрестным способом посева среднеспелых сортов риса. Расчетный листинг программного модуля представлен в таблице 4.

Таблица 4. Расчетный листинг модели

Table 4. Model calculation listing

№ сценария	Режим орошения	Максимальная урожайность, т/га	Способ посева	Урожайность с учетом способа посева, т/га	Сорт риса	Урожайность с учетом сорта, т/га	Стоимость водоподачи на 1 га, тыс. руб.	Стоимость посева, тыс. руб/га	Итого ежегодные затраты, тыс. руб	Цена урожая Д, тыс. руб	Чистый доход, тыс. руб.	ЕЧД, тыс. руб. с 1 га	ЕЧД, млн руб.
1	Постоянное затоплен	5,870	Разбросной	5,870	Среднеспелый	5,870	60,83	12,000	72,826	528,305	422,644	349,818	47,23
2			Разбросной	5,870	Среднепозднесп.	4,403	60,83	12,000	72,826	396,229	316,983	244,157	32,96
3			Рядовой	5,283	Среднеспелый	5,283	60,83	12,000	72,826	475,474	380,379	307,553	41,52
4			Рядовой	5,283	Среднепозднесп.	3,962	60,83	12,000	72,826	356,606	285,285	212,458	28,68
5			Перекрестный	4,696	Среднеспелый	4,696	60,83	12,000	72,826	422,644	338,115	265,289	35,81
6			Перекрестный	4,696	Среднепозднесп.	3,522	60,83	12,000	72,826	316,983	253,586	180,760	24,40
7	Укороченный режим	9,674	Разбросной	9,674	Среднеспелый	9,674	60,83	12,000	72,826	870,627	696,502	623,676	84,20
8			Разбросной	9,674	Среднепозднесп.	7,255	60,83	12,000	72,826	652,970	522,376	449,550	60,69
9			Рядовой	8,706	Среднеспелый	8,706	60,83	12,000	72,826	783,565	626,852	554,025	74,79
10			Рядовой	8,706	Среднепозднесп.	6,530	60,83	12,000	72,826	587,673	470,139	397,312	53,64
11			Перекрестный	7,739	Среднеспелый	7,739	60,83	12,000	72,826	696,502	557,201	484,375	65,39
12			Перекрестный	7,739	Среднепозднесп.	5,804	60,83	12,000	72,826	522,376	417,901	345,075	46,59
13	Комбинированное орош	11,999	Разбросной	11,999	Среднеспелый	11,999	60,83	12,000	72,826	1079,952	863,962	791,135	106,80
14			Разбросной	11,999	Среднепозднесп.	9,000	60,83	12,000	72,826	809,964	647,971	575,145	77,64
15			Рядовой	10,800	Среднеспелый	10,800	60,83	12,000	72,826	971,957	777,566	704,739	95,14
16			Рядовой	10,800	Среднепозднесп.	8,100	60,83	12,000	72,826	728,968	583,174	510,348	68,90
17			Перекрестный	9,600	Среднеспелый	9,600	60,83	12,000	72,826	863,962	691,169	618,343	83,48
18			Перекрестный	9,600	Среднепозднеспелый	7,200	60,83	12,000	72,826	647,971	518,377	445,551	60,15

Результаты и их обсуждение. Повышение урожайности сельскохозяйственных культур наряду с экономией водных ресурсов неизменно является актуальной проблемой мелиорации. Для орошаемого земледелия решение задачи связано с одновременным учетом множества факторов, влияющих на эффективность проектирования и эксплуатации различных оросительных систем, в том числе искусственно затапливаемых рисовых чеков. Увеличение оросительных норм до определенных значений способствует повышению продуктивности, но характер зависимости обусловлен влиянием режима орошения, способа посева, сортом риса, агротехническими приемами возделывания, особенностями регионального агроменеджмента.

В работе предпринята попытка одновременного учета ряда факторов с выходом на наиболее оптимальный сценарий. В дальнейшем планируется расширить перечень факторов влияния и уточнить характер предложенных функций продуктивности риса. Затронутые в статье вопросы являются, на наш взгляд,

предметом научной дискуссии и в определенном смысле вписываются в стратегию «точного земледелия».

Выводы

Функции продуктивности риса достаточно хорошо аппроксимируются кривыми Пирсона I-го типа, что способствует оптимизации оросительной нормы с учетом нескольких факторов влияния, таких, как режим орошения, способы посева, сорт риса.

На основании имитационного моделирования для условий ПАОС в Краснодарском крае наиболее оптимальным решением, исходя из полученной величины ЕЧД, оказалась технология возделывания риса, предусматривающая:

- комбинированный режим орошения;
- оросительную норму $M = 20$ тыс. m^3 /га;
- разбросной способ посева семян;
- использование среднеспелых сортов риса.

Направление дальнейших исследований связано с обоснованием функций продуктивности, расширением числа факторов влияния и уточнением удельных технико-экономических показателей.

Список использованных источников

1. Барсукова Г.Н. Анализ отечественного и зарубежного опыта развития рисоводства / Г.Н. Барсукова, М.Д. Говердовская // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2022. № 4. DOI: 10.55186/02357801_2022_7_4_3. EDN: VYMPMPJ
2. Балакай Г.Т. К вопросу разработки норм водопотребности риса и водоотведения с рисовых оросительных систем. / Г.Т. Балакай, Л.М. Докучаева, Р.Е. Юркова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2018. № 3(31), С. 1-22. DOI: 10.31774/2222-1816-2018-3-1-22 EDN: XWARKP
3. Исаева С.Д. Научно обоснованные рекомендации по совершенствованию управления водопользованием в сельском хозяйстве в бассейнах рек Нижней Волги и Кубани в условиях дефицита водных ресурсов на основе использования современных информационно-аналитических и цифровых технологий / С.Д. Исаева, Э.Б. Дедова, А.Л. Бубер // Научно-технические достижения и разработки ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова» (2016-2021 гг.): Сборник научных трудов. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2021. С. 67-69. EDN: MSMHBQ
4. Раткович Е.Л. Теоретические подходы к оптимизации водопользования на рисовых оросительных системах Нижней Кубани / Е.Л. Раткович, Ю.П. Добрачев, А.А. Бубер // Орошаемое земледелие. 2022. № 2(37). С. 18-22. DOI: 10.35809/2618-8279-2022-2-2. EDN: GHNHRG
5. Ладатко В.А. Влияние способов заделки рисовой соломы на урожайность риса / В.А. Ладатко, М.А. Ладатко // Рисоводство. 2019. № 1(42). С. 32-36. EDN: MHENXS
6. Тараненко В.В. Жизнеспособность и урожайность семян риса при разных способах посева и режимах орошения в условиях экологически безопасной технологии: специальность 06.01.05 «Селекция и семеноводство

References

1. Barsukova G.N., Goverdovskaya M.D. Analysis of domestic and foreign experience of rice growing development / G.N. Barsukova, M.D. Goverdovskaya // International Journal of Applied Sciences and Technologies Integral. 2022. No. 4. DOI: 10.55186/02357801_2022_7_4_3. EDN: VYMPMPJ
2. Balakay G.T. On the issue of developing norms for water demand for rice and water disposal from rice irrigation systems. / G.T. Balakay, L.M. Dokuchaeva, R.E. Yurkova // Russian Research Institute for Land Reclamation Problems, Novocherkassk, Russian Federation, Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems No. 3(31), 2018, P. 1-22. DOI: 10.31774/2222-1816-2018-3-1-22 EDN: XWARKP
3. Isaeva S.D. Scientifically based recommendations for improving water use management in agriculture in the Lower Volga and Kuban River basins in the context of water resources deficit based on the use of modern information, analytical and digital technologies / S.D. Isaeva, E.B. Dedova, A.L. Buber // Scientific and technical achievements and developments of the Federal State Budgetary Scientific Institution "VNIIGiM named after A.N. Kostyakov" (2016-2021): Collection of Scientific Works. Moscow: All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 2021. P. 67-69. EDN: MSMHBQ
4. Ratkovich E.L. Theoretical approaches to optimization of water use on rice irrigation systems of the Lower Kuban / E.L. Ratkovich Yu.P. Dobrachev, A.A. Buber // Irrigated agriculture. 2022. № 2(37). P. 18-22. DOI: 10.35809/2618-8279-2022-2-2. EDN: GHNHRG
5. Ladatko V.A. The influence of rice straw incorporation methods on rice yield / V.A. Ladatko, M.A. Ladatko // Rice growing. 2019. No. 1(42). P. 32-36. EDN: MHENXS
6. Taranenko V.V. Viability and yield of rice seeds under different methods of sowing and irrigation regimes

сельскохозяйственных растений»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Тараненко Виктор Владимирович. – Краснодар, 2003. 24 с. EDN: NHKRKH

7. Шабанов Виталий Владимирович. Обоснование потребности в мелиорациях [Текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Моск. гидромелиорат. ин-т. М.: [б. и.], 1969. 19 с.

8. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023622929. Цифровая информационная основа гидродинамической модели участка оросительной системы («ИП Фоменко», Краснодарский край): № 2023622694; заявл. 11.08.2023 / Е.Л. Раткович, А.А. Бубер, Ф.А. Каракулов, С.А. Филиппов; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова» (ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»). EDN: EAOVAC

9. Манжина С.А. Современные подходы к определению экономически обоснованной стоимости подачи воды на орошение / С.А. Манжина, Л.Н. Медведева // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2018. № 3(31). С. 148-170. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=556&id=566>. DOI: 10.31774/2222-1816-2018-3-148-170.

10. Полутина Т.Н. Ключевые тенденции и перспективы развития рисоводства в Краснодарском крае / Т.Н. Полутина, С.Ю. Губиева // Продовольственная безопасность: проблемы и пути решения: Сборник статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции, Краснодар, 03-05 июня 2021 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. С. 155-161. EDN: KPFEUU

11. Мальшева Н.Н. Экономические аспекты производства риса на мелиоративных системах Краснодарского края / Н.Н. Мальшева, С.В. Кизинек // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2020. № 1(37). С. 200-216. DOI: 10.31774/2222-1816-2020-1-200-216. EDN: OINPUH

Об авторах

Исаева София Давидовна, д-р техн. наук, зав. отделом экосистемного водопользования и экономики; <http://orcid.org/0000-0001-9640-2191>; Scopus Author ID: 57193422572; SPIN-код: 3272-6924, AuthorID: 332517; isaeva7sofia@yandex.ru

Раткович Евгений Львович, соискатель, научный сотрудник отдела мелиоративно-водохозяйственного комплекса; <https://orcid.org/0000-0001-9408-760X>; Scopus Author ID: 57363124800; SPIN-код: 8356-6904, AuthorID: 1037469; evgeniirat@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Исаева С.Д., Раткович Е.Л. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are 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 at the editorial office 06.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review 12.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 12.05.2025

in the conditions of ecologically safe technology: speciality 06.01.05 “Selection and seed production of agricultural plants”: abstract of the dissertation for the degree of candidate of agricultural sciences / Taranenko Viktor Vladimirovich. – Краснодар, 2003. 24 p. EDN: NHKRKH

7. Shabanov Vitaly Vladimirovich. Substantiation of the need for land reclamation [Text]: Abstract of diss. for the scientific degree of doctor of technical sciences / Moscow. Hydromeliorative Institute, Moscow, 1969. 19 p.

8. Certificate of State Registration of the Database No 2023622929. Digital Information Basis of the Hydrodynamic Model of the Irrigation System Section (“IP Fomenko”, Краснодар Territory): No 2023622694: application. 11.08.2023 / E.L. Ratkovich, A.A. Buber, F.A. Karakulov, S.A. Filippov; applicant: Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov” (FSBI “VNIIGiM named after A.N. Kostyakov”). EDN: EAOVAC

9. Manzhina S.A. Modern approaches to determining the economically justified cost of water supply for irrigation / S.A. Manzhina, L.N. Medvedeva. Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2018. № 3(31). P. 148-170. Available at: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=556&id=566>. DOI: 10.31774/2222-1816-2018-3-148-170.

10. Polutina T.N., Gubieva S.Y. Key trends and prospects for the development of rice growing in the Краснодар region / T.N. Polutina S.Yu. Gubieva // Food Security: Problems and Ways of Solution: Collection of Articles on the Materials of the XVI International Scientific and Practical Conference, Краснодар, June 03-05, 2021. Краснодар: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 2021. Pp. 155-161. EDN: KPFEUU

11. Malysheva N.N. Economic aspects of rice production on reclamation systems of the Краснодар region / N.N. Malysheva, S.V. Kizinek. Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2020. № 1(37). P. 200-216. DOI: 10.31774/2222-1816-2020-1-200-216. EDN: OINPUH

About the authors

Sofiya D. Isaeva, DSc (Eng), head of the department of eco system water use and economics; <http://orcid.org/0000-0001-9640-2191>; Scopus Author ID: 57193422572; SPIN-code: 3272-6924, Author ID: 332517; isaeva7sofia@yandex.ru

Evgeniy L. Ratkovich, applicant, researcher at the Department of Melioration and Water Management Complex; <https://orcid.org/0000-0001-9408-760X>; Scopus Author ID: 57363124800; SPIN-code: 8356-6904, AuthorID: 1037469; evgeniirat@mail.ru

Isaeva S.D., Ratkovich E.L. carried out practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-30-37>

УДК 631.234:697



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В КУЛЬТИВАЦИОННОМ СООРУЖЕНИИ ПОСЛЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

М.В. Павлов¹, Д.Ф. Карпов¹, Л.В. Храпонова²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; 3195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б, Россия

Аннотация. Создание благоприятных климатических условий для выращивания растений в культивационном сооружении напрямую связано со стабильной работой системы отопления, особенно в зимний период года. Цель исследований – предупредить гибель растений в защищенном грунте в случае аварийного отключения системы отопления. В работе предложен способ определения температуры внутреннего воздуха как основного параметра микроклимата помещения после полного прекращения подачи тепловой энергии и последующего остывания системы теплообеспечения. Метод расчета основан на уравнении теплового баланса помещения, широко используемом при проектировании систем отопления, и законе регулярного теплового режима первого рода, суть которого заключается в том, что понижение температуры во всех точках системы в ходе ее остывания происходит одинаково, подчиняясь экспоненциальному закону (для условий конвективного теплообмена $Bi \ll 1$). Реализация предложенного способа выполнена на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» (Российская Федерация), предназначенной для круглогодичного выращивания растений. Установлено, что после аварийного отключения системы отопления температура внутреннего воздуха (начальное значение – 22°C) достигнет условно критического значения 8°C через приблизительный интервал времени 1 ч 15 мин. Влияние величины тепловых потерь на продолжительность падения температуры воздуха в помещении до критического значения незначительно (в среднем увеличивается на 0,2 ч на каждые 0,1 м² · К/Вт термического сопротивления ограждения). Уменьшение тепловых потерь приведет к закономерному снижению начальной тепловой мощности системы отопления (до ее отключения) с целью поддержания требуемой температуры внутреннего воздуха, и как следствие – к сокращению количества тепловой энергии, которую она передаст помещению в течение остывания.

Ключевые слова: культивационное сооружение, система отопления, регулярный тепловой режим, температура внутреннего воздуха, тепловой баланс помещения

Формат цитирования: Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Храпонова Л.В. Прогнозирование температуры воздуха в культивационном сооружении после отключения системы отопления // Природообустройство. 2025. № 3. С. 30-37. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-30-37>

Original article

AIR TEMPERATURE PREDICTION IN A CULTIVATION FACILITY AFTER HEATING SYSTEM SHUTDOWN

M.V. Pavlov¹, D.F. Karpov¹, L.V. Khraponova²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State University”, 15 Lenin St., 160000, Vologda, Russia

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University”, 29 Letter B Polytechnique St., 3195251, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Creating favorable climatic conditions for plant cultivation in a controlled environment structure is directly linked to the stable operation of the heating system, particularly during the winter period. The objective of this study is to prevent plant loss in protected cultivation systems in the event of an emergency heating system shutdown. This paper proposes a method for determining indoor air temperature, which is considered a key microclimatic parameter, following the complete cessation of heat supply and subsequent cooling of the heating system. The calculation method is based on the thermal balance equation of the structure, which is widely applied in the design of heating systems, and

on the law of the first kind of regular thermal regime. The essence of this law lies in the assumption that the temperature in all parts of the system decreases uniformly during cooling, following an exponential decay law (for conditions of convective heat exchange $Bi \ll 1$). The implementation of the proposed method is carried out on the example of an industrial greenhouse "Farmer 7.5" (Russian Federation), designed for year-round plant cultivation. It has been established that after an emergency shutdown of the heating system, the internal air temperature (initial value 22°C) will reach a conditionally critical value of 8°C after an approximate time interval of 1 hour and 15 minutes. The effect of the magnitude of heat losses on the duration of the drop in indoor air temperature to a critical value is insignificant (on average, it increases by 0.2 hours for every $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ of thermal resistance of the fence). Reducing heat loss will lead to a natural reduction in the initial thermal power of the heating system (before it is switched off) in order to maintain the required indoor air temperature and, as a consequence, to a reduction in the amount of thermal energy that it transfers to the room during cooling.

Keywords: cultivation facility, heating system, regular thermal regime, indoor air temperature, thermal balance of the structure

Format of citation: Pavlov M.V., Karpov D.F., Khraponova L.V. Air temperature prediction in a cultivation facility after heating system shutdown // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 30-37. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-30-37>

Введение. Бесперебойная работа системы отопления в теплицах, оранжереях и прочих культивационных сооружениях является основополагающим фактором для благоприятного роста и развития растений [1, 2]. Оптимальные климатические условия наряду с необходимым уровнем освещенности [3, 4] не только защищают растения от возможной гибели, но и влияют на качество, количество и время получения урожая [5, 6]. Поддержание требуемой температуры воздуха внутри обогреваемого помещения как основного параметра микроклимата возможно только при соблюдении равенства входящих и выходящих тепловых потоков [7]. Источником теплопоступлений служит не только система отопления, но и солнечная длинноволновая радиация [8], тепловые избытки от людей (рабочего персонала), электрооборудования, нагретой почвы и растений (при испарении влаги с поверхности наружных органов растений осуществляется перенос не только массы, но и тепловой энергии). К основным тепловым потерям можно отнести теплообмен помещения с наружным воздухом через ограждения культивационного сооружения включая грунт и потери тепловой энергии вместе с нагретым вентиляционным воздухом, удаляемым в окружающую среду.

Тепловой режим зданий и сооружений после отключения системы отопления подробно изучен заслуженными советскими учеными В.Н. Богословским [9] и Е.Я. Соколовым [10]. Ими получены уравнения, описывающие изменение температуры внутреннего воздуха при остывании помещения, введены такие новые понятия (параметры), как коэффициент аккумуляции, показатель темпа охлаждения и т.п. В настоящее время уточняются исходные уравнения,

так как рассматриваются новые факторы, влияющие на изменение температуры внутреннего воздуха, – как, например, переменная температура наружного воздуха [11] или теплоустойчивость многослойных ограждающих конструкций [12]. Объектами подобных научных исследований выступают не только гражданские [13], но и промышленные здания, в которых учитываются особенности технологического процесса [14, 15]. Что касается сельскохозяйственных строительных объектов, то моделирование теплового режима помещения после аварийного отключения системы отопления рассмотрено недостаточно. При практической значимости бесперебойной работы системы отопления для выращивания растений, а также низком уровне тепловой защиты данных объектов строительства становится актуальным вопрос прогнозирования температуры внутреннего воздуха в культивационных сооружениях в случае полного прекращения подачи тепловой энергии и последующего остывания системы теплообеспечения. Решение такой задачи позволит определить продолжительность отказа системы отопления (необеспеченности по температуре) для конкретно взятых условий, которая не скажется отрицательно на жизни и вегетационном периоде растений.

Цель исследований: предупредить гибель растений в защищенном грунте в случае аварийного отключения системы отопления.

Материалы и методы исследований. На рисунке 1 схематично изображено культивационное сооружение с основными входящими тепловыми потоками (теплопоступлениями) и тепловыми потерями в окружающую среду.

Поддержание требуемой температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}$ в культивационном

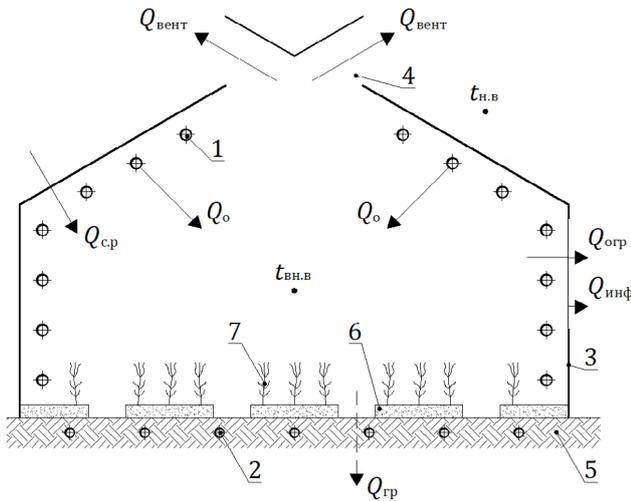


Рис. 1. Тепловой баланс культивационного сооружения (общий вид):

- 1 – трубопроводы воздушного обогрева;
- 2 – трубопроводы грунтового обогрева;
- 3 – ограждение; 4 – вытяжные вентиляционные отверстия (фрамуги);
- 5 – грунт; 6 – почва; 7 – растения

Fig. 1. Thermal balance of the cultivation facility (general view):

- 1 – air heating pipelines;
- 2 – ground heating pipelines;
- 3 – fencing; 4 – exhaust vents (transoms);
- 5 – soil; 6 – soil; 7 – plants

сооружении возможно только при равенстве (балансе) входящих и выходящих тепловых потоков. Согласно данным рисунка 1 основным источником тепловой энергии в помещении является система комбинированного отопления с суммарным тепловым потоком Q_o , которая в рассматриваемом случае представляет собой трубопроводы воздушного обогрева 1 и грунтового обогрева 2. К положительной составляющей теплового баланса культивационного сооружения также можно отнести проникающую длинноволновую солнечную радиацию $Q_{с.р}$. В соответствии с действующими требованиями СП 60.13330.2020 величина $Q_{с.р}$ не учитывается при проектировании отопления, так как является нерегулярным потоком тепловой энергии (расчет тепловой мощности системы отопления выполняется для ночного режима работы без учета солнечной радиации).

К отрицательным тепловым потокам в культивационном сооружении можно отнести (рис. 1): тепловые потери теплопередачей и вследствие инфильтрации наружного воздуха через неплотности ограждения 3 – соответственно $Q_{огр}$ и $Q_{инф}$; тепловые потери от теплообмена с наружным воздухом при температуре $t_{н.в}$ через вытяжные вентиляционные отверстия (фрамуги) 4 и грунт 5 – соответственно $Q_{вент}$ и $Q_{гр}$. Если при проектировании культивационного сооружения

предусматривается грунтовый обогрев почвы, то в уравнение теплового баланса составляющая $Q_{гр}$ не включается [16]. Температура внутреннего воздуха $t_{вн.в}$ также будет зависеть от условий его взаимодействия с почвой 6 и растениями 7, которое осуществляется путем конвективного теплообмена и испарения влаги (транспирации).

При расчете тепловой производительности системы отопления культивационного сооружения Q_o не учитываются солнечная радиация $Q_{с.р}$ (ночной режим работы) и расход тепловой энергии на нужды вентиляции $Q_{вент}$ [16]. Тогда для начального периода развития растений уравнение теплового баланса культивационного сооружения примет следующий вид [16, 17]:

$$Q_o = Q_{огр} + Q_{инф} + Q_{гр}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $Q_{огр}$ – тепловые потери в окружающую среду через ограждение 3 культивационного сооружения, Вт; $Q_{инф}$ – расход тепловой энергии на нагрев инфильтрующегося наружного воздуха, Вт; $Q_{гр}$ – тепловые потери в окружающую среду через грунт 5, Вт.

В случае отключения системы отопления уравнение теплового баланса культивационного сооружения (1) должно быть записано для нестационарного теплового режима в следующем виде:

$$-c\rho V \frac{dt_{вн.в}}{d\tau} = Q_{огр} + Q_{инф} + Q_{гр} - Q_o(\tau), \text{ Вт}, \quad (2)$$

где c – удельная массовая теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); ρ – плотность воздуха, кг/м³; V – объем помещения, м³; $t_{вн.в}$ – температура внутреннего воздуха, °С; τ – время отключения системы отопления, с.

В развернутом виде уравнение теплового баланса культивационного сооружения (2) будет выглядеть следующим образом:

$$-c\rho V \frac{dt_{вн.в}}{d\tau} = \frac{t_{вн.в} - t_{н.в}}{R_t} F_{огр} (1 + \beta_{инф}) + (t_{вн.в} - t_{н.в}) \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i} - Q_o^n e^{-m\tau}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха, °С; R_t – сопротивление теплопередаче ограждения 3 культивационного сооружения, м²·К/Вт; $F_{огр}$ – площадь ограждения 3 культивационного сооружения, м²; $\beta_{инф}$ – доля расхода тепловой энергии на нагрев инфильтрующегося наружного воздуха относительно тепловых потерь теплопередачей через ограждение 3 культивационного сооружения, которая обычно принимается равной 0,2 [16, 17]; F_i и R_i – соответственно площадь поверхности, м², и сопротивление теплопередаче, м²·К/Вт, i -й зоны грунта при их общем количестве n ; Q_o^n – начальная тепловая мощность системы отопления (до ее отключения), Вт; $m = \frac{\alpha F_o}{C_o}$ – темп остывания системы отопления, 1/с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F_o – суммарная площадь поверхности теплообмена системы отопления, м²; C_o – теплоемкость системы отопления, Дж/К.

В уравнении (3) остывание системы отопления культивационного сооружения рассмотрено с позиции регулярного теплового режима (первого рода), из которого следует, что понижение температуры тела (в данном случае системы отопления) происходит по экспоненциальному закону [18]. Теплоустойчивостью ограждения 3 культивационного сооружения при определении температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}$ в данном случае пренебрегают, так как светопрозрачная ограждающая конструкция имеет сравнительно малую толщину (например, толщина сотового поликарбоната составляет от 4 до 16 мм, а органического стекла – не менее 5 мм, рекомендуемая толщина – 10 ÷ 15 мм). Температура наружного воздуха $t_{\text{н.в}}$ принята постоянной в течение всего периода отключения системы отопления.

Решение уравнения теплового баланса культивационного сооружения для нестационарного теплового режима (3) будет иметь следующий вид:

$$\Theta = \frac{t_{\text{вн.в}}^{\text{к}} - t_{\text{н.в}}}{t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} - t_{\text{н.в}}} = e^{\frac{Q_0^{\text{н}}(1-e^{-m\tau})}{c_p V m (t_{\text{вн.в}}^{\text{к}} - t_{\text{н.в}})}} \left[\frac{F_{\text{огр}}}{c_p V R_t} (1 + \beta_{\text{инф}}) + \frac{1}{c_p V} \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i} \right] \tau, \quad (4)$$

где Θ – безразмерная температура; $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}}$ и $t_{\text{вн.в}}^{\text{к}}$ – соответственно температура внутреннего воздуха до и после отключения системы отопления, °С.

Следует отметить, что формула (4) записана в неявном виде, так как искомая температура внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}^{\text{к}}$ присутствует как в левой, так и в правой частях уравнения.

Рассмотрим решение уравнения (4) на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» (Российская Федерация), предназначенной для круглогодичного выращивания растений (рис. 2).

Исходные данные для выполнения расчета:

1. Геометрические параметры. Согласно данным рисунка 2 линейные размеры промышленной теплицы «Фермер 7.5» следующие: ширина $a = 7,45$ м; длина $b = 8,40$ м; высота (в верхней точке промышленной теплицы) $h = 3,80$ м. Суммарная площадь ограждения $F_{\text{огр}} \approx 140,29$ м².

2. Параметры ограждения. Термическое сопротивление ограждения принято равным $R_{\text{огр}} = 0,29$ м²·К/Вт, что соответствует толщине сотового поликарбоната $\delta_{\text{огр}} \approx 10$ мм. Тогда сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции составит $R_t \approx 0,45$ м²·К/Вт.

3. Параметры внутреннего воздуха. Начальная температура внутреннего воздуха (до отключения системы отопления) $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} = 22^\circ\text{C}$ (для огурцов в зимне-весенний оборот, до плодоношения, по данным РД-АПК 1.10.09.01-14).

Плотность и удельная массовая теплоемкость воздуха равны (номинальные значения) $\rho = 1,23$ кг/м³ и $c = 1006$ Дж/(кг·К) соответственно.

4. Параметры наружного воздуха. Температура наружного воздуха (окружающей среды) в течение всего периода принята постоянной и равной $t_{\text{н.в}} = -15^\circ\text{C}$.

5. Параметры грунта. Сопротивления теплопередаче I и II зон грунта приняты, по данным [19], $R_I = 2,1$ м²·К/Вт (при площади $F_I \approx 63,40$ м²) и $R_{II} = 4,3$ м²·К/Вт (при площади $F_{II} \approx 15,18$ м²) соответственно (рис. 2).

6. Параметры системы отопления. Суммарная площадь поверхности системы отопления $F_0 \approx 56,82$ м². Средний коэффициент теплоотдачи (конвективного теплообмена) $\alpha \approx 6,43$ Вт/(м²·К). Начальная тепловая мощность системы водяного отопления (до ее отключения) $Q_0^{\text{н}} \approx 15,2$ кВт. Темп остывания системы водяного отопления $m \approx 26,3 \cdot 10^{-3} 1/\text{с}$.

На рисунке 3 представлен график изменения температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}$ и безразмерной температуры Θ после отключения системы водяного отопления в промышленной теплице «Фермер 7.5». На рисунке 3 также

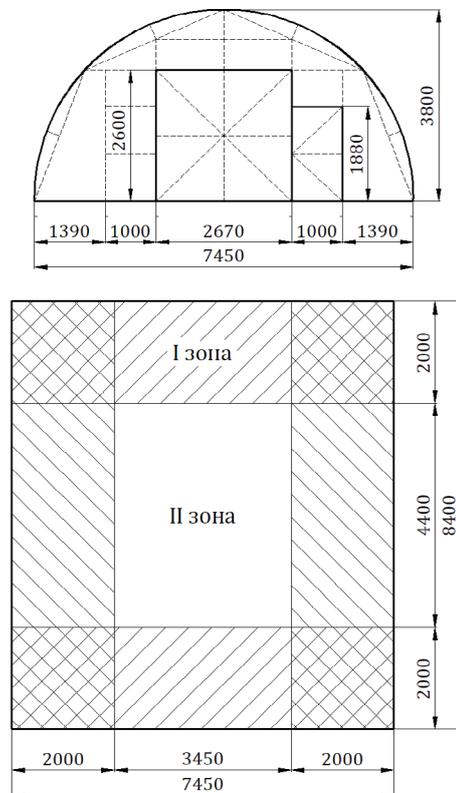


Рис. 2. Промышленная теплица «Фермер 7.5» (вид спереди)

и схема разбивки грунта по зонам

Fig. 2. Industrial greenhouse “Farmer 7.5” (front view) and the scheme of soil breakdown by zones

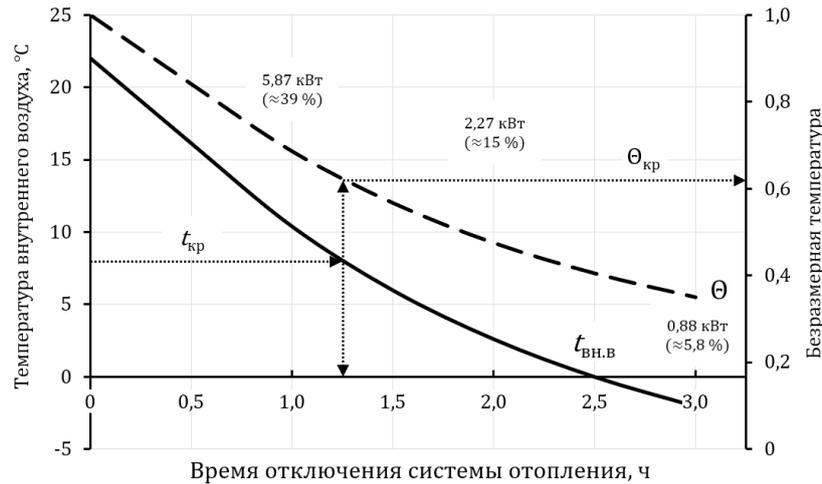


Рис. 3. Изменение температуры внутреннего воздуха после отключения системы отопления

Fig. 3. Change in the temperature of the indoor air after switching off the heating system

указаны значения тепловой мощности системы отопления Q_o в ходе ее остывания в абсолютных и относительных (относительно Q_o^H) единицах.

Как отмечено в работе [20], в случае аварийного отключения системы отопления огурцы могут перенести кратковременное понижение температуры внутреннего воздуха до $t_{кр} = 8^\circ\text{C}$ на срок не более 6 ч. При продолжительно низкой температуре плоды могут замёрзнуть и погибнуть. Известно, что данная овощная культура очень прихотлива к температуре внутреннего воздуха (особенно на этапе созревания плодов). Так, при температуре внутреннего воздуха $t_{вн.в} = 15^\circ\text{C}$ огурцы могут «подмерзнуть» и практически полностью перестать расти. В соответствии с данными рисунка 3 температура внутреннего воздуха в промышленной теплице достигнет критического значения $t_{кр} = 8^\circ\text{C}$ ($\Theta_{кр} \approx 0,62$) с момента отключения системы отопления через интервал времени $\tau_{кр} \approx 1$ ч 15 мин.

Объяснить быстрое падение температуры внутреннего воздуха $t_{вн.в}$ после отключения системы отопления (рис. 3) можно как малой удельной объемной теплоемкостью воздуха c_p , так и низким сопротивлением ограждающей конструкции промышленной теплицы $R_{огр}$ при значительной площади ограждения $F_{огр}$. Потери тепловой энергии в грунт $Q_{гр}$ составляют $\approx 10\%$ от общих тепловых потерь и поэтому не оказывают большого влияния. Таким образом, культивационное сооружение как строительный объект с относительно низким уровнем тепловой защиты должно быть обеспечено системой отопления с повышенными требованиями к надежности работы [21, 22].

На рисунке 4 изображен график зависимости между временем падения температуры внутреннего воздуха в промышленной теплице $\tau_{кр}$ до критического значения $t_{кр} = 8^\circ\text{C}$, суммарными тепловыми потерями $Q_{т.п}$, входящими в состав

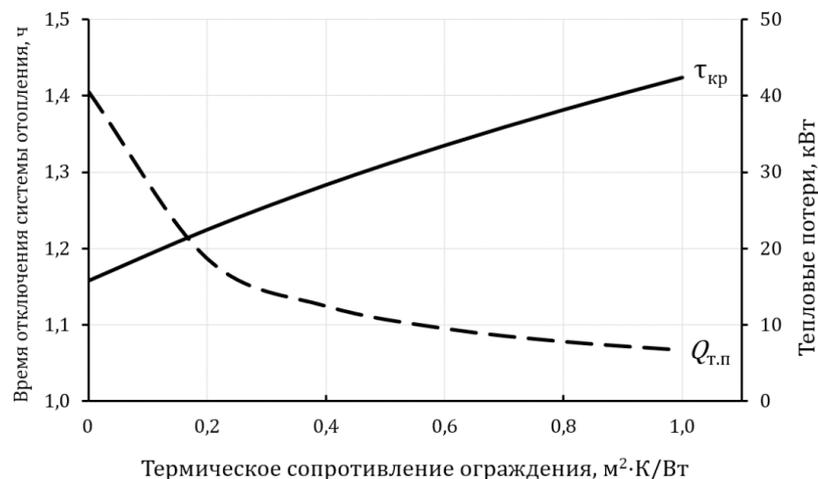


Рис. 4. Влияние термического сопротивления ограждения на время остывания системы отопления

Fig. 4. The effect of thermal resistance of the fencing on the cooling time of the heating system

уравнения теплового баланса (1), и термическим сопротивлением ограждающей конструкции $R_{\text{отр}}$ для рассматриваемых условий.

С увеличением термического сопротивления ограждающей конструкции $R_{\text{отр}}$ закономерно будут снижаться тепловые потери $Q_{m,n}$ (рис. 4). Тогда для поддержания требуемой температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}$, согласно уравнению теплового баланса (1), тепловая мощность системы отопления Q_0 также должна быть меньше. Следовательно, количество тепловой энергии, которое получит помещение в случае отключения системы отопления, с ростом величины $R_{\text{отр}}$ будет уменьшаться. Этим можно объяснить слабое влияние термического сопротивления ограждения $R_{\text{отр}}$ на продолжительность остывания системы отопления $\tau_{\text{кр}}$.

Выводы

Понижение температуры внутреннего воздуха в промышленной теплице после отключения системы отопления происходит достаточно быстро – в среднем на величину $\approx 8,0^\circ\text{C}/\text{ч}$, особенно в начальный период времени, далее скорость падения температуры постепенно уменьшается до величины $\approx 4,0^\circ\text{C}/\text{ч}$. Для сравнения: в помещениях жилых зданий понижение температуры внутреннего воздуха на $8,0^\circ\text{C}$ может быть достигнуто приблизительно в течение двух суток. В отличие от культивационных сооружений, где

в качестве ограждающих конструкций обычно выступают светопрозрачные строительные материалы толщиной до 20 мм, в жилых домах наружными ограждениями являются предварительно нагретые многослойные теплоизолированные стены толщиной 400 ÷ 700 мм. Благодаря тепловой инерции и аккумулялирующим способностям массивные наружные ограждения (без учета светопрозрачных ограждающих конструкций) могут частично отдавать теплоту внутреннему воздуху в процессе остывания. При этом сопротивление теплопередаче наружных стен жилых зданий примерно в 7-8 раз больше сопротивления светопрозрачных конструкций культивационных сооружений.

Установлено, что продолжительность понижения температуры внутреннего воздуха до условно критического значения $t_{\text{кр}} = 8^\circ\text{C}$ мало зависит от суммарных тепловых потерь (в среднем увеличивается на $\approx 0,2$ ч на каждые $0,1 \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ термического сопротивления ограждения). Для соблюдения теплового баланса помещения и поддержания заданной температуры внутреннего воздуха уменьшение тепловых потерь должно закономерно привести к снижению требуемой тепловой мощности системы отопления. Как следствие, при аварийном отключении системы отопления помещение культивационного сооружения получит меньшее количество тепловой энергии за рассматриваемый период остывания.

Список использованных источников

1. Лошкарёв И.Ю. Энергосберегающие принципы в тепличных комплексах / И.Ю. Лошкарёв, В.М. Наход, А.Я. Аберьясёв // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IX международной научно-практической конференции. Саратов, 2018. С. 109-110.
2. Romanovski V., Zhang Z., Akbarisehat A. Nanobiosensors for precision farming and sustainable agriculture // in: Agricultural Sustainability through Nanotechnology. 1st ed. CRC Press. Boca Raton. 2025: P. 156-174. DOI: 10.1201/9781003354253-10.
3. Cossu M., Yano A., Li Zh., Onoe M., Nakamura H., Matsumoto T., Nakata J. Advances on the semi-transparent modules based on micro solar cells: First integration in a greenhouse system // Applied Energy. 2016. No 162. P. 1042-1051. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.002>
4. Periakaruppan R., Romanovski V., Kumar T.S., Vanathi P., Praveena M., Anilkumar A., Sivaraj D., Ahamed N., Murugesan S., Chandrasekar D., Selvaraj K. Innovations in modern nanotechnology for the sustainable production of agriculture // ChemEngineering. 2023. 7(4). 61. DOI: 10.3390/chemengineering7040061
5. Kavga A., Konstas I., Panidis T. Assessment of infrared heating benefits in a production greenhouse // Applied Engineering in Agriculture. 2015. Vol. 31 (1). P. 143-151. <https://doi.org/10.13031/aea.31.10747>

References

1. Loshkarev I.Yu. Energy-saving principles in greenhouse complexes / I.Yu. Loshkarev V.M. Nakhod, A.Ya. Aberyasjev // Actual problems of the energy of the Agro-Industrial Complex: materials of the IX International scientific and practical conference. Saratov, 2018. P. 109-110.
2. Romanovski V., Zhang Z., Akbarisehat A. Nanobiosensors for precision farming and sustainable agriculture // in: Agricultural Sustainability through Nanotechnology. 1st ed. CRC Press. Boca Raton. 2025: P. 156-174. DOI: 10.1201/9781003354253-10
3. Cossu M., Yano A., Li Zh., Onoe M., Nakamura H., Matsumoto T., Nakata J. Advances on the semi-transparent modules based on micro solar cells: First integration in a greenhouse system // Applied Energy. 2016. No 162. P. 1042-1051. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.002>
4. Periakaruppan R., Romanovski V., Kumar T.S., Vanathi P., Praveena M., Anilkumar A., Sivaraj D., Ahamed N., Murugesan S., Chandrasekar D., Selvaraj K. Innovations in modern nanotechnology for the sustainable production of agriculture // ChemEngineering. 2023. 7(4). 61. DOI: 10.3390/chemengineering7040061
5. Kavga A., Konstas I., Panidis T. Assessment of infrared heating benefits in a production greenhouse // Applied Engineering in Agriculture. 2015. Vol. 31 (1). P. 143-151. <https://doi.org/10.13031/aea.31.10747>

6. Romanovski V., Matsukevich I., Romanovskaia E., Periakaruppan R. Nano metal oxide as nanosensors in agriculture and environment // in: *Nanometal Oxides in Horticulture and Agronomy*. Elsevier. 2023. P. 321-352. DOI: 10.1016/B978-0-323-91809-1.00016-0

7. Овчинников А.В. Определение и оптимизация тепловой нагрузки культивационного сооружения / А.В. Овчинников, В.М. Каравайков // *Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: сборник материалов VIII международной научно-практической интернет-конференции*. Орел: 2010. С. 136-138.

8. Sonneveld P.J., Swinkels G.L.A.M., Tuijl B.A.J., Janssen H., Bot G.P.A. Greenhouse with a CPV system based on NIR reflecting lamellae // *Acta Horticulturae*. 2012. P. 43-50. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.3>

9. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. Учебник. Санкт-Петербург: АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.

10. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 2001. 472 с.

11. Самарин О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах при переменной температуре наружного воздуха // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. Вып. 1. С. 77-83. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.77-83>

12. Малявина Е.Г. Определение времени остывания помещения после отключения системы отопления с учетом теплоустойчивости внутренних и наружных многослойных ограждающих конструкций / Е.Г. Малявина, Р.Г. Ахвердашвили // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023. № 10 (778). С. 83-96. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96>

13. Горелов М.В. Экспериментальное определение времени остывания здания при аварийном отключении системы теплоснабжения / М.В. Горелов, С.В. Гужов, Е.М. Горячева, М.Ю. Юркина // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2020. № 4. С. 11-15. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-11-15>

14. Разаков М.А. Особенности теплонапряженности машинного зала при отключении системы отопления // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24. № 6. С. 133-142. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-133-142>

15. Симашев В.И. Разработка системы управления ассоциативно-защищенными картографическими базами данных в распределенной вычислительной среде / В.И. Симашев, М.Г. Нуриев // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2025. № 4 (154). DOI: 10.60797/IRJ.2025.154.89

16. Климов В.В. Оборудование теплиц для подсобных и личных хозяйств. М.: Энергоатомиздат, 1992. 96 с.

17. Сканави А.Н. Отопление. Учебник. М.: Стройиздат, 1988. 416 с.

18. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954. 408 с.

19. Богословский В.Н., Сканави А.Н. Отопление. Учебник. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.

20. Дроздов В.Ф. Отопление и вентиляция. Отопление. Учебник. М.: Высшая школа, 1976. 280 с.

21. Павлов М.В. Метод и алгоритм расчета системы газолучистого отопления культивационного сооружения с предварительным подогревом приточного воздуха / М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов // *Природообустройство* 2024. № 5. С. 57-64. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-57-64

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619659 Российская Федерация.

6. Romanovski V., Matsukevich I., Romanovskaia E., Periakaruppan R. Nano metal oxide as nanosensors in agriculture and environment // in: *Nanometal Oxides in Horticulture and Agronomy*. Elsevier. 2023. P. 321-352. DOI: 10.1016/B978-0-323-91809-1.00016-0

7. Ovchinnikov A.V., V.M. Determination and optimization of the thermal load of the cultivation structure / A.V. Ovchinnikov, V.M. Karavaikov // *Energy and Resource Saving – XXI Century: Collection of Materials of the VIII International scientific and practical internet conference*. Orel: 2010. P. 136-138.

8. Sonneveld P.J., Swinkels G.L.A.M., Tuijl B.A.J., Janssen H., Bot G.P.A. Greenhouse with a CPV system based on NIR reflecting lamellae // *Acta Horticulturae*. 2012. P. 43-50. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.3>

9. Bogoslovsky V.N. Construction heat engineering. St. Petersburg: AVOK North – West, 2006. 400 p.

10. Sokolov E.Ya. Heating and heating networks. Moscow, MPEI Publ., 2001. 472 p.

11. Samarin O.D. Calculation of cooling of building premises in emergency modes at variable temperature of outdoor air. 2024. V. 19. Issue. 1, P. 77-83. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.77-83>

12. Malyavina E.G., Ahverdashvili R.G. Malyavina E.G., Akhverdashvili R.G. Determination of the cooling time of the room after disconnecting the heating system taking into account the heat stability of internal and external multilayer enclosing structures. *Construction*. 2023. № 10 (778). P. 83-96. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96>

13. Gorelov M.V. Experimental determination of the cooling time of the building in case of emergency shutdown of the heat supply system / M.V. Gorelov, S.V. Guzhov, E.M. Goryacheva M.Yu. Yurkina // *Energy security and energy saving*. 2020. № 4. P. 11-15. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-11-15>

14. Razakov M.A. Features of the heat intensity of the turbine hall when the heating system is turned off // *Proceedings of higher educational institutions. Problems of energy*. 2022. V. 24. № 6. P. 133-142. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-133-142>

15. Simashev V.I. Development of a management system for associatively-protected cartographic databases in a distributed computing environment / V.I. Simashev, M.G. Nuriev // *The International scientific-research journal*. 2025. No. 4 (154). DOI: 10.60797/IRJ.2025.154.89

16. Klimov V.V. Equipment of glasshouses for auxiliary and private households. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 96 p.

17. Skanavi A.N. Heating. Textbook. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 416 p.

18. Kondratjev G.M. Regular heat regime. Moskva: Gostekhizdat, 1954. 408 p.

19. Bogoslovskij V.N., Skanavi A.N. Otoplenie. Moskva: Strojizdat, 1991. 735 s.

20. Drozdov V.F. Heating and ventilation. Heating. Moscow: Higher school, 1976. 280 p.

21. Pavlov M.V., Karpov D.F. Method and algorithm for calculating the system of gas-radiant heating of cultivation facilities with preliminary heating of the air flow / M.V. Pavlov, D.F. Karpov // *Prirodoostroistvo* 2024. № 5. P. 57-64. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-57-64

22. Certificate of State Registration of Computer Program No 2025619659 Russian Federation. Program for determining the temperature of the internal air in the room after turning off the heating system. 28.03.2025: publ.

Программа для определения температуры внутреннего воздуха в помещении после отключения системы отопления: заявл. 28.03.2025; опубл. 16.04.2025 / А.А. Фролова, М.Г. Нуриев, М.С. Шкиндров [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Об авторах

Михаил Васильевич Павлов, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения; Author ID SCOPUS: 57204361039; WoS ResearcherID: AAN-5773-2021; ORCID: 0000-0002-8687-3296; RSCI ID: 564419; SPIN-код: 6544-7267; pavlovmv@vogu35.ru

Денис Федорович Карпов, соискатель, старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения; Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-код: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

Людмила Владимировна Храпонова, аспирант Высшей школы передовых цифровых технологий, Передовая инженерная школа «Цифровой инжиниринг»; WoS ResearcherID: LMN-1045-2024; ORCID: 0009-0006-9047-9386; RSCI ID: 1266517; SPIN-код: 9916-5102; hraponova.lv@edu.spbstu.ru, luda11nev@gmail.com

Критерии авторства / Criteria of authorship

Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Храпонова Л.В. провели теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no 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 at the editorial office 02.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review and revision 20.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 20.05.2025

16.04.2025 / A.A. Frolova, M.G. Nuriev, M.S. Shkinderov [i dr.]; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering".

About the authors

Mikhail V. Pavlov, associate professor, CSc (Eng), associate professor at the department of heat, gas and water supply, FSBEI HE "Vologda State University"; 160000, Vologda, 15 Lenin St., 111 Office; pavlovmv@vogu35.ru

Denis F. Karpov, applicant, senior lecturer at the department of heat, gas and water supply, FSBEI HE "Vologda State University"; 160000, Vologda, 15 Lenin St., 111 Office; karpovdf@vogu35.ru

Liudmila V. Khraponova, post graduate student at the Higher school of advanced digital technologies, Advanced engineering school "Digital engineering", Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 3195251, Saint Petersburg, 29 Letter B Polytechnique St., 4 Building, 320 Office; hraponova.lv@edu.spbstu.ru, luda11nev@gmail.com

Pavlov M.V., Karpov D.F. and Khraponova L.V. conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-38-44>

УДК 626.861:556.555.6



ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ ОСУШИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ, ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОЧИСТКА

М.А. Карапетян¹, С.К. Тойгамбаев¹, Х.А. Абдулмажидов²

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина;

² Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 19, корп. 28, Россия

Аннотация. Целью исследований явилось изучение состояния каналов мелиоративной системы. Задачи исследований: выяснение соответствия эксплуатационных характеристик каналов проектным значениям; определение характера деформаций и нарушений геометрических размеров дна и откосов каналов, объемов земляных работ по очистке и восстановлению элементов мелиоративной системы, предпосылок для принятия решения о проведении текущего и капитального ремонта каналов мелиоративной системы. В статье представлены результаты исследований состояния мелиоративных осушительных каналов. Рассматривались осушительные каналы мелиоративной системы Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. По форме поперечного сечения осушительные каналы могут быть трапецеидальными, прямоугольными и параболическими. Наибольшее распространение получили трапецеидальные каналы, откосы которых обладают большей устойчивостью. Они более приспособлены для проведения очистных работ, тогда как при механизированной очистке прямоугольных и параболических каналов возможно разрушение кромок откосов. Эксплуатация осушительных мелиоративных систем сопряжена с появлением наносов, заиления, травянистой и кустарниковой растительности на дне и откосах каналов. Площадь поперечного сечения при этом уменьшается. Все перечисленные факторы приводят к нарушению функционирования всей мелиоративной системы, заключающемуся в первую очередь в снижении пропускной способности канала, во вторую очередь – в уменьшении проектной глубины канала. Все это способствует подтоплению сельскохозяйственного поля и близлежащих территорий. Такое состояние требует проведения механизированной очистки, которую необходимо реализовать с обеспечением проектной глубины. Это означает, что разработка наносов со дна канала на большую, чем проектную, глубину приводит к снижению кривой депрессии и уменьшению нормы осушения.

Ключевые слова: осушительные каналы, наносы, заиления, травянистая растительность, кустарниковая растительность, молодые деревья в каналах, пропускная способность канала, подтопление, кривая депрессии, устойчивость откосов, коэффициент заложения откосов, берма и бровка канала

Формат цитирования: Карапетян М.А., Тойгамбаев С.К., Абдулмажидов Х.А. Исследование состояния мелиоративных осушительных каналов, их восстановление и очистка // Природообустройство. 2025. № 3. С. 38-44. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-38-44>

Original article

STUDY OF THE STATE OF RECLAMATION DRAINAGE CANALS, THEIR RESTORATION AND CLEANING

M.A. Karapetyan, S.K. Toygambayev, K.A. Abdulmashidov

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering

² Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction 127434, Moscow, Pryanishnikova str., 19, building 28, Russia

Abstract. The purpose of the research: to study the condition of the canals of the reclamation system; research objectives: to determine the compliance of the operational characteristics of the canals with the design values, to determine the nature of deformations and violations of the geometric dimensions of the bottom and slopes of the canals, to determine the amount of excavation work to clean and restore the elements of the reclamation system, to determine the prerequisites for making a decision on ongoing and major repairs of the canals of the reclamation system. The article presents the results of a study of the state of reclamation drainage canals. The work considered the drainage canals of the reclamation system of the Field Experimental Station of the Russian State Agrarian University-Moscow

Timiryazev Agricultural Academy. According to the cross-sectional shape, drainage canals can be trapezoidal, rectangular and parabolic. The most common are trapezoidal canals, the slopes of which are more stable, and they are more adapted for cleaning operations, while with mechanized cleaning of rectangular and parabolic canals, it is possible to destroy the edges of the slopes. The operation of drainage reclamation systems is associated with the appearance of sediments, siltation, herbaceous and shrubby vegetation at the bottom and slopes of canals. The cross-sectional area is reduced. All these factors lead to a disruption in the functioning of the entire reclamation system, which consists, first of all, in a decrease in the capacity of the canal; and, secondly, reducing the design depth of the canal. All this contributes to the flooding of the agricultural field and nearby areas. This state of affairs requires mechanized treatment, which must be implemented with the design depth. This means that the development of sediments from the bottom of the canal to a greater depth than the design depth leads to a decrease in the depression curve and a decrease in the drainage rate.

Keywords: drainage canals, sediments, siltation, herbaceous vegetation, shrub vegetation, young trees in canals, canal capacity, flooding, depression curve, slope stability, slope laying coefficient, berm and canal edge

Format of citation: Karapetyan M.A., Toygambayev S.K., Abdulmazhidov Kh.A. Study of the state of reclamation drainage canals, their restoration and cleaning // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 38-44. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-38-44>

Введение. К мелиоративной зоне осушения Российской Федерации относятся северо-запад европейской части России, средняя часть Западной Сибири и Калининградская область. Московский регион и Московская область относятся, соответственно, к зоне осушения [1-4]. В представленных регионах существуют осушительные системы: от успешно функционирующих до низкоэффективных. Мелиоративные осушительные каналы необходимы для обеспечения расчетного уровня грунтовых вод, сброса излишков воды в паводковый период и для сохранения влаги в засушливые периоды [5-8]. Сохранение воды в системе осуществляется путем использования шлюзов-регуляторов. В районах, приграничных между зонами осушения и орошения, рекомендуется применять системы двойного регулирования. Для нормального функционирования мелиоративных систем необходимо обеспечивать такие виды работ на каналах, как уход, техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт [9, 10]. Очевидно, что своевременное выполнение операций по уходу и техническому обслуживанию каналов может продлить срок их эксплуатации до дорогостоящего капитального ремонта. Следствием отсутствия перечисленных операций на каналах могут быть весенние паводки или пожары на торфяниках [11, 12].

Цель исследований: изучение состояния каналов мелиоративной системы.

Задачи исследований: выяснение соответствия эксплуатационных характеристик каналов проектным значениям; определение характера деформаций и нарушений геометрических

размеров дна и откосов каналов, объемов земляных работ по очистке и восстановлению элементов мелиоративной системы, предпосылок для принятия решения о проведении текущего и капитального ремонта каналов мелиоративной системы.

Материалы и методы исследований. Объектом для исследований явились осушительные каналы мелиоративной системы Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Основными методами исследований, использованными в работе, стали измерение и сравнение.

В соответствии с целью и задачами исследований метод измерения применялся для выяснения соответствия эксплуатационных характеристик каналов проектным значениям, для определения характера деформаций и нарушений геометрических размеров дна и откосов каналов, объемов земляных работ по очистке и восстановлению элементов мелиоративной системы. Для определения предпосылок по принятию решения о проведении текущего и капитального ремонта каналов мелиоративной системы применялся метод сравнения. В данном случае сравнение характеристик действующих каналов мелиоративной системы Полевой опытной станции выполнялось согласно данным ГОСТ 58801-2020 «Системы и сооружения мелиоративные. Каналы осушительные. Поперечные сечения» [13, 14].

Для определения приближенных значений протяженностей каналов различных категорий исследуемой мелиоративной системы применялись ресурсы онлайн-сервисов компании «Яндекс».

Для измерения таких геометрических размеров каналов, как ширина по верху, ширина по дну, применялась рулетка. Заложение откосов при исследовании гидравлических параметров определялось с помощью измерителя углов. Для определения разности высот между несколькими точками канала применялся нивелир. Состояние каналов фиксировалось с помощью фото- и видеоборудования [15, 16].

Результаты и их обсуждение. Протяженность каналов исследованной части осушительной мелиоративной системы Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева составляет 1285 м. На рисунке 1 представлен фрагмент карты расположения и последовательности очистки каналов мелиоративной системы.



Рис. 1. Расположение и последовательность очистки каналов мелиоративной системы Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Fig. 1. Location and sequence of cleaning of the canals of the reclamation system of the Field experimental station of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Визуальное исследование каналов показало наличие наносов, заилений и большого количества травянистой растительности (рис. 2).

Четкого разделения размеров каналов на малые и большие нет. Однако по техническим характеристикам, выделяемым в технологии земляных работ при очистке элементов осушительной системы, проведено условное разграничение, согласно которому каналы глубиной и шириной по дну менее 3 м считаются малыми типоразмерами. Соответственно значительная часть осушительных каналов относится именно к данным типоразмерам. Наличие воды в каналах в определенной степени снижает эффективность удаления отложений и заиливания. Поэтому глубина воды в канале должна иметь определенные пределы, превышение которых приводит к снижению эффективности очистки осушителя.

Главные особенности существующей проблемы заключаются в принятых основных параметрах осушительных каналов и объемах наносов и заилений. В таблице 1 в качестве примера приведена матрица А, элементами которой являются относительные высотные проектные отметки поверхности дна конструктивного осушительного канала и откосов с заложением 1 : 1 [1].

В таблице 2 представлена матрица модели распределения наносов в канале по высотным отметкам [1].

Характер распределения наносов на участке канала представлен на рисунке 3 в виде модели поверхности, выполненной в системе Mathcad с учетом высотных точек заилений. Исходя из данных матриц, можно определить объемы наносов на данном участке и сделать прогноз на смежные участки канала.

При наличии высотных точек конструктивных сечений **каналов А** и уровней отложений **В** система Mathcad позволяет определить объем работ, необходимых для очистки и восстановления осушительных каналов.



Рис. 2. Состояние каналов мелиоративной осушительной сети до очистки
Fig. 2. Condition of the canals of the reclamation drainage network before cleaning

Таблица 1. Матрица, представляющая поверхность дна канала и откосов с заложением 1: 1 в виде совокупностей относительных высотных отметок

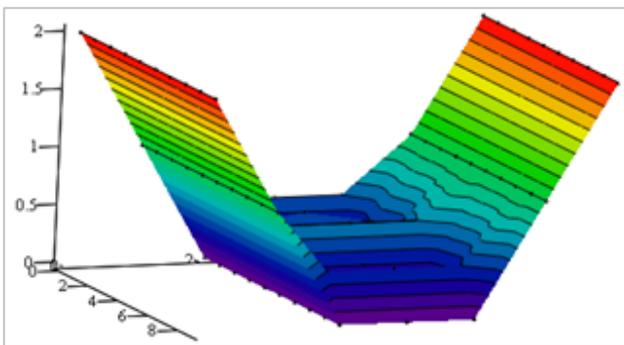
Table 1. A matrix representing the surface of the bottom of the canal and slopes with a 1 : 1 laying in the form of a set of relative elevations

A =		0	1	2	3	4	5	6
	0	2	1	0	0	0	1	2
	1	2	1	0	0	0	1	2
	2	2	1	0	0	0	1	2
	3	2	1	0	0	0	1	2
	4	2	1	0	0	0	1	2
	5	2	1	0	0	0	1	2
	6	2	1	0	0	0	1	2
	7	2	1	0	0	0	1	2
	8	2	1	0	0	0	1	2
9	2	1	0	0	0	1	2	

Таблица 2. Матрица, представляющая модель поверхности наносов на дне и нижних частях откосов осушительного канала в виде высотных отметок

Table 2. A matrix representing the model of the siltation surface on the bottom and the lower parts of slopes of the drainage canal in the form of elevations

B =		0	1	2	3	4	5	6
	0	2	1	0,5	0,5	0,5	1	2
	1	2	1	0,3	0,3	0,3	1	2
	2	2	1	0,4	0,5	0,4	1	2
	3	2	1	0,3	0,3	0,3	1	2
	4	2	1	0,5	0,5	0,5	1	2
	5	2	1	0,6	0,6	0,6	1	2
	6	2	1	0,3	0,3	0,3	1	2
	7	2	1	0,2	0,2	0,2	1	2
	8	2	1	0,4	0,4	0,4	1	2
9	2	1	0,1	0,2	0,1	1	2	



A, B

Рис. 3. Распределение наносов и заилений по дну и откосам на участке осушительного канала

Fig. 3. Distribution of sediment and siltation along the bottom and slopes in the drainage canal section

Матрица высотных значений и расчет объема наносов для данного участка канала в системе Mathcad представлены на рисунке 4.

Средние удельные объемы отложений и заилений, ежегодно удаляемых из каналов на нормально функционирующих мелиоративных

системах, в большинстве каналов невелики и колеблются от 0,02 до 0,10 м³ на 1 м длины. Это количество наносов на дне канала соответствует толщине стружки 5...15 см.

Кроме того, важно иметь в виду, что ил и отложения крайне неравномерно распределяются по длине каналов. Например, для проводящей сети максимальные объемы обычно сосредоточены в местах, близких к устью стоков или к открытым осушителям, а также на соединениях каналов. В то же время на других участках каналов объем осадков и ила может быть в несколько раз меньшим, а в некоторых случаях – совсем незначительным. Такая же картина наблюдается и в каналах сети управления, где потребность в очистке возникает особенно на более низких высотах.

Состояние каналов характеризуется не только количеством и объемами наносов и заилений – на дне и откосах каналов появляется травяная растительность. Более того, при длительном промежутке времени без проведения очистных работ в русле каналов появляются кустарниковая растительность и мелкие деревья.

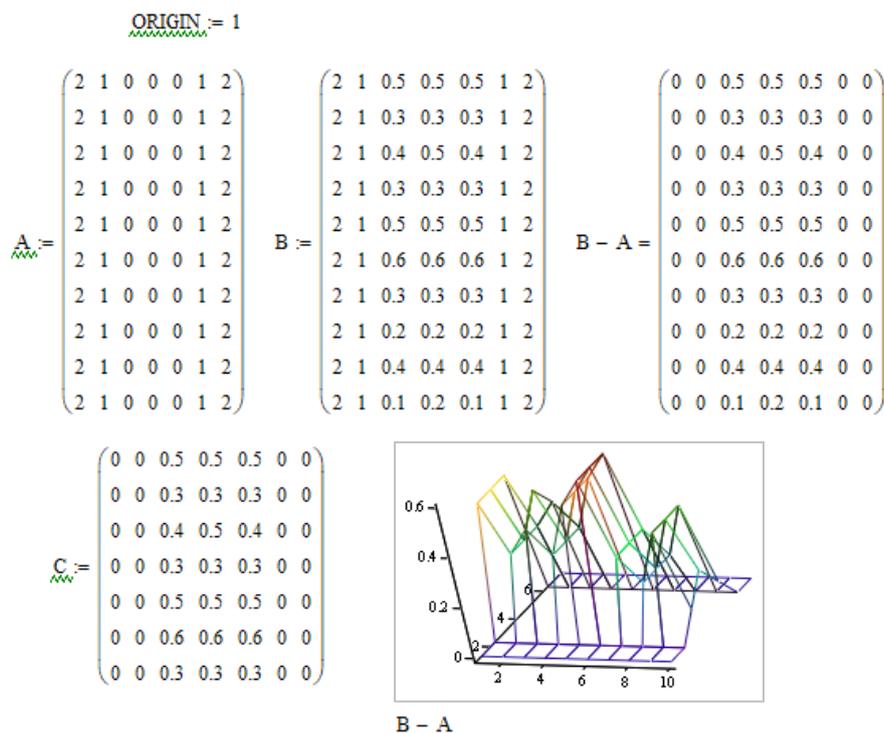


Рис. 4. Листинг расчета объема наносов на исследуемом участке канала в системе Mathcad
Fig. 4. Listing of sediment volume calculation on the studied section of the canal in the Mathcad system

В связи с этим одним из важнейших мероприятий по уходу можно считать скашивание растительности со склонов, дна и насыпей в каналах.

Элементы мелиоративных систем – такие, как осушители, входят в номенклатуру каналов осушения и относятся к каналам мелкой сети. Их глубина варьируется от 0,8 до 1,7 м. Для подавляющего большинства осушительных каналов этот размер находится в пределах 0,2...0,6 м. Величина ширины дна канала в 0,2 м характерна для каналов, проложенных плугами. Процентное соотношение ширины каналов по дну для разных участков приведено на примере Смоленской области: каналы шириной 0,4 м по дну – 87%, с шириной 0,6 м по дну – 10%, свыше 0,6 м – 3%. Конечно, ширина дна канала 0,4 м является наиболее распространенной.

Для очистки каналов осушительной сети Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева был закуплен каналочиститель ОКН-0,5. С его помощью в период с 1 сентября по 2 ноября 2023 г. проведены работы по очистке каналов протяженностью 1285 м с объемами земляных работ (наносы и заиления с растительностью) 128 м³.

После проведенных работ по очистке каналов и восстановлению их сечения на основе гидравлических расчетов возможно определение показателей для оценки риска заиления каналов. Такими показателями являются характеристики грунта, в теле которого сформирован канал,

уклон дна канала, ширина дна канала, режим движения потока, коэффициент шероховатости. В формуле Шези для определения расчетного расхода присутствует такой показатель, как площадь живого сечения потока, изменение значения которого указывает на риск возникновения заиления в каналах. Впрочем, многолетний опыт эксплуатации мелиоративных каналов показывает, что с течением времени наносы и заиления в каналах неизбежно возникают. Более того, в русле канала появляется травянистая и кустарниковая растительность, способствующая заилению. Перечисленные факторы подтверждают необходимость периодического проведения операций по уходу за мелиоративными осушительными каналами.

Различные методы механизации операций по очистке напрямую связаны с таким важным параметром канала, как коэффициент заложения откосов. Для большинства осушителей эта величина находится в пределах от 1:1 до 1:1,5. Количество каналов с более пологими уклонами составляет 1,4%. Если предположить, что средняя глубина осушителей составляет 1,5 м, то ширина канала по верху составляет от 5 до 6 м и более.

Чрезмерно высокие значения коэффициента заложения откосов негативно влияют на формирование наносов и заиления в канале, особенно в тех случаях, когда при механизированной очистке разработку прямоугольным ковшовым рабочим органом продольного движения по оси

канала подвергаются отложения на дне канала. В результате такой операции происходит подрезание наносов и заилений, находящихся на прилегающих ко дну частях откосов, что способствует их сползанию на дно канала. Операцию очистки при этом необходимо повторить. Во избежание таких явлений рекомендуется применять сменный рабочий орган продольного по оси канала движения – ковш трапецеидального профиля. Применение такого ковша позволяет поддерживать расчетное значение коэффициента заложения откосов.

Выводы

1. Проведены исследования состояния мелиоративных осушительных каналов Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева до очистки.

2. Анализ состояния каналов показал наличие значительного количества наносов, заилений и травянистой растительности; в большинстве каналов они невелики и колеблются от 0,02 до 0,10 м³ на 1 м длины. Это количество

наносов на дне канала соответствует толщине стружки 5...15 см.

3. На некоторых участках системы количество наносов и растительности значительно превышало указанные значения, что способствовало принятию решения об очистке и восстановлении каналов.

4. Очистка каналов осушительной сети Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева проведена с применением каналоочистителя ОКН-0,5. Применение данной машины в операциях по уходу за каналами значительно увеличивает срок эксплуатации элементов системы до капитального ремонта.

5. Природные и производственные условия очистительных систем настолько разнообразны, особенно по геометрическим размерам каналов, количеству и объему осадка и растительности, что проблемы очистки могут быть решены только комплексом машин разных типоразмеров. Поэтому в первую очередь должны быть определены основные районы и особенности их естественных условий.

Список использованных источников

1. Абдулмажидов Х.А. Характеристики изменения размеров осушительных каналов / Х.А. Абдулмажидов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2013. № 1(57). С. 54-57. EDN: TEFWTF

2. Абдразаков Ф.К. Методы диагностики облицованных оросительных каналов / Ф.К. Абдразаков, А.А. Руквишиников, Э.Э. Сафин // Природообустройство. 2024. № 5. С. 21-27. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-21-27.

3. Бакланова Д.В. Оценка гидравлической шероховатости русла магистрального канала / Д.В. Бакланова, О.А. Баев // Природообустройство. 2023. № 1. С. 76-81. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-76-81.

4. Колганов А.В. Результаты натурных исследований магистрального канала в Республике Калмыкия / А.В. Колганов, О.А. Баев, Д.В. Бакланова // Природообустройство. 2022. № 3. С. 108-114. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-108-114.

5. Глазунова И.В. Исследования аэрогидродинамических систем формирования отложений водных объектов / И.В. Глазунова, С.Н. Редников, К.З. Нгуен // Мелиорация и водное хозяйство. 2024. № 1. С. 7-11. DOI: 10.32962/0235-2524-2024-1-7-11.

6. Каракулов Ф.А. Применение алгоритма анализа гидромелиоративной системы на оросительном канале участка Петровско-Анастасиевской оросительной системы / Ф.А. Каракулов // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 4. С. 47-50. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-4-47-50.

7. Карапетян М.А. Экспериментальные исследования устойчивости откосов мелиоративных осушительных каналов / М.А. Карапетян, С.К. Тойгамбаев, Х.А. Абдулмажидов // Природообустройство. 2024. № 4. С. 52-57. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-4-52-57.

References

1. Abdulmashidov Kh.A. Characteristics of changes in the size of drainage canals / Kh.A. Abdulmashidov // Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin". 2013. No. 1(57). P. 54-57. EDN: TEFWTF

2. Abdrazakov F.K. Methods of diagnostics of lined irrigation canals. / F.K. Abdrazakov, A.A. Rukavishnikov, E.E. Safin // Prirodoobustrojstvo. 2024. No. 5. P. 21-27. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-21-27.

3. Baklanova D.V. Assessment of the hydraulic roughness of the main canal bed. / D.V. Baklanova, O.A. Baev // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 1. P. 76-81. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-76-81

4. Kolganov A.V. Results of natural studies of the main canal in the Republic of Kalmykia / A.V. Kolganov, O.A. Baev, D.V. Baklanova // Prirodoobustrojstvo. 2022. No. 3. P. 108-114. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-108-114.

5. Glazunova I.V. Studies of aerohydrodynamic systems for the formation of water object deposits / I.V. Glazunova, S.N. Rednikov, K.Z. Nguyen // Land reclamation and water management. 2024. № 1. P. 7-11. DOI: 10.32962/0235-2524-2024-1-7-11.

6. Karakulov F.A. Application of the algorithm for the analysis of the hydro-meliorativ system on the irrigation canal of the Petrovsko-Anastasievskaya irrigation system / F.A. Karakulov // Land reclamation and water management. 2023. № 4. P. 47-50. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-4-47-50.

7. Karapetyan M.A. Experimental studies of the stability of slopes of reclamation drainage canals / M.A. Karapetyan, S.K. Tojgambaev, X.A. Abdulmashidov // Prirodoobustrojstvo. 2024. № 4. P. 52-57. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-4-52-57.

8. Linkevich N.N. Main measures to improve the reliability and safety of canals / N.N. Linkevich // Innovative technologies in water, communal economy and water transport:

8. Линкевич Н.Н. Основные мероприятия по повышению надежности и безопасности каналов // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: Материалы II республиканской научно-технической конференции, Минск, 28-29 апреля 2022 года. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2022. С. 171-178.

9. Михневич Э.И. Расчет пропускной способности и устойчивости каналов / Э.И. Михневич // Экология и строительство. 2020. № 1. С. 23-31. DOI: 10.35688/2413-8452-2020-01-003.

10. Авраменко Н.М. Ресурсоэкономный технологический регламент скашивания и удаления травяной и водной растительности по берегам и руслам каналов в Полесье / Н.М. Авраменко, Е.Н. Яцупкевич // Мелиорация. 2019. № 2(88). С. 34-41.

11. Рогунович В.П. Повышение эффективности крепления земляных каналов / В.П. Рогунович, А. И.М. Ваэль, А.И. Шкадун // Мелиорация. 2016. 2(76). С. 46-51.

12. Балун О.В. Эколого-экономически сбалансированное функционирование комбинированных осушительных систем на тяжелых почвах Новгородской области / О.В. Балун // Мелиорация и водное хозяйство. 2019. № 2. С. 30-34.

13. Карлиханов Т.К. Современное состояние проблемы устойчивости земляных каналов / Т.К. Карлиханов, О.Ж. Куанышбаев, Г.Т. Далдабаева // Наука и новые технологии. 2013. № 1. С. 33-36. EDN: VZJQJJ

14. Погодин Н.Н. Очистка линейных гидротехнических сооружений от заиления гидродинамическим способом / Н.Н. Погодин, А.С. Анженков, В.А. Болбышко // Мелиорация. 2019. № 1(87). С. 5-11.

15. Оскирко Л.Н. Сравнительный анализ цифровых моделей рельефа мелиоративных объектов, полученных различными аэрофототопографическими методами / Л.Н. Оскирко, В.М. Макоед, О.Г. Бондарчук // Мелиорация. 2023. № 4(106). С. 14-23.

16. Ракицкий А.И. Гидравлический расчет открытого канала в среде HEC-RAS / А.И. Ракицкий // Мелиорация. 2022. № 4(102). С. 30-38.

Materials of the II Republican Scientific and Technical Conference, Minsk, April 28-29, 2022. Minsk: Belarusian National Technical University, 2022. P. 171-178.

9. Mikhnevich E.I. Calculation of the throughput capacity and stability of canals / E.I. Mikhnevich // Ecology and construction. 2020. № 1. P. 23-31. DOI: 10.35688/2413-8452-2020-01-003.

10. Avramenko N.M. Resource-saving technological regulations for mowing and removing grass and water vegetation along the banks and canals of canals in Polesie / N.M. Avramenko, E.N. Yatsushkevich // Melioration. 2019. № 2(88). P. 34-41.

11. Rogunovich V.P. Improving the effectiveness of the fastening of earth canals / V.P. Rogunovich, A. I.M. Vael, A.I. Shkadun // Melioration. 2016. 2(76). P. 46-51.

12. Balun O.V. Ecological and economic balanced functioning of combined drainage systems on heavy soils of the Novgorod region / O.V. Balun // Land reclamation and water management. 2019. № 2. P. 30-34.

13. Karlixanov T.K. Current state of the problem of the stability of earth canals / T.K. Karlikhanov O.Zh. Kuanysbaev, G.T. Daldabaeva // Science and new technologies. 2013. № 1. P. 33-36. EDN: VZJQJJ

14. Pogodin N.N. Cleaning of linear hydraulic structures from siltation by hydrodynamic method / N.N. Pogodin, A.S. Anzhenkov, V.A. Bolbyshko // Land reclamation. 2019. № 1(87). P. 5-11.

15. Oskirko L.N. Comparative analysis of digital relief models of reclamation objects obtained by various aerial photo topographic methods / L.N. Oskirko, V.M. Makoe, O.G. Bondarchuk // Melioration. 2023. № 4(106). P. 14-23.

16. Rakitskiy A.I. Hydraulic calculation of an open canal in the HEC-RAS environment / A.I. Rakitskiy // Melioration. 2022. № 4(102). P. 30-38.

Об авторах

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

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

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

About the authors

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

Serik K. Toigambayev, DSc (Eng), professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment; ResearcherID Web of science jry-8643-2023; Scopus ID: 57221221969; RSCI authorid: 753942; kokibaewich@yandex.ru

Khamzat A. Abdulmashidov, DSc (Eng), associate professor, Web of Science ResearcherID AAE-5817-2022; Scopus Author ID: 57224176106; AuthorID: 756348; abdulmajidov@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Карапетян М.А., Тойгамбаев С.К., Абдулмажидов Х.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no 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 at the editorial office 11.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after review and revision 01.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 01.04.2025

Karapetyan M.A., Toigambayev S.K., Abdulmashidov Kh.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have copyright for the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-45-52>

УДК 631.67:631.347:621.65:502/504



СПОСОБЫ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ ПРИ ПОЛИВЕ МНОГООПОРНЫМИ ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

Н.Ф. Рыжко^{1✉}, С.Н. Рыжко¹, Е.С. Смирнов¹, Е.А. Шишенин¹, С.А. Хорин²

¹Федеральное государственное научное бюджетное учреждение «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации»; 413123, Саратовская обл., Энгельский район, р.п. Приволжский, ул. Гагарина, 1, Россия

²Общество с ограниченной ответственностью «АгроТехСервис»; Саратовская обл., г. Маркс, пр. Ленина, 64, Россия

Аннотация. Цель исследований – оценить техническое состояние насосных станций в Саратовской области, затраты электроэнергии на полив и определить наиболее эффективные способы снижения ее потребления. Исследованиями установлено, что диапазон затрат электроэнергии на подачу 1000 м³ насосными станциям изменяется в широких пределах: от 475-668 кВт · ч при использовании высоконапорных насосов (Д1250-125; QVD), работающих при давлении 1-1,25 МПа до 184-214 кВт · ч, при использовании насосов Д1250-63; Д500-65. Экономия электроэнергии на насосной станции с высоконапорными насосами при внедрении низконапорных дождевальных машин и увеличении числа одновременно работающих машин составляет 21-41%. Замена высоконапорных насосов на насосы 200Д90, работающие при давлении 0,8-0,9 МПа, снижает потребление электроэнергии на насосной станции до 266 кВт · ч (до 78%). Значительная экономия в 1,8-2,2 раза достигается при проведении на орошаемом участке модернизации и установке низконапорных дождевальных машин и насосов, работающих при давлении 0,5-0,65 МПа. Лучшие результаты дает применение низконапорного насосного агрегата с частотным регулированием оборотов электродвигателя, при этом затраты на подачу воды уменьшаются до 184-198 кВт · ч. Экономии электроэнергии будет способствовать внедрение организационных мероприятий: четкое планирование работы ДМ с возможностью работы насосных агрегатов в оптимальном режиме; улучшение организации их эксплуатации; обеспечение одновременного завершения полива орошаемых участков для ДМ, имеющих различную длину и модификацию; внедрение регулирования расхода воды машин.

Ключевые слова: орошаемый участок, насосный агрегат, затраты электроэнергии, низконапорные дождевальные машины, энергосберегающие насосы

Формат цитирования: Рыжко Н.Ф., Рыжко С.Н., Смирнов Е.С., Шишенин Е.А., Хорин С.А. Способы экономии электроэнергии на насосных станциях при поливе многоопорными дождевальными машинами // Природообустройство. 2025. № 3. С. 45-52. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-45-52>

Scientific article

WAYS TO SAVE ENERGY AT PUMPING STATIONS WHEN IRRIGATING WITH MULTI-SUPPORT SPRINKLERS

N.F. Ryzhko^{1✉}, S.N. Ryzhko¹, E.S. Smirnov¹, E.A. Shishenin¹, S.A. Khorin²

¹Federal State Scientific Budgetary Institution «Volzhsky Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation», 413123, Saratov region, Engels district, w.s.Privolzhsky, st. Gagarin, 1, Russia

²413092, Limited liability company «AgroTechService», Saratov Region, Marks, Lenin Ave., 64, Russia

Abstract. The purpose of the study is to assess the technical condition of pumping stations in the Saratov region, energy costs for irrigation and determine the most effective ways to reduce its consumption. Research has established that the range of electricity costs for supplying 1000 m³ by pumping stations varies widely from 475-668 kWh when using high-pressure pumps (D1250-125, QVD) to 184-214 kWh. when using low-pressure pumps D1250-63; D500-65. Energy savings at pumping stations with a high-pressure pumping unit when introducing low-pressure sprinklers and increasing the number of simultaneously operating machines is 21-41%. Replacing high-pressure pumps with pumps operating at a pressure of 0.8-0.9 MPa reduces electricity consumption at the pumping station to 266 kWh (78%). Significant savings of 1.8-2.2 times are achieved when the irrigated area is modernized and installed with low-pressure sprinklers, and low-pressure pumps are installed at the pumping station, and the pressure at the pumping station is reduced from 1-1.25 MPa to 0.5-0.65 MPa. The best results are obtained by using a low-pressure pumping unit with frequency control of electric motor speed, while the cost of water supply is reduced

to 184-198 kWh. Energy savings will be facilitated by the introduction of organizational measures – clear planning of the DM operation so that the pumping units operate in optimal mode, improvement of the organization of operation, ensuring the simultaneous completion of irrigation of irrigated fields for DM having different lengths and modifications, the introduction of the ability to regulate the water consumption of machines.

Keywords: irrigated area, pumping unit, energy costs, low-pressure sprinklers, energy saving pumps

Format of citation: Ryzhko N.F., Ryzhko S.N., Smirnov E.S., Shishenin E.A., Khorin S.A. Ways to save energy at pumping stations when irrigating with multi-support sprinklers // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 45-52. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-45-52>

Введение. Орошаемые земли являются одним из важнейших факторов стабильного производства в сельском хозяйстве и обеспечения продовольственной безопасности страны [1]. Саратовская область находится в зоне рискованного земледелия, где без орошения сложно получать высокие и стабильные урожаи [2]. В области уделяется большое внимание возрождению орошаемых земель. За последние годы в Саратовской области благодаря субсидиям стабильно проводятся работы по модернизации существующих и строительству новых орошаемых участков. В 1987 г., в период максимального орошения, в области эксплуатировалось 7907 дождевальных машин, 87,4% из которых приходилось на широкозахватные машины типа «Фрегат», «Волжанка» и «Днепр» [3]. Для подачи воды на полив использовались в основном высоконапорные насосы Д1250-125, QVD и др., которые создавали давление на насосной станции порядка 0,9-1,0 МПа, а затраты электроэнергии на подачу 1000 м³ воды находились на уровне 475-668 кВт · ч [4, 5]. При включении и отключении дождевальных машин в закрытой сети наблюдаются значительные колебания давления – до 1,6-2,4 МПа [6], что приводило к частым порывам трубопровода, простоям на ремонт и недобору урожая.

В конце 80-х гг. в нашей стране были начаты работы по снижению энергоемкости полива, для чего разработан ряд низконапорных ДМ «Фрегат» и налажено производство низконапорных электрифицированных машин «Кубань» [4]. В ВолжНИИГиМ были разработаны и широко внедрялись ДМ «Фрегат» с дополнительным полиэтиленовым трубопроводом, подающим воду в гидроприводы тележек, которые обеспечивали снижение давления на входе машины до 0,35-0,45 МПа [4]. Также была проведена модернизация на увеличение скорости движения низконапорных ДМ «Фрегат», в том числе на машинах с гидроцилиндрами диаметром 152 мм [4].

Процесс реконструкции орошаемых участков требует значительных финансовых и трудовых затрат и занимает продолжительное время.

При этом работы по энергосбережению всегда начинаются с модернизации машин на низконапорный режим работы или внедрение новых электрифицированных низконапорных машин – так обеспечивается частичная реконструкция орошаемых участков. Также одновременно во многих хозяйствах проводится замена предельно изношенных стальных труб на новые – полиэтиленовые или стеклопластиковые. Анализ орошаемого участка 41, используемого в Саратовской области, показал, что доля высоконапорных насосных станций, подающих воду на высоконапорные ДМ «Фрегат», сократилась до 7%, однако еще имеются законсервированные насосные станции. Доля орошаемых участков, где проведена частичная реконструкция (только модернизация машин без замены насосов), увеличилась до 39%. Доля орошаемых участков, где проведена полная реконструкция с внедрением низконапорных дождевальных машин и энергосберегающего насосного оборудования, увеличилась до 53,6%.

Анализ энергоемкости полива показывает, что имеются значительные резервы экономии электроэнергии на полив не только на не полностью реконструируемых участках орошения, но и в случае полной реконструкции, если допущены ошибки при проектировании и эксплуатации.

Для эффективного использования орошаемых земель необходимо не только работать над повышением урожайности и качества сельскохозяйственных культур, но и находить способы экономии электроэнергии на насосных станциях [4, 7-9], при поливе многоопорными дождевальными машинами.

Материалы и методы исследований.

При оценке технического состояния орошаемых участков и энергоемкости полива выделены три группы участков. Первую группу составляют участки, в которых реконструкция не проведена (НС-А; НС-«Роса» и др.), во вторую группу вошли участки, где реконструкция проведена частично (НС-2, 3, 4, 6 и 10 Энгельсской ОС,

НС-47п, 4п, 11п, 43а, 43б Приволжской ОС и др.). Третью группу составили участки, где реконструкция проведена полностью (НС-41п, 42п, 2п, 3п, 46п, 5п, 10п, 22п, БКНС-Б, БКНС-3 на Приволжской ОС и др.). Потребляемая мощность (N , кВт) на подачу воды насосом зависит от расхода воды и напора и определяется по формуле [10]:

$$N = QH H / 102 \eta_n \cdot \eta_o, \quad (1)$$

где Q_H – расход воды насоса, л/с; H – напор на выходе насоса, м. вод. ст.; 102 – переводной коэффициент; η_n и η_o – коэффициенты полезного действия насоса и электродвигателя.

Удельные затраты электроэнергии на подачу 1000 м³ воды рассчитываются по формуле:

$$N_y = 0,0272 H / \eta_n \cdot \eta_o; \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{тыс. м}^3. \quad (2)$$

Для определения фактических удельных затрат электроэнергии на подачу 1000 м³ воды ($N_{\text{уф}}$, кВт · ч на тыс. м³) учитывались данные фидеров потребления электроэнергии за 1 ч работы насосной станции ($Nэ$, кВт · ч) и суммарного расхода воды дождевальных машин ($Q_{\text{дм}}$, тыс. м³/ч):

$$N_{\text{уф}} = Nэ / Q_{\text{дм}}. \quad (3)$$

Для настройки низконапорных дождевальных машин «Фрегат», «Каскад» и др. на требуемый расход воды при меньшем напоре и для обеспечения стандартной водоподдачи нами разработаны карты настройки дождевальных насаждений.

Для оценки энергоёмкости полива, исключения ошибок при проектировании и определения оптимальных параметров насосов, дождевальных машин и труб закрытой сети и для минимизации затрат на полив нами разработана методика его расчета. Расчет энергоёмкости полива производится исходя из площади орошаемого участка, числа дождевальных машин и набора сельскохозяйственных культур, по которым определяется гидромодуль орошаемого участка. Далее производится предварительный расчет расхода воды и напора на входе каждой машины, расчет диаметров трубопровода, выбираются предварительные расходно-напорные характеристики насосов. При использовании близких паспортных характеристик насосов проводится корректировка характеристик каждой машины, выполняется окончательный расчет диаметров трубопровода и затрат электроэнергии на подачу 1000 м³ воды. Такая методика позволила выявить ошибки при проектировании и проведении реконструкции на ряде орошаемых участков и разработать предложения по снижению энергоёмкости полива.

Результаты и их обсуждение. Анализ работы подкачивающих насосных станций

на Приволжской и Энгельсской ОС в 2019 г., приведенный в таблице 1, показывает, что энергозатраты на полив при использовании высоконапорных насосных агрегатов и только стандартных ДМ «Фрегат» большие и изменяются в пределах 489-658 кВт · ч (НС-43а; НС-А). На НС-А в 2024 г. один насос обеспечивал подачу только на три ДМ «Фрегат» марки ДМ-335-58, при этом затраты электроэнергии на подачу 1000 м³ воды имели высокие значения: $N_{\text{уф}} = 668$ кВт·ч, работа двух насосов обеспечила подачу на 6 машин, а величина $N_{\text{уф}} = 589$ кВт·ч. При подключении максимального количества ДМ, работающих на давлении 0,55-0,6 МПа («Фрегат» и Zimmatic), затраты на подачу 1000 м³ воды уменьшаются незначительно – до 461-495 кВт · ч (НС-43б; НС-1).

При частичной реконструкции орошаемого участка на НС № 2 в ООО «Наше дело» сотрудниками ВолжНИИГиМ внедрены низконапорные ДМ «Фрегат», которые работают при низком давлении 0,37-0,45 МПа [4, 11], при этом затраты электроэнергии уменьшены до 448 кВт · ч (41%). Если до модернизации в 2015 г. здесь два насосных агрегата Д1250-125 с электродвигателем мощностью 630 кВт обеспечивали полив только 7-8 высоконапорных ДМ «Фрегат», то после перевода машин на низкий напор в 2016 г. одновременный полив производили уже 10 машин (табл. 2). Максимальный расход воды двух агрегатов увеличился с 600-630 до 680-720 л/с.

Если до модернизации при эксплуатации ДМ «Фрегат» в высоконапорном режиме в 2015 г. межполивной период составлял 16-18 дней, машины работали поочередно в три этапа, то после модернизации машин в 2016 г. цикл полива ДМ «Фрегат» на орошаемом участке состоял из поочередной работы двух групп машин – по 10 машин (табл. 2). Давление на насосной станции составляло 0,8 МПа, на входе машины в зависимости от места ее расположения – 0,4-0,6 МПа. Время полного цикла для полива всего орошаемого участка – 11-12 дней при поливной норме 300 и 410 м³/га. За время цикла полива постоянно круглосуточно работали два насосных агрегата, и только в конце цикла (1-2 дня) работал один агрегат для завершения круга оставшимися машинами. Аналогичные работы нами проведены на НС-4 и 6 Энгельсской ОС, на НС-5п Комсомольской ОС, а также на НС-47п, 11п (в ООО «Заря») и др., на Приволжской ОС.

При частичной реконструкции максимальное снижение $N_{\text{уф}}$ до 330 кВт·ч достигнуто на НС-42п при подаче воды насосом QVD с электродвигателем 400 кВт на 5 ДМ Valley. На многих орошаемых участках, где проведена частичная

Таблица 1. Затраты электроэнергии на полив ($N_{уф}$) на орошаемых участках, где реконструкция не проведена, проведена частично или полностью

Table 1. Electricity consumption for irrigation ($N_{ур}$) on irrigated areas where reconstruction has not been carried out is carried out partially or completely

Насосная станция Pumping station	Реконструкция Reconstruction	Наименование хозяйства Name of the farm	Тип насоса (дождевальная машина) Pump type (sprinkler)	Затраты электроэнергии, кВт·ч. Electricity consumption, kWh	Отработано мото/час. Worked moto/hour.	Объём поданной воды, тыс. м ³ Volume of water supplied, thousand m ³	Запущено, Нуф, кВт·час на 1000 м ³ Spent, Nuf, kWh per 1000 m ³
НС-43б	Нет no	ЗАО ПЗ «Мелиоратор» ZAO PZ Meliorator	Д 1250/125 (Фрегат) Д 1250 / 125 (Fregat)	771 539	1337	1671,25	461
НС-А	Нет no	ЗАО «АФ «Волга» ZAO AF Volga	1Д 1250/125 (Фрегат) 1Д 1250 / 125 (Fregat)	1647 434	2003	2503,75	658
ПНС-5	Нет no	ООО «Наше дело» OOO Nashe delo	250 CVA 460 (Фрегат) 250 CVA 460 (Fregat)	779 328	2238	1656,12	470
НС-43а	Нет no	ЗАО ПЗ «Мелиоратор» ZAO PZ Meliorator	Д 1250/125 (Фрегат+Zimmatic) Д 1250 / 125 (Fregat+Zimmatic)	1 263 651	2064	2580	489
НС-1	Нет no	ИП Крючков IP Kryuchkov	1Д 1250/125 (Т-Л+Фрегат) (Т-Л+Fregat)	515 540	1152	1041,5	495
НС-2	Частично Partially	ООО «Наше дело» OOO Nashe delo	1Д 1250/125 (Фрегат-Н) 1Д 1250 / 125 (Fregat-H)	756 630	1204	1688,9	448
ПНС-4а	Полная Coplete	ООО «Наше дело» OOO Nashe delo	1Д 1250/63 (Фрегат-Н+Valley) 1Д 1250 / 63 (Fregat-H+Valley)	474 326	1573	1966,25	241
БКНС-3		ЗАО «АФ «Волга» ZAO AF Volga	1Д 1250/63 (Zimmatic)	343 632	1388	1735	198

реконструкция, необходимо завершить модернизацию дождевальных машин на низкий напор и с учетом методики подобрать оптимальные параметры энергосберегающих насосов. В частности, расчеты показывают, что на НС-42п необходимо подключить ДМ Valley к имеющимся насосам Д1250-63. Это позволит снизить $N_{уф}$ с 330 до 200 кВт·ч в 1,65 раза.

Если основные насосы имеют большой расход воды (270-350 л/с), а необходим полив только одной или двух машин, то для энергосбережения необходимо использовать возможность установки разменного насоса с расходом воды 60-120 л/с. Так, в ОПХ «Красный боец» при поливе одной или двух ДМ «Фрегат» включали 1 или 2 разменных насоса CVE с расходом 60-65 л/с, а основной насос QVD с расходом воды 270-300 л/с включали при одновременном поливе 3-5 машин.

Частичная реконструкция орошаемого участка от БКНС в ООО «Березовское» при застройке ДМ «Фрегат» на низконапорный режим работы позволила обеспечить одновременный

полив трех машин от одного насоса 200Д90 вместо ранее поочередной работы одной и двух машин, при этом затраты были снижены до 266 кВт·ч. Для экономии электроэнергии на полив на некоторых насосных станциях Энгельсской ОС проведена замена высоконапорных насосов Д1250-125 и электродвигателей мощностью 630 кВт на менее энергоемкие насосы 200Д90 и электродвигатели мощностью 250 кВт (ООО «СОТ», ООО «Время 91», КФХ «Сайтов Р»). При этом удельные затраты на полив в номинальном режиме могли быть снижены с 475 до 333 кВт·ч (на 42%). Однако ошибки в выборе оптимального размера диаметра подземной трубы и полив только двух ДМ пока не позволяют получить такой результат. В настоящее время совместно с ВолжНИИГиМ решается вопрос об оптимизации работы этих насосных станций.

Полная реконструкция и внедрение низконапорных ДМ «Фрегат» конструкции ВолжНИИГиМ, ДМ «Valley» и малоэнергоемких насосов Д 1250-63 на ПНС-4а Комсомольской ОС (на орошаемом участке 900 га поливают 6 ДМ

Таблица 2. Эксплуатационные показатели полива орошаемого участка до и после перевода ДМ «Фрегат» в ООО «Наше дело» в низконапорный режим работы и экономическая эффективность

Table 2. Operational indicators of irrigation of the irrigated area before and after the transfer of SM "Fregat" to LLC "Nashe Delo" in the low-pressure mode of operation and economic efficiency

Показатели эксплуатации <i>Indicators of operation</i>	2015	2016	2017			
			1-й полив <i>1st irrigation</i>	2-й полив <i>2nd irrigation</i>	3-й полив <i>3rd irrigation</i>	4-й полив <i>4th irrigation</i>
Продолжительность полива участка, дн. <i>Duration of irrigation, days</i>	16-18	11-12	10	7	6,5	6,6
Число часов, отработанных агрегатами на насосной станции, ч. <i>Number of hours operated by the aggregates at the pumping station, h</i>	462	370	347	297	298	299
Число одновременно работающих ДМ «Фрегат», ед. <i>Number of Fregat SMs in operation at the same time, units</i>	7-8 от 2 насосов <i>7-8 from 2 pumps</i>	10 от 2 насосов <i>10 from 2 pumps</i>	10 от 2 насосов / 10 from 2 pumps 14-15 от 3 насосов / 14-15 from 3 pumps			
Максимальный расход насосной станции, л/с <i>Maximum consumption of the pumping station, l/s</i>	600-630	680-720	680-720 – 2 насоса / 2 pumps 900-1300 – 3 насоса / 3 pumps			
Максимальная суточная выработка ДМ «Фрегат», га <i>Maximum daily output of the Fregat SM, ha</i>	50-60	75-80	90-140			
Эффект от уменьшения потребления электроэнергии за 4 полива $m=300 \text{ м}^3/\text{га}$, млн руб. <i>Effect of reducing electricity consumption for 4 irrigations $m=300 \text{ m}^3/\text{ha}$, million rubles</i>	–	1,04	1,5			

«Фрегат» и 8 ДМ «Valley») позволили значительно снизить затраты электроэнергии на подачу 1000 м^3 воды до $241 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ (табл. 1).

Аналогичные результаты получены на НС-41п и 42п, где один насос Д1250-63 обеспечивал полив 5 ДМ Zimmatic, а два насоса – 10 ДМ Zimmatic, при этом затраты на полив находились в пределах $184\text{-}200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

Расчеты по разработанной методике показывают, что на отдельных орошаемых участках допущены ошибки при реконструкции, так как расход воды ДМ не соответствовал оптимальному расходу насосных агрегатов. Это имеет место на НС-2п (Приволжская ОС, северный участок, где $N_{\text{эф}} = 260 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$), НС-46п ($N_{\text{эф}} = 340 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$), ПНС-5 (Комсомольская ОС, южный участок) и др. После перенастройки ДМ на требуемый расход воды затраты на полив на этих насосных станциях могут быть снижены до $180\text{-}200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, или в 1,3-1,7 раза.

Еще более существенная экономия электроэнергии получена на БКНС 3 Приволжской ОС в ЗАО «АФ «Волга» при внедрении низконапорных ДМ «Zimmatic» и малоэнергоёмких насосов типа Д1250-63 с частотным регулированием оборотов электродвигателя. Затраты

электроэнергии на подачу 1000 м^3 воды снижены до $198 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ (табл. 1).

Удельные затраты электроэнергии на подачу 1000 м^3 воды в зависимости от марки дождевальнй машины и напора, создаваемого насосом, на Приволжской ОС за июль 2023 г. приведены в таблице 3 и представлены на рисунке.

Из данных таблицы 3 следует, что имеется эффект от проведения значительной работы по энергосбережению на поливе в агрофирме «Агроинвест». Здесь большая часть ДМ «Фрегат» заменена на современные электрифицированные дождевальные машины ферменной конструкции, работающие при низком давлении на входе ($0,2\text{-}0,4 \text{ МПа}$), а на НС № 10, № 21, № 22, на БКНС-Б, БКНС-3 и др. смонтированы низконапорные насосы типа Д1250-63, Грундфос КР122-80 и др., работающие при давлении $0,63\text{-}0,7 \text{ МПа}$. Затраты электроэнергии на подачу 1000 м^3 воды снижены до $211\text{-}230 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ (табл. 3).

Экономия электроэнергии на полив возможна только при комплексном решении вопроса о внедрении низконапорных насосов и дождевальных машин. В ЗАО ПЗ «Мелиоратор» на насосных станциях 43а, 43б, 11п и 4п по-прежнему используются высоконапорные

Таблица 3. Удельные затраты электроэнергии на подачу 1000 м³ воды в зависимости от напора, создаваемого насосом

Table 3. Specific energy consumption for the supply of 1000 m³ of water depending on the head created by the pump

Насосная станция, система Pumping station, system	Наименование хозяйства Name of the farm	Тип насоса (дождевальная машина) Pump type (sprinkler)	Давление, МПа Pressure, MPa	Объем поданной воды 1000 м ³ Volume of water supplied, thousand m ³	Затраты электроэнергии, кВт · ч Electricity consumption, kWh	Удельные затраты, кВт · ч на 1000 м ³ Specific consumption, kWh, thousand m ³
НС-А	ЗАО ПЗ «Трудовое» ZAO PZ Trudovoe	Д1250-125	1,25	930362	405042	0,435
НС-Роса		Д1250-125	1,25	1023628	481003	0,469
НС-43Б	ЗАО ПЗ «Мелиоратор» ZAO PZ Meliorator	Д1250-125	1,25	488227	231908	0,475
НС-43А		Д1250-125	1,25	750032	356265	0,475
НС-11П		Д1250-125	1,25	425225	201982	0,475
НС-4П		Д1250-125	1,25	503942	186962	0,371
БКНС-Б		1Д1250-63	0,63	813695	174863	0,214
БКНС-А	ООО «Агроинвест» OOO Agroinvest	250QVD-530	1,0	222693	78801	0,353
НС-22П		1Д1250-63	0,63	487578	103269	0,211
НС-10П		КР122-80	0,70	423610	97641	0,230
НС «Саратовка»		200Д-90	0,84	576144	438023	0,333

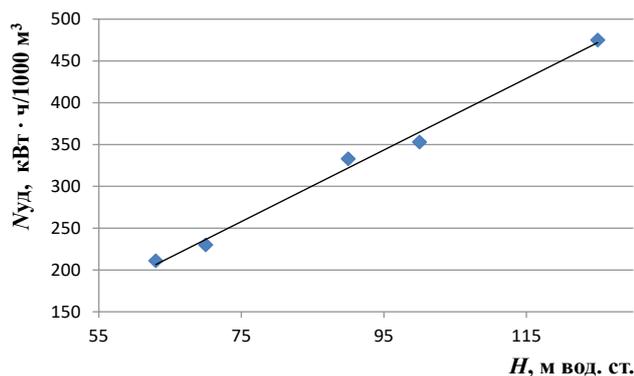


Рис. Изменение удельных затрат электроэнергии на подачу 1000 м³ воды в зависимости от напора, создаваемого насосом

Fig. 1. Change in the specific consumption of electricity for the supply of 1000 m³ of water depending on the head created by the pump

насосы Д1250-125. При этом заменены высоконапорные ДМ «Фрегат» на низконапорные электрифицированные, что обеспечило увеличение числа одновременно работающих машин и стабильность поливов в течение поливного периода. Однако удельные затраты на полив при работе в номинальном режиме остались высокими и составляют 475 кВт · ч (табл. 3).

Работы по энергосбережению в ООО «Агрофост», ООО «Агроинвест», ООО «Воскресенское» и др. находятся на передовом уровне, с использованием частотного регулирования оборотов электродвигателей, что позволяет снижать затраты электроэнергии независимо от числа

одновременно работающих дождевальных машин, так как на насосной станции всегда поддерживается требуемое постоянное давление.

К организационным мероприятиям по экономии электроэнергии на полив следует отнести четкое планирование и расчет числа одновременно работающих дождевальных машин, чтобы насосные агрегаты работали в оптимальном режиме. На орошаемом участке, где еще работают ДМ «Фрегат», «Каскад», необходимо использовать возможность регулирования расхода воды и производительности на одновременное завершение полива машинами различной модификации или в случае, если на одной из машин произошел отказ и простой составляет несколько часов.

В последнее время в Саратовской области вводятся в эксплуатацию новые орошаемые участки, где выполняется полная реконструкция, на которых внедряются низконапорные дождевальные машины и энергосберегающие насосы, а также используется частотное регулирование оборотов электродвигателя. Это обеспечивает снижение затрат электроэнергии на подачу 1000 м³ воды до 184-210 кВт · ч, исключение порывов закрытой оросительной сети, стабильную подачу воды к растениям по потребности и получение устойчиво высоких урожаев независимо от погодных условий. Доля передовых энергосберегающих орошаемых участков постоянно увеличивается, что позволяет совершенствовать мелиоративный комплекс и повышать эффективность его работы.

Выводы

1. Анализ работы подкачивающих насосных станций, подающих воду на полив многоопорными дождевальными машинами, показывает, что затраты электроэнергии на подачу 1000 м^3 изменяются в значительных пределах (от 184 до 475-658 кВт · ч) и определяются в основном давлением на выходе насоса. В Саратовской области имеется еще большое число насосных станций, построенных в 70-80-е гг. прошлого столетия, которые отличаются большой энергоемкостью подачи воды (475-658 кВт · ч), так как высоконапорные изношенные насосы при подаче воды на высоконапорные ДМ «Фрегат» работают не в оптимальном режиме при высоком давлении (1,0 МПа) и не обеспечивают включения проектного числа машин.

2. Частичная реконструкция орошаемых участков с высоконапорными насосами при внедрении низконапорных ДМ «Фрегат», «Каскад», «Кубань» и др. позволяет: увеличить число одновременно работающих машин до проектного значения и больше – до 0,5-1 машины на каждый агрегат; повысить водоподачу насосных станций на 5-10%; снизить время полива орошаемого участка на 4-5 дней; повысить дневную выработку машин. Удельные затраты электроэнергии при этом снижаются с 589-668 до 417-448 кВт · ч (для насосов Д1250-125) и до 330 кВт · ч (для насосов QVD).

3. Снижение затрат электроэнергии на полив обеспечивает замена высоконапорных

насосных агрегатов марки Д1250-125, работающих при давлении 1,0 МПа, на насосы с меньшим давлением (0,8-0,9 МПа марки 200Д90 и др.) и электродвигателями меньшей мощностью – 200-250 кВт. В ООО «Березовское» это позволило снизить удельные затраты электроэнергии на полив до 266 кВт (на 78%). Если основные насосы имеют большой расход воды (270-350 л/с), а необходим полив только одной или двух машин, то для энергосбережения необходимо использовать возможность установки разменного насоса с расходом воды 60-120 л/с.

4. Полная реконструкция орошаемого участка обеспечивает максимальное снижение затрат электроэнергии на полив (1,8-2,2 раза) при внедрении на насосных станциях энергосберегающих насосов марки Д1250-63, Д500-65 и др. и низконапорных дождевальных машин. При этом удельные затраты электроэнергии снижаются до 184-210 кВт. Частотное регулирование оборотов электродвигателей энергосберегающих насосов на таких орошаемых участках позволяет снизить удельные затраты на подачу 1000 м^3 воды до 180-198 кВт.

К организационным мероприятиям по снижению потребления электроэнергии на полив относятся: четкое планирование работы дождевальных машин и насосных агрегатов в оптимальном режиме; обеспечение одновременного завершения полива орошаемого участка для ДМ различных модификаций; улучшение организации их эксплуатации; регулирование расхода воды дождевальных машин.

Список использованных источников

1. Мелиоративный комплекс Российской Федерации: Информационное издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 304 с.
2. Нагорый В.А. Основы водосбережения при орошении в Саратовской области: Монография. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2001. 153 с.
3. Рьжко Н.Ф. Совершенствование дождеобразующих устройств для многоопорных дождевальных машин: Монография. Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2009. 176 с.
4. Рьжко Н.Ф. Совершенствование дождевальных машин и устройств для мелиоративного комплекса: Научно-практическое издание / Н.Ф. Рьжко, С.Н. Рьжко, Е.С. Смирнов, Е.А. Шишенин, Б.Н. Бельтиков. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 124 с.
5. Рычагов В.В., Флоринский М.М. Насосы и насосные станции. Учебник. М.: «Колос», 1975. 416 с.
6. Яковлев Н.П. Результаты исследований гидравлического удара в закрытой оросительной сети при групповой работе дождевальных машин «Фрегат» / Н.П. Яковлев, С.С. Сяткин // Мелиоративное состояние орошаемых

References

1. The reclamation complex of the Russian Federation: inform. edition. M.: FSBI "Rosinformagrotech", 2020. 304 p.
2. Nagoryi V.A. Fundamentals of water conservation in irrigation in the Saratov region: monograph. Saratov: Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, 2001. 153 p.
3. Ryzhko N.F. Improvement of rain-forming devices for multi-support sprinkler machines: monograph. Saratov, FGOU VPO "Saratov GAU". 2009. 176 p.
4. Ryzhko N.F. Improvement of Sprinklers and Devices for Amelioration Complex: scientific and practical ed. N.F. Ryzhko, S.N. Ryzhko, E.S. Smirnov, E.A. Shishenin, B.N. Beltikov – Moscow: Rosinformagrotech, 2023. 124 p.
5. Rychagov V.V. Pumps and pumping stations / V.V. Rychagov, M.M. Florinsky: Textbooks and teaching aids for higher agricultural educational institutions. Moscow: "Kolos", 1975. 416 p.
6. Yakovlev N.P. Results of studies of hydraulic shock in a closed irrigation network during group operation of sprinklers "Frigate"/N.P. Yakovlev, S.S. Syatkin / Meliorative state of irrigated lands of the Volga region and their effective usage: collection of scientific tr. / Volzhniigim. M.: 1984. P. 49-57.

земель Поволжья и их эффективное использование: Сборник научных трудов. М.: ВолжНИИГиМ, 1984. С. 49-57.

7. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках: Монография. М.: Ягорба: Биоинформсервис, 1998. 180 с.

8. Pete Noll. Determining the real cost of powering a pump // World Pumps. 2008. V. 2008. № 496. Pp. 32-34.

9. Kubic A.W., McEwan K.H. Adjustable speed Pumps for Utilities // Journal American Water Works Association. 1961. V. 53, № 2. P. 146-154.

10. Вишневецкий К.П., Подлас А.В. Проектирование насосных станций закрытых оросительных систем: Справочник. М.: ВО «Агропромиздат», 1990. 93 с.

11. Дождевальная машина: Патент 180447. Российская Федерация, МПК А01G 25/09 / Рыжко Н.Ф., Рыжко С.Н., Рыжко Н.В., Ботов С.В., Хорин С.А.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «ВолжНИИГиМ». № 2017139807. Заявл. 15.11.2017; Опубл. 14.06.2018, Бюл. № 17.

Об авторах

Николай Федорович Рыжко, д-р техн. наук, заведующий отделом; <https://orcid.org/0009-0006-6352-8832>; ryzhkonf@bk.ru

Сергей Николаевич Рыжко, канд. техн. наук, научный сотрудник; <https://orcid.org/0009-0006-6352-8832>; volzniigim@bk.ru

Евгений Станиславович Смирнов, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; <https://orcid.org/0009-0002-6499-8378>; volzniigim@bk.ru

Евгений Александрович Шишенин, младший научный сотрудник; <https://orcid.org/0009-0007-2310-9104>; volzniigim@bk.ru

Сергей Александрович Хорин, директор ООО «Агро-ТехСервис»; horin555@yandex.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Рыжко Н.Ф., С.Н. Рыжко, Е.С. Смирнов, Е.А. Шишенин, С.А. Хорин выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / The authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Статья поступила в редакцию / The article was received by the editorial office on 10.12.2024;

поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review and revision on 21.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication on 21.04.2025

7. Leznov B.S. Energy saving and adjustable drive in pumping units. monograph. M.: Yagorba: Bioinformservice, 1998. 180 p.

8. Pete Noll. Determining the real cost of powering a pump // World Pumps. 2008, vol. 2008. № 496. P. 32-34.

9. Kubic A.W., McEwan K.H. Adjustable speed Pumps for Utilities // Journal American Water Works Association. 1961. v. 53. № 2. P. 146-154.

10. Vishnevsky K.P. Design of pumping stations of closed irrigation systems: Directory / K.P. Vishnevsky, A.V. Podlas M., VO "Agropromizdat", 93 p.

11. Sprinkler machine: pat. 180447 Ros. Federation, IPC A01G 25/09 / Ryzhko N.F., Ryzhko S.N., Ryzhko N.V., Botov S.V., Khorin S.A.; applicant and patent holder of FGBNU "Volzhniigim" – No. 2017139807; application 15.11.2017; publ. 14.06.2018, Bul. No. 1.

About the authors

Nikolay F. Ryzhko, DSc (Eng), Head of Department, <https://orcid.org/0009-0006-6352-8832>; ryzhkonf@bk.ru

Sergei N. Ryzhko, CSc (Eng), Researcher, <https://orcid.org/0009-0006-6352-8832>; volzniigim@bk.ru

Evgeniy S. Smirnov, CSc (Eng), Senior researcher, <https://orcid.org/0009-0002-6499-8378>; volzniigim@bk.ru

Evgeniy A. Shishenin, Junior Researcher, <https://orcid.org/0009-0007-2310-9104>; volzniigim@bk.ru

Sergey A. Khorin, Director of AgroTechService LLC.; horin555@yandex.ru

N.F. Ryzhko, S.N. Ryzhko, E.S. Smirnov, E.A. Shishenin, S.A. Khorin performed practical and theoretical research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote a manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-53-62>

УДК 627.8 (470.40)



КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОУЗЛА НА РЕКЕ МАЛЫЙ ЧЕМБАР В ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

А.П. Акпасов[✉], М.И. Морозов, Д.А. Греков, М.Е. Кадомцева, Р.Б. Туктаров

Федеральное государственное научное учреждение «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации»; 413123, Саратовская область, г. Энгельс-23, Рабочий поселок Приволжский, ул. Гагарина, 1, Россия

Аннотация. Цель исследований – комплексная оценка фактического технического состояния узла гидротехнических сооружений водохранилища на реке Малый Чембар в Пензенской области и его основного оборудования, определение остаточного ресурса элементов, а также установление дефицитов безопасности для оценки возможности продолжения эксплуатации ГТС сверх назначенного срока эксплуатации. Проведено детальное исследование состояния гидроузла (включая земляную плотину, водосбросные сооружения и донные водовыпуски) с целью определения остаточного ресурса их элементов и выявления дефицитов безопасности. В ходе визуального и инструментального обследования были выявлены значительные дефекты – такие, как просадки гребня плотины, коррозия бетона, неработоспособность гидромеханического оборудования и заиливание дна водосбросного сооружения. Результаты исследований показали, что гидроузел находится в предельном (аварийном) состоянии, что требует немедленного проведения капитального ремонта для предотвращения возможных аварийных ситуаций. Подчеркивается необходимость усиления тела плотины, восстановления работоспособности водовыпусков и разработки аварийного плана действий. Исследование также включает в себя расчеты пропускной способности водосбросных сооружений и фильтрационных характеристик грунтовой плотины, что позволило оценить текущие риски и предложить меры по улучшению состояния гидротехнического объекта.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, техническое состояние, мониторинг, факторы, дефекты

Формат цитирования: Акпасов А.П., Морозов М.И., Греков Д.А., Кадомцева М.Е., Туктаров Р.Б. Комплексная оценка технического состояния гидроузла на реке Малый Чембар в Пензенской области // Природообустройство. 2025. № 3. С. 53-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-53-62>

Scientific article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE HYDRAULIC STRUCTURE ON THE MALY CHEMBAR RIVER IN THE PENZA REGION

A.P. Akpasov[✉], M.I. Morozov, D.A. Grekov, M.E. Kadomtseva, R.B. Tuktarov

Federal State Scientific Institution “Volzhsky Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation”; 413123, Engels-23, Saratov Region, Rabochy Posyolok Privolzhsky, Gagarin Street, 1, Russia

Abstract. The article is devoted to a comprehensive assessment of the technical condition of a hydraulic structure on the Maly Chembar River in the Penza Region. A detailed study of the hydraulic unit's condition was conducted, including the earthen dam, spillway structures, and bottom outlets, to determine the residual resource of their components and identify safety deficiencies. During visual and instrumental inspections, significant defects were identified, such as subsidence of the dam crest, concrete corrosion, malfunction of hydraulic equipment, and siltation of the spillway bottom. The results of the study showed that the hydraulic structure is in a critical (emergency) condition, requiring immediate major repairs to prevent potential accidents. The need to strengthen the dam body, restore the functionality of the outlets, and develop an emergency action plan is emphasized. The study also includes calculations of the spillway

capacity and filtration characteristics of the earthen dam, which allow for an assessment of current risks and propose measures to improve the condition of the hydraulic structure.

Keywords: monitoring, technical condition, hydraulic structure, factors, defects

Format of citation: Акпасов А.П., Морозов М.И., Греков Д.А., Кадомцева М.Е., Туктаров Р.Б. Comprehensive assessment of the technical condition of the hydraulic structure on the Maly Chembar River in the Penza Region // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 53-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-53-62>

Введение. Обеспечение безопасности гидротехнических объектов и поддержание их функциональной надежности – ключевая задача на всех этапах жизненного цикла сооружений. Проектировщики и эксплуатационные службы несут ответственность за сохранение работоспособности конструкций, предотвращение аварийных ситуаций и минимизацию рисков деградации объектов. Изменения природно-техногенных условий региона, на территории которого расположено гидротехническое сооружение (ГТС), могут стать триггерами, ведущими к ускоренному ухудшению его технического состояния [1, 2]. Особую опасность представляет износ отдельных элементов: критическое ухудшение их состояния способно привести не только к экстренному выводу сооружений из эксплуатации, но и к масштабным техногенным катастрофам [3]. Вместе с тем последствия глобальных климатических изменений вносят существенные коррективы в условия эксплуатации объектов [4, 5]. В этой связи особое внимание должно уделяться мониторингу состояния гидротехнической системы. Крайне важно регулярно осуществлять комплексную оценку безопасности технического состояния [6], остаточного ресурса работоспособности гидротехнических сооружений, так как их повреждение может стать триггером цепных аварийных процессов.

Объектом исследований является узел гидротехнических сооружений водохранилища, территориально расположенный на реке Малый Чембар на территории Белинского района Пензенской области. Водохранилище представляет собой типичный пример объекта III класса

ответственности, фактический срок эксплуатации которого – 44 года при нормативном сроке 50 лет. Основное назначение – сельское хозяйство, а именно регулирование стока реки и орошение земель.

Комплекс включает в себя такие сооружения, как земляная плотина (высота – 12 м, длина – 529 м), открытый водосброс (пропускная способность $87,5 \text{ м}^3/\text{с}$), два донных водовыпуска (суммарный расход – $2,0 \text{ м}^3/\text{с}$). Водосбросное сооружение, выполненное по типовому проекту 820, предназначено для пропуска паводковых вод. Оно состоит из двух параллельных водосбросов с расходом $42 \text{ м}^3/\text{с}$, каждый построен из сборно-монолитного железобетона. Конструкция включает в себя входной оголовок докового типа с 6 водопропускными отверстиями шириной 3 м, оснащенными скользящими затворами на ручных винтовых приводах. От оголовка вода поступает на быстроток – лоток прямоугольного сечения, разделенный по длине температурно-осадочными швами. В теле плотины размещены два донных водовыпуска, обеспечивающих водозабор для орошения и возможность полного опорожнения водохранилища при одновременной работе. Оборудованные задвижками, они управляются из колодцев, расположенных в нижнем бьефе (рис. 1).

Вдоль русла реки Малый Чембар в 4-5 км ниже плотины располагается поселок Пушанино, а в 7-8 км от гидроузла – Чернышево. Непосредственно к водохранилищу примыкает село Гусятник. Риски затопления населенных пунктов, расположенных вблизи реки, существуют, однако их



а) водосбросное сооружение. Вид с верхнего бьефа
а) Spillway structure. View from the upper pool



б) водосбросное сооружение. Вид с нижнего бьефа
б) Spillway structure. View from the lower pool

Рис. 1. Общий вид плотины, ноябрь 2024 г.

Fig. 1. General view of the dam, November 2024

вероятность и масштабы зависят от ряда факторов. Регион относится к зоне умеренно-континентального климата (среднегодовая температура составляет $+5,1^{\circ}\text{C}$) с выраженной сезонностью: холодной зимой (III снеговой район) и умеренно жарким летом. Неблагоприятные физико-геологические процессы и явления на территории не наблюдаются за исключением возможности подтопления поймы доли в паводковый период и период выпадения обильных атмосферных осадков. Количество атмосферных осадков в течение года и в многолетнем ходе колеблется в больших пределах. Основной риск связан с весенним половодьем и неравномерным распределением осадков. Водохранилище «Гусятник» регулирует сток, но при аномальных паводках (превышающих проектные параметры) возможны перелив через гребень плотины или недостаточная пропускная способность водосброса. Износ металлических элементов (донные водовыпуски, затворы) и дренажной системы повышает вероятность аварийных сценариев – например, размыва тела плотины.

Цель исследований: комплексная оценка фактического технического состояния узла гидротехнических сооружений водохранилища на реке Малый Чембар в Пензенской области и его основного оборудования, определение остаточного ресурса элементов, а также установление дефицитов безопасности для оценки возможности продолжения эксплуатации ГТС сверх назначенного срока эксплуатации.

Материалы и методы исследований. Исследования базируются на данных Декларации безопасности ГТС, архивных материалов гидрогеологических изысканий и действующих нормативных документов в Российской Федерации [7].

Методология исследований включает в себя: натурные показатели и полное описание общих сведений о гидротехническом сооружении; характеристику природных условий, на территории которой располагается объект, в том числе топографические и гидрогеологические сведения; оценку инженерно-геологических параметров; расчет пропускной способности узла гидротехнических сооружений; фильтрационный расчет грунтовой плотины.

Освидетельствование элементов конструкций сооружений осуществлялось путем анализа, сопоставления предоставленной документации с данными визуального осмотра и инструментальных измерений с использованием программных комплексов («EngGeo» v.4.4.) и современных технических средств (GNSS приемник EFT

M3 plus GNSS, контроллер EFT H5, лазерный сканер TOPODRONE и однолучевой эхолот). Полученные данные были обработаны с использованием математико-статистических методов.

Оценка фактического состояния гидротехнического сооружения осуществлялась с использованием методов, основанных на применении интегральных, комплексных показателей, с определением пределов пороговых и допустимых изменений [8-10].

Результаты и их обсуждение. В ходе проведенных визуальных обследований гидротехнического сооружения были выявлены дефекты и повреждения, а также установлены причины их возникновения. Наиболее выраженные из них приведены на рисунке 2.

В результате недостаточного уплотнения локальных объемов или прослоек грунта, уложенного в плотину, наблюдается локальное образование колеяности гребня плотины (степень повреждения – 20%), а также на железобетонных плитах проезжей части гребня плотины отмечены просадки, сколы и разрушение бетона на площади 250 м^2 . Кроме того, зафиксирован провал на берме низового откоса с выходом фильтрационного потока в нижний бьеф по оси нерабочего донного водовыпуска № 2 (6 м^2).

Повсеместное зарастание древесно-кустарниковой растительностью охватило 80% верхового откоса и 90% проводящего канала, что указывает на отсутствие регулярной расчистки.

Волновое воздействие и многолетние колебания уровня водохранилища привели к размыву креплений верхового откоса на площади 84 м^2 . Дополнительный ущерб нанесли природные факторы: температурные перепады, гидродинамические нагрузки и химическое выщелачивание бетона. Эти процессы вызвали деградацию подводящего канала (80% площади), верхних участков подпорных стенок (25%), а также коррозию бетона на стыках пролетов входного оголовка. На правой стенке быстротока было обнаружено расслоение бетона с оголенной арматурой, аналогичные дефекты выявлены между третьим и четвертым пролетами оголовка. Гидрогасители консоли быстротока изношены на 80%, а их основания подмыты, что угрожает устойчивости конструкции.

Отсутствие системного контроля усугубило ситуацию: второй пролет входного оголовка полностью зарос, а ледозащитное устройство деформировалось, получив крен в сторону плотины. Состояние затворов свидетельствует о неисправности механизмов: щиты № 1 и № 2 закрыты, № 3-№ 6 частично открыты с нарушениями



а) подъемный механизм гидромеханического оборудования отсутствует и находится в неработоспособном состоянии

a) The lifting mechanism of the hydro mechanical equipment is not available and in a non-working condition



б) сдвиг железобетонной плиты переезда водосбросного сооружения со стороны нижнего бьефа,

износ гидрогасителей консоли быстрого тока и подмыв основания консоли с оголением железобетонных свай
b) Shifting of the reinforced concrete slab of the crossing of the spillway structure from the downstream side and wear of the hydraulic dampers of the high-speed console and washing out of the base of the console with the exposure of reinforced concrete piles



в) зарастание подводящего канала водосбросного сооружения и заиленность дна быстрого тока

c) Overgrowth of the supply channel of the spillway structure and silting of the bottom of the rapid current



Рис. 2. Фотофиксация наиболее выраженных дефектов

Fig. 2. Photographic fixation of the most pronounced defects

норм (СП 421.1325800.2018) [11], а подъемное оборудование отсутствует или является неработоспособным. Дно быстрого тока заилено на 15-20 см, а затопление смотрового колодца донного водовыпуска № 1 подтверждает износ запорной арматуры. Дополнительные риски создают локальные провалы включая участок площадью 1 м² у дренажного колодца быстрого тока.

Значительное воздействие транспортных средств, переезжающих водосбросное сооружение, привело к сдвигу железобетонной плиты переезда водосбросного сооружения со стороны нижнего бьефа на 0,1 м.

В соответствии с конструктивными особенностями узла гидротехнических сооружений водохранилища и условиями эксплуатации для оценки технического состояния и определения уровня безопасности выбираются диагностические показатели, представленные в таблице 1.

Из данных таблицы 1 следует, что значения нескольких диагностических показателей состояния сооружений (К1) превышают критерильные значения (К2). Для получения комплексной оценки технического состояния гидроузла был произведен расчет пропускной способности его объектов.

Таблица 1. Сравнение значений количественных показателей безопасности по результату многофакторного обследования

Table 1. Comparison of the values of quantitative safety indicators based on the results of a multifactor survey

№ п/п	Наименование показателя Indicator name	Критериальные значения диагностических по- казателей Critical values of diagnostic indicators		Фактическое значение Actual value	Оценка Assessment
		Критериальное значение K1 Criterion value K1	Критериальное значение K2 Criterion value K2		
Земляная плотина / Earthen dam					
1	Ширина по гребню плотины, м Ridge width of the dam, m	6,0	5,5	6,0	Соответствует K1 Complies with K1
2	Отметка гребня, м Ridge elevation, m	177,05	176,55	177,0÷177,1	Необходимо провести подсыпку гребня с последующим уплотнением грунта $K1 \leq K_{\text{факт}} < K2$ It is necessary to fill the ridge with subsequent compaction of the soil $K1 \leq K_{\text{факт}} < K2$
4	Максимальная строительная высота, м Maximum construction height, m	12,0	11,6	12,0	Соответствует K1 Complies with K1
5	Длина напорного фронта плотины, м Length of the dam pressure front, m	529,0	520,0	529,0	Соответствует K1 Complies with K1
4	Заложение верхового откоса плотины Laying the upstream slope of the dam	1: 10	1: 8,5	1:10	Соответствует K1 Complies with K1
5	Заложение низового откоса плотины Laying tdownstream slope of the dam	1: 2	1: 1,5	1: 2	Соответствует K1 Complies with K1
Водосброс / Spillway					
1	Отметка нормального подпорного уровня, м Normal water level mark, m	174,55	174,0	174,3	Необходимо провести ремонт крепления входного оголовка $K1 \leq K_{\text{факт}} < K2$ It is necessary to repair the inlet head fastening $K1 \leq K_{\text{факт}} < K2$
2	Пропускная способность, м³/с Capacity, m ³ /s	87,5	87,5	37,73	Гидромеханическое оборудование находится в неработоспособном состоянии. Превышает K2 Hydromechanical equipment is inoperative. Exceeds K2
Донные водоспуски № 1 и № 2 / Bottom drains No 1 and No 2					
1	Пропускная способность, м³/с Capacity, m ³ /s	2,0	2,0	1,3	Донный водовыпуск № 2 находится в неработоспособ- ном состоянии. Превышает K2 Bottom water outlet No. 2 is inoperative. Exceeds K2

А). Расчет пропускной способности трубчатого водовыпуска № 1

Трубчатый водовыпуск работает как напорная труба, поэтому его пропускная способность определяется по формуле:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH},$$

где μ – коэффициент расхода; H – величина напора, м; ω – площадь поперечного сечения трубы, м²; g – ускорение силы тяжести, 9,81 м/с².

Коэффициент расхода определяем по формуле:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_{\text{потерь}}}},$$

где $\xi_{\text{потерь}}$ – величина потерь.

Потери напора по длине трубы определяются по формуле:

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{\lambda \cdot L}{d},$$

где $\lambda = 0,02$ для старых металлических труб; L – длина трубы донного водовыпуска (158 м)

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{0,02 \cdot 158}{0,6} = 5,3.$$

Коэффициенты потерь на вход $\xi_{\text{вх}} = 0,5$.

Коэффициенты потерь на задвижки $\xi_{\text{зад}} = 0,2$.

Сумма потерь $\Sigma \xi = 5,3 + 0,5 + 0,2 = 6,0$.

Коэффициент расхода –

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + 6}} = 0,38.$$

Площадь поперечного сечения трубы определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{4} = 0,282 \text{ м}^2.$$

Результаты расчетов пропускной способности трубчатого водовыпуска № 1 сведены в таблицу 2 и визуализированы на рисунке 3.

Пропускная способность донного водовыпуска № 1 при нормальном подпорном уровне (НПУ) составляет: $Q_{\text{НПУ}} = 1,38 \text{ м}^3/\text{с}$.

Б). При напорах воды перед сооружением, превышающих отметку верха отверстия под щитовые затворы ($H > 2,2 \text{ м}$), фактическая пропускная способность определялась, как при истечении воды из-под щита:

$$Q_{\text{факт}} = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g(H - \xi_a)},$$

где μ – коэффициент расхода, $\mu = \xi \cdot \phi$; ϕ – коэффициент скорости при вертикальном расположении плоского щита ($\phi = 0,97$); ω – площадь отверстия, $\omega = e \cdot a$, м²; a – фактическая средняя высота отверстия водосбросного сооружения ($a = 1,03 \text{ м}$); ξ – коэффициент вертикального сжатия струи ($\xi = 0,7$).

Результаты расчета сведены в таблицу 3.

По данным таблицы 3 построен график пропускной способности водосбросного сооружения (рис. 4).

Расчетные паводковые расходы $Q_{0,5\%} = 91,88 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{3,0\%} = 87,5 \text{ м}^3/\text{с}$ проходят над порогом водослива при напорах $H_{0,5\%} = 2,7 \text{ м}$ и $H_{3,0\%} = 2,2 \text{ м}$, что соответствует отметкам = 175,05 м, НПУ = 174,55 м.

В соответствии с действующей Декларацией безопасности ГТС 23-23(01)0032-13-СХЗ [12] суммарный сбросной расход через все водопропускные сооружения узла при нормальном подпорном уровне составляет 89,5 м³/с. С учетом того, что донный водовыпуск № 2 находится в неработоспособном состоянии, фактический суммарный сбросной расход через все водопропускные сооружения узла при НПУ будет составлять 39,11 м³/с, что меньше проектного на 50,4 м³/с, или 56%.

Таблица 2. Расчеты пропускной способности трубчатого водовыпуска

Table 2. Flow capacity calculations for the tubular outlet

H, м	d, м	w, м ²	μ	η	Q м ³ /с Q м ³ /с	Отметка Level У.В., m Level level
1	0,6	0,283	0,38	0,726	0,47634	166,75
2	0,6	0,283	0,38	0,726	0,67365	167,75
3	0,6	0,283	0,38	0,726	0,82505	168,75
4	0,6	0,283	0,38	0,726	0,95268	169,75
5	0,6	0,283	0,38	0,726	1,06513	170,75
6	0,6	0,283	0,38	0,726	1,16679	171,75
7	0,6	0,283	0,38	0,726	1,26028	172,75
8	0,6	0,283	0,38	0,726	1,34730	173,75
9	0,6	0,283	0,38	0,726	1,42902	174,75
10	0,6	0,283	0,38	0,726	1,50632	175,75

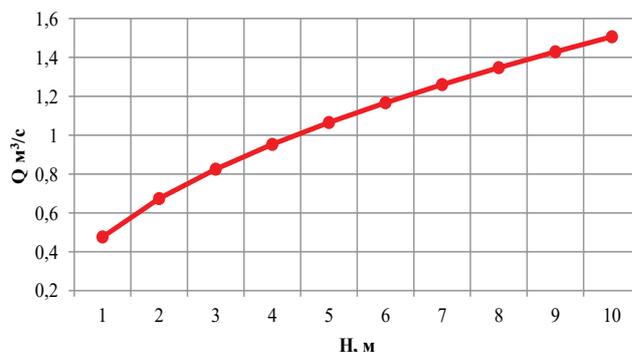


Рис. 3. График пропускной способности донного водовыпуска № 1

Fig. 3. Flow capacity graph of bottom outlet No. 1

Таблица 3. Расчеты пропускной способности донного водовыпуска № 1

Table 3. Flow capacity calculations for bottom outlet No. 1

$H, \text{ м}$	$a, \text{ м}$	$\omega, \text{ м}^2$	a/H	ξ	μ	$\sqrt{2g}$	$\sqrt{H - \xi a}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$
1,6	1,03	10,3	6,437500	0,7	0,68	4,43	0,93755	29,09004
1,8	1,03	10,3	5,722222	0,7	0,68	4,43	1,038749	32,23002
2,0	1,03	10,3	5,150000	0,7	0,68	4,43	1,130929	35,09014
2,2	1,03	10,3	4,681818	0,7	0,68	4,43	1,216141	37,7341
2,4	1,03	10,3	4,291667	0,7	0,68	4,43	1,295762	40,20455
2,6	1,03	10,3	3,961538	0,7	0,68	4,43	1,370766	42,53175
2,8	1,03	10,3	3,678571	0,7	0,68	4,43	1,441874	44,73806
3,0	1,03	10,3	3,433333	0,7	0,68	4,43	1,509636	46,84055
3,2	1,03	10,3	3,218750	0,7	0,68	4,43	1,574484	48,85265
3,4	1,03	10,3	3,029412	0,7	0,68	4,43	1,636765	50,78509

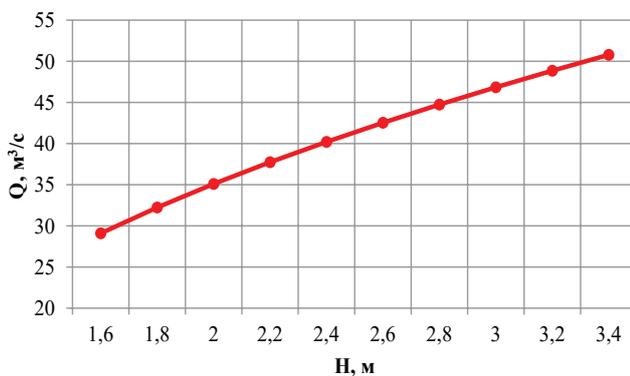


Рис. 4. График фактической пропускной способности водосбросного сооружения

Fig. 4. Actual flow capacity graph of the spillway structure

Таким образом, по результатам расчетов пропускной способности водосбросного сооружения и донного водовыпуска № 1 можно сделать вывод о том, что в случае непроведения срочных работ по капитальному ремонту узла гидротехнических сооружений присутствует высокая вероятность возникновения аварийной ситуации, при которой могут пострадать жители сел и деревень Белинского района Пензенской области.

Комплексная оценка фактического состояния ГТС включала в себя также осуществление фильтрационных расчетов грунтовой плотины вдоль оси донного водовыпуска № 1 для определения удельного и общего расхода фильтрации, положения кривой депрессии и оценки фильтрационной прочности грунтов основания и тела плотины.

При фильтрационных расчетах были приняты следующие допущения: фильтрация рассматривается в одной плоскости, грунт тела плотины считается однородно-анизотропным, водоупор считается теоретически водонепроницаемым, положение кривой депрессии не зависит от качества грунта, а определяется только геометрическими размерами тела плотины [13, 14].

Запроектированный поперечный профиль грунтовой плотины приведен к расчетной схеме (рис. 5). В верхнем бьефе за расчетный принимаем $\nabla_{\text{НПУ}} = 157,0$ м, а в нижнем бьефе бытовой уровень воды на отметке $\nabla_{\text{НБ}} = 149,80$ м, при котором будет наблюдаться установившийся расход фильтрационного потока в теле плотины.

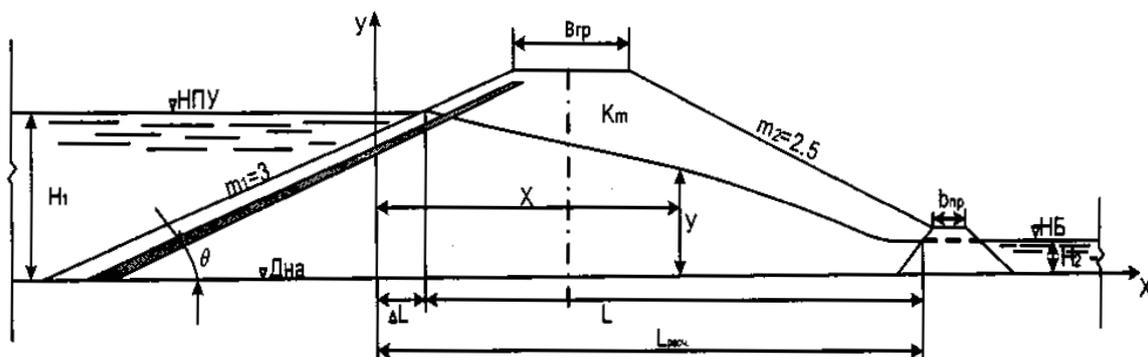


Рис. 5. Расчетная схема к фильтрационному расчету

Fig. 5. Calculation scheme for filtration calculation

Расчет выполнен в такой последовательности. Сначала было найдено положение раздельного сечения по формуле Михайлова:

$$\Delta L = \frac{m_1}{2 \cdot m_1 + 1} \cdot H_1 = \frac{10}{2 \cdot 10 + 1} \cdot 9 = 4,3 \text{ м.}$$

С использованием расчетной схемы к фильтрационному расчету определена длина проекции кривой депрессии на горизонтальную ось:

$$L = (\nabla \text{ГП} - \nabla \text{НПУ}) \cdot m_1 + B_{\text{гр}} + (\nabla \text{ГП} - \nabla \text{Др.}) \cdot m_2 - (\nabla \text{Др.} - \nabla \text{НБ}) \cdot m_3$$

$$L = (177,00 - 174,55,00) \cdot 10 + 6,0 + (177,05 - 166,35) \cdot 2 - (166,35 - 163,7,80) \cdot 2 = 47,1 \text{ м}$$

$$L_{\text{расч.}} = \Delta L + L = 4,3 + 47,1 = 51,4 \text{ м}$$

Величина удельного фильтрационного расхода q_m вычислена с использованием следующего уравнения:

$$\frac{q_m}{k_m} = \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L_{\text{расч}}} = \frac{9^2 - 1^2}{2 \cdot 51,4} = 0,78,$$

тогда $q_m = 0,78 \cdot k_m = 0,78 \cdot 0,82 = 0,64 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Положение кривой депрессии определяется с использованием уравнения:

$$Y^2 = H_1^2 - 2 \frac{q_m}{k_m} \cdot x.$$

Для построения кривой депрессии находим координаты точек, расчет сводим в таблицу 4.

По полученным координатам построена кривая дисперсии (рис. 6).

Проверка фильтрационной прочности грунтов тела плотины и основания осуществлена по значению выходного градиента:

$$I_{\text{вых}} \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{Y_{n-1} - Y_n}{x_n - x_{n-1}} = \frac{2,47 - 0,50}{51,4 - 48,0} = 0,58 \leq I_k = 0,80.$$

На основании данного расчета можно сделать вывод о том, что фильтрационная прочность грунтов тела плотины и основания обеспечена, так как выходной градиент меньше критического показателя для суглинка (0,8), из которого выполнено исследуемое сооружение.

Таблица 4. Расчет координат дисперсионной кривой

Table 4. Calculation of dispersion curve coordinates

X, м	51,4	48	45	42	39	36	33	30	27	24	21
Y, м	0,9	2,47	3,29	3,93	4,49	4,98	5,43	5,85	6,23	6,6	6,9

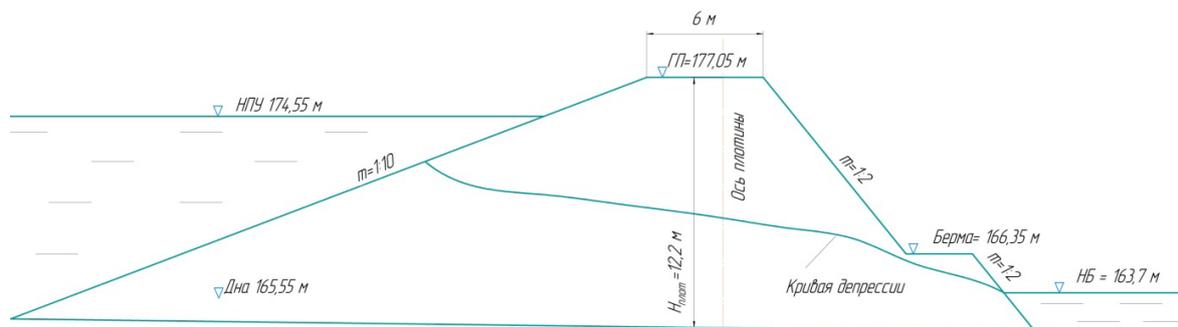


Рис. 6. Поперечный профиль грунтовой плотины вдоль оси донного водовыпуска № 1

Fig. 6. Cross-sectional profile of the earth-fill dam along the axis of bottom outlet No. 1

Выводы

По результатам визуального и инструментального обследования узел гидротехнических сооружений на реке Малый Чембар был признан находящимся в предельном (аварийном) техническом состоянии. Данное заключение обусловлено рядом критических факторов.

Во-первых, в ходе проверки выявлены существенные дефекты конструктивных элементов включая повреждения, которые напрямую влияют на безопасность и функциональность сооружений. Во-вторых, диагностические показатели водосбросного сооружения превысили допустимые значения критериев безопасности второго

уровня (К2). Особую тревогу вызывает фильтрация воды через тело плотины в зоне донного водовыпуска, что создает риск постепенного разрушения конструкции. По причине невозможности проведения предупредительной сработки водохранилища возникает угроза переполнения в период паводков. Дополнительные проблемы связаны с подтоплением смотрового колодца донного водовыпуска № 1 и полной неработоспособностью водовыпуска № 2. Это делает невозможным осуществление санитарных попусков – минимальных сбросов воды, необходимых для предотвращения заиливания и поддержания экологического баланса водоема.

С учетом вышеизложенного дальнейшая эксплуатация ГТС без проведения капитального ремонта или реконструкции является недопустимой. Для устранения аварийного состояния гидроузла требуется комплексный подход, объединяющий срочные ремонтные работы, долгосрочное планирование и системный мониторинг. Необходимо усилить тело плотины, ликвидировать фильтрационные каналы, восстановить работоспособность донных водовыпусков и провести

ремонт верхнего откоса. Ключевыми должны стать ремонтно-восстановительные мероприятия, в рамках которых должен быть осуществлен демонтаж всех 6 щитов затворов для обеспечения беспрепятственного пропуска воды в период экстремальных паводков. Без реализации перечисленных мероприятий существует риск негативных последствий, угрожающих как экосистеме водохранилища, так и безопасности населенных пунктов в прилегающей зоне.

Список использованных источников

1. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 70566-202 «Системы и сооружения мелиоративные. Правила обследования и мониторинга технического состояния»: утв. и введ. в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 декабря 2022 г. № 1522-ст.
2. Середовских Б.А. Состояние водозащитных сооружений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры для защиты населения и территорий от гидрологических опасностей / Б.А. Середовских, В.В. Дерябина, Д.А. Ярош // Природообустройство. 2024. № 4. С. 83-91. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-83-91>
3. Кузнецов Д.А. Диагностика аварийного состояния земляной плотины Камского водохранилища / Д.А. Кузнецов, Л.П. Иванова // Водное хозяйство России. 2020. № 3. С. 55-67.
4. Смирнов А.В. Оценка технического состояния водохранилищных гидроузлов в условиях климатических изменений (на примере Волжско-Камского каскада) / А.В. Смирнов, К.И. Петров // Гидротехническое строительство. 2023. № 5. С. 34-42.
5. Кадомцева М.Е. Методология оценки влияния климатических изменений на устойчивое развитие агропродовольственного комплекса. Саратов: Саратовский источник, 2024. 294 с.
6. Свод правил СП 58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения СНиП 33-01-2003». 2020. 35 с.
7. Туктаров Р.Б. Краткий обзор современной нормативно-методической базы проведения инженерно-гидрографических работ на водных объектах для целей гидромелиорации земель и пути ее совершенствования / Р.Б. Туктаров, А.П. Акпасов // Московский экономический журнал. 2023. Т. 8, № 6. DOI: 10.55186/2413046X_2023_8_6_288
8. Талалаева В.Ф. Результаты натурных обследований технического состояния гидротехнических сооружений Черноземельской обводнительно-оросительной системы / В.Ф. Талалаева, О.А. Баев // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 93, № 2. С. 1-15.
9. Финагенов О.М. Развитие методов оценки надежности гидротехнических сооружений / О.М. Финагенов, В.Б. Штильман, С.Г. Шульман, А.М. Юделевич // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 300. С. 7-20. EDN: IANMJK
10. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 59873-2021. Гидроэлектростанции. Методика определения критериев безопасности для декларируемых сооружений: введ. 1 января 2022 г. М.: Стандартинформ, 2021. 24 с.

References

1. National standard of the Russian Federation GOST R70566-2022 “Reclamation systems and structures. Rules of inspection and monitoring of technical condition” (approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 16, 2022 No. 1522-st)
2. Seredovskikh B.A., Deryabina V.V., Yarosh D.A. (2024). Condition of water protection structures in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra for protecting the population and territories from hydrological hazards. Prirodoobustrojstvo No. 4, P. 83-91. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-83-91>
3. Kuznetsov D.A., Ivanova L.P. (2020). Diagnostics of the emergency condition of the earth-fill dam of the Kama Reservoir. Vodnoe Khozyaistvo Rossii No. 3, P. 55-67.
4. Smirnov A.V., Petrov K.I. (2023). Assessment of the technical condition of reservoir hydroelectric complexes under climate change (case study of the Volga-Kama Cascade). Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo No. 5, pp. 34-42.
5. Kadomtseva M.E. (2024). Methodology for assessing the impact of climate change on the sustainable development of the agro-food complex. Saratov: Saratovskii Iсточnik, 294 p.
6. The Code of rules of JV 58.13330.2019. Hydraulic structures. The main provisions of SNiP 33-01-2003, 2020, 35 p.
7. Tuktarov R.B., Akpasov A.P. A brief overview of the modern regulatory and methodological framework for engineering and hydrographic work on water bodies for the purposes of land reclamation and ways to improve it. // Moscow Economic Journal. 2023. Vol. 8, No. 6. DOI: 10.55186/2413046X_2023_8_6_288.
8. Talalaeva V.F., Baev O.A. (2024). Results of field surveys of the technical condition of hydraulic structures of the Chernozemelskaya irrigation and water supply system. Puty Povysheniya Effektivnosti Oroshaemogo Zemledeliya, Vol. 93, No. 2, P. 1-15.
9. Finagenov O.M., Shtilman S.G., Shulman A.M., Yudelevich (2021). Development of methods for assessing the reliability of hydraulic structures. Izvestiya Vserossiiskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva, Vol. 300, P. 7-20. EDN: IANMJK
10. National standard of the Russian Federation GOST R59873-2021. Hydroelectric power plants. Methodology for determining safety criteria for declared structures. – Introduction. 2022-01-01. Moscow: Standartinform, 2021. 24 p.
11. Code of Rules SP 421.1325800.2018 “Reclamation systems and structures. Rules of operation” М.: 2019. 83 p.
12. GTS Safety Declaration “GTS reservoir Node on the Maly Chambar River of the Belinsky district of the Penza Region” No. 23-23(01)0032-13-SHZ. Saratov. 2023.

11. Свод правил СП 421.1325800.2018 «Мелиоративные системы и сооружения. Правила эксплуатации». М., 2019. 83 с.

12. Декларация безопасности ГТС «Узел ГТС водохранилища на реке Малый Чембар Беллинского района Пензенской области» № 23-23(01)0032-13-СХЗ. Саратов, 2023.

13. Черных О.Н. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного гидроузла с грунтовой плотинной: Методические указания. / О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко М.: РГАУ-МСХА, 2022. 172 с.

14. Свод правил СП 421.1325800.2018 «Мелиоративные системы и сооружения. Правила эксплуатации»: утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 24 декабря 2018 г. № 854/пр.

13. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. (2022). Ensuring the safety of hydraulic structures of a reclamation hydroelectric complex with an earth-fill dam: Methodological guidelines. Moscow: RGAU-MSHA, 172 p.

14. Code of Rules SP 421.1325800.2018 "Reclamation systems and structures. Operating Rules" (approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 24, 2018 No. 854/pr)

Об авторах

Антон Павлович Акпасов, канд. техн. наук; ORCID: 0000-0002-3252-7849; Author ID: 958277; 1a9@mail.ru

Максим Игоревич Морозов, ORCID: 0009-0005-1347-4314; 793141; jamster777@mail.ru

Дмитрий Алексеевич Греков, ORCID: 0000-0001-5869-7419; Author ID: 973060; greckov.dmitry@yandex.ru

Марина Евгеньевна Кадомцева, канд. экон. наук; WoS Researcher ID: AAO-4585-2020; Scopus Author ID: 57216494307; ORCID: 0000-0002-9547-5564; SPIN-код: 7331-6249; Author ID: 574194; kozyreva_marina@mail.ru

Ренат Бариевич Туктаров, канд. с.-х. наук; ORCID: 0000-0001-6063-3801; Author ID: 512045; tuktarov.rb@gmail.com

About the authors

Anton P. Akasov, CSc (Eng); ORCID: 0000-0002-3252-7849; Author ID: 958277; 1a9@mail.ru

Maxim I. Morozov, ORCID: 0009-0005-1347-4314; 793141; jamster777@mail.ru

Dmitry A. Grekov, ORCID: 0000-0001-5869-7419; Author ID: 973060; greckov.dmitry@yandex.ru

Marina E. Kadomtseva, CSc (Econ); WoS Researcher ID: AAO-4585-2020; Scopus Author ID: 57216494307; ORCID: 0000-0002-9547-5564; SPIN-code: 7331-6249; Author ID: 574194; kozyreva_marina@mail.ru

Renat B. Tuktarov, CSc (Agro); ORCID: 0000-0001-6063-3801; Author ID: 512045; tuktarov.rb@gmail.com

Критерии авторства / Authorship criteria

Акпасов А.П., Морозов М.И., Греков Д.А., Кадомцева М.Е., Туктаров Р.Б. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии 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 at the editorial office 12.03.2025

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 15.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 15.04.2025

Akpasov A.P., Morozov M.I., Grekov D.A., Kadomtseva M.E., Tuktarov R.B. performed theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-63-68>

УДК 627.83:626.88



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОТИВОЭРОЗИОННОГО БЕТОННОГО ПОЛОТНА МАРКИ VENOTEX SK

Н.В. Ханов , О.Н. Черных, Т.Ю. Жукова, Д.А. Алексеев, Х. Алабар

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Целью исследований стало определение коэффициента шероховатости бетонного полотна марки BeNotex SK. Рассмотрены особенности модельной установки для определения гидравлических характеристик бетонного полотна и описана методика их определения. Проведенные гидравлические исследования были направлены на определение коэффициента шероховатости исследуемого покрытия. Исследования проводились на экспериментальной установке трапециевидального сечения с вертикальным правым, наклонным левым откосами. Изучение коэффициента шероховатости выполнялось на контрольном участке, стенки и дно которого полностью покрывались полотном. Длина рабочего участка с исследуемым материалом составляла 6 м. Найдено среднее значение коэффициента шероховатости и даны рекомендации для использования подобного покрытия в качестве противозерозионного. Проведенные гидравлические исследования для материала бетонного полотна марки Be-Notex SK показали положительные возможности применения такого крепления в практике гидромелиоративного строительства.

Ключевые слова: укрепление, эрозия, покрытие, полотно бетонное BeNotex SK, защита, коэффициент шероховатости

Формат цитирования: Ханов Н.В., Черных О.Н., Жукова Т.Ю., Алексеев Д.А., Алабар Х. Результаты исследований гидравлических свойств противозерозионного бетонного полотна марки Be-Notex SK // Природообустройство. 2025. № 3. С. 63-68. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-63-68>

Original article

RESULTS OF STUDYING HYDRAULIC PROPERTIES OF ANTI-EROSION CONCRETE SHEET OF BENOTEX SK BRAND

N.V. Khanov , O.N. Chernykh, T.Yu. Zhukova, D.A. Alekseev, H. Alabar

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, st. Timiryazevskaya, 49, Russia

Abstract. The aim of the study was to determine the roughness coefficient of the BeNotex SK concrete sheet. The features of the model installation for determining the hydraulic characteristics of the concrete sheet are considered and the method for determining them is described. The hydraulic studies were aimed at determining the roughness coefficient of the studied coating. The studies were carried out on an experimental installation of trapezoidal cross-section with a vertical right and inclined left slopes. The study of the roughness coefficient “n” was carried out on a control section, the walls and bottom of which were completely covered with the sheet. The length of the working section with the material under study was 6 m. The average value of the roughness coefficient was found and recommendations were given for using such a coating as an anti-erosion coating. The hydraulic studies carried out for the Be-Notex SK concrete sheet material showed positive possibilities for using such fastening in the practice of irrigation and drainage construction.

Keywords: reinforcement, erosion, coating, concrete sheet BeNotex SK, protection, roughness coefficient

Format of citation: Khanov N.V., Chernykh O.N., Zhukova T.Yu., Alekseev D.A., Alabar H. Results of research of hydraulic properties of anti-erosion concrete sheet of BeNotex SK brand // Prirodobustrojstvo. 2025. № 3. P. 63-68. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-63-68>

Введение. Мероприятия по берегоукреплению включают в себя комплекс работ, который направлен на защиту прибрежной линии природных и искусственных водоемов от подмыва, обвала и эрозии берегового склона под

воздействием течения воды и волн, а также размыва ливневыми потоками. На откосы сооружений чаще всего воздействуют экзогенные процессы, вследствие которых интенсифицируется эрозия береговой зоны (рис. 1). В результате

негативного воздействия воды происходят как разрушения берегов рек, а также откосов гидротехнических сооружений (ГТС), так и любых других объектов, подверженных этому воздействию [1]. Все это приводит к колоссальному ущербу и значительному увеличению расходов по возобновлению работы ГТС водных объектов, откосов насыпей, плотин и дамб на них, в первую очередь теряющих устойчивость, снижающих надежность и безопасность работы основных сооружений прибрежных территорий. В зависимости от задач ГТС облицовки откосов могут выполняться из различных материалов [2, 3].

Одним из таких конструктивных средств является бетонное полотно марки BeNotex SK – композитный материал, состоящий из объемного полимерного мата, двух слоев текстиля, соединенных между собой пространственной полимерной решеткой, и дублированного подложкой из ПВХ мембраны (рис. 2). Данное покрытие толщиной 7, 8, 9, 10 мм производится в рулонах длиной 20,0 м и шириной 2,0 м, благодаря чему его просто доставлять до объекта строительства. Также материал можно достаточно легко укладывать на откос.

Инновационный материал используется для устройства защитного слоя при ремонте, реконструкции и сооружении новых водоотводных

объектов в гидротехническом и дорожном строительстве (рис. 3).

Перед укладкой данного покрытия, необходимо проводить подготовку основания: с поверхности убирают корни растений,



Рис. 1. Обрушение и эрозия неукрепленных береговых склонов реки Жиздра (фото Т.Ю. Жукова)

Fig. 1. Collapse and erosion of unfortified bank slopes of the Zhizdra River (photo: T.Y. Zhukova)



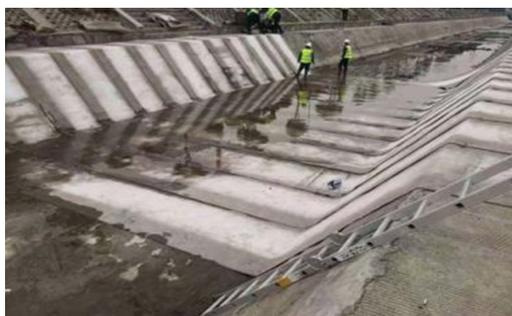
а



б

Рис. 2. Структура (а) и общий вид (б) бетонного полотна марки BeNotex SK

Fig. 2. Structure (a) and general appearance (b) of BeNotex SK concrete roadbed



а



б

Рис. 3. Применение бетонного полотна марки BeNotex SK для укрепления водных объектов: а – укрепление канала; б – покрытие дорожных кюветов (фото С.Н. Щукина)

Fig. 3. The use of BeNotex SK concrete sheet for strengthening water bodies: а – strengthening the canal; б – road ditch coating (photo: S.N. Shchukin)

камни и строительный мусор. Основание должно быть уплотнено и иметь ровный профиль. Монтаж бетонного полотна BeNotex SK осуществляется в соответствии с геометрией основания, вдоль или поперек оси сооружения и с низу в верх при наличии уклона (рис. 4). При фиксации стыка полотна рекомендуется использовать комбинированное применение крепежа: анкеры – по краям полотна и в анкерной канавке, саморезы – по длине стыка.

После монтажа и закрепления бетонное полотно увлажняют водой. Время полива участка составляет, как правило, несколько минут. Процесс равномерного полива полотна и насыщение полотна водой осуществляются визуально. Завершение этапа полива участка полотна происходит при фиксации насыщения полотна водой и образования стока по поверхности. Полив участка, как правило, занимает несколько минут. Для обеспечения достаточной гидратации бетонное полотно повторно проливается через час, время твердения составляет 90 мин. В зависимости от наружной температуры и влажности окружающей среды, количества и температуры воды, используемой для гидратации, материалу BeNotex SK необходимо время минимум 24 ч, чтобы быть готовым к эксплуатации.

Материалы и методы исследований.

Целью экспериментальных работ стало проведение гидравлических исследований инновационного покрытия – бетонного полотна марки BeNotex SK – для уточнения рекомендаций по его применению с учетом условий монтажа, крепления полотна после монтажа, качественной гидратации и твердения. Актуальность проведенных исследований фрагмента канала с покрытием из гидроизолирующего и защитного материала BeNotex SK заключается в получении недостающих данных для гидравлического расчета водопропускных сооружений с подобной гидроизолирующей противоэрозионной защитой и в оценке диапазона устойчивой безопасной работы всего инженерно-технического комплекса в целом.

Исследования защитного покрытия канального участка из бетонного полотна марки BeNotex SK были выполнены на экспериментальной площадке кафедры ГТС ИМВХС имени А.Н. Костякова. На лабораторной установке имелась возможность изменения расхода поступающей воды и уклона дна русла в довольно большом диапазоне [4, 5]. Гидравлический лоток имел трапециевидную форму сечения с вертикальным откосом с одной стороны и с откосом с заложением 1:1 – с другой. Изучение коэффициента шероховатости n выполнялось на контрольном участке,

стенки и дно которого полностью покрывались полотном BeNotex SK (рис. 5). Длина участка с исследуемым материалом составила 6 м [6].

Основная часть экспериментов была проведена при равномерном режиме работы канала и расходах Q , равных 84,33 л/с,

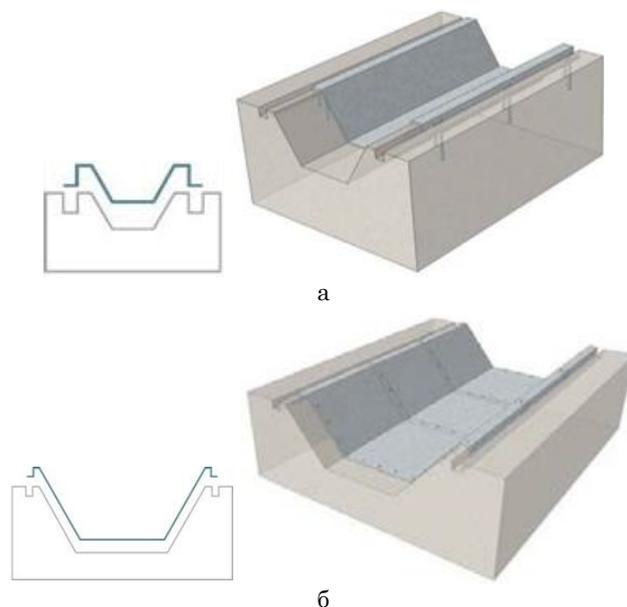


Рис. 4. Схема укладки бетонного полотна в зависимости от геометрических размеров канала:

а – продольная укладка полотна в одно и два полотна;

б – поперечная укладка в три полотна

Fig. 4. Scheme of laying the concrete roadbed depending on the geometric dimensions of the channel:

a – longitudinal laying of the sheet in one and two sheets;

b – transverse laying in three sheets



Рис. 5. Экспериментальная модель участка канала с бетонным покрытием из полотна BeNotex SK перед пуском (фото Т.Ю. Жуковой)

Fig. 5. Experimental model of a section of a canal with a concrete coating made of BeNotex SK sheet before start-up (photo by T.Y. Zhukova)

120,41 л/с и $Q = 168,78$ л/с, уклонах дна лотка $i = 0,01$ и $i = 0,05$.

При фиксации полотен бетонного полотна использовались саморезы из нержавеющей стали длиной не менее 65 мм. Шаг между саморезами по краям составлял в среднем 20 см. Саморезы вкручивались на расстоянии 4...5 см от края полотен и на расстоянии 3...4 см от края стыка внахлест [7]. Процесс равномерного полива полотна и насыщение полотна водой осуществлялся визуально. Завершение этапа полива участка полотна происходило при фиксации насыщения его водой и образования стока по поверхности.

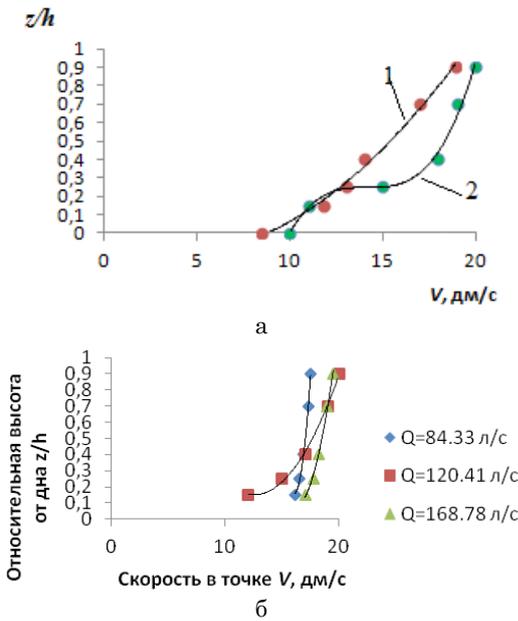


Рис. 6. Эпюры скоростей потока $V = f(z/h)$ в створе 3 при $y = 510$ мм:

а – при расходе $Q = 120,41$ л/с и разных уклонах дна водотока i ; 1 – $i = 0,01$; 2 – $i = 0,05$; б – при $i = 0,05$ и различных расходах $Q = 84, 33; 120,41$ и $168,78$ л/с

Fig. 6. Diagrams of flow velocities $V = f(z/h)$ at site 3 at $y = 510$ mm:

a – at flow rate $Q = 120.41$ l/s and different slopes of the bottom of the watercourse i ; 1 – $i = 0,01$; 2 – $i = 0,05$; b – with $i = 0.05$ and various discharges $Q = 84, 33; 120.41$ and 168.78 l/s

Таблица. Результаты расчёта коэффициента шероховатости n для бетонного полотна марки BeNotex SK
Table. Results of calculation of the roughness coefficient n for the concrete sheet of the BeNotex SK brand

Параметр Parameter	n_{cp}	n_{min}	n_{max}
$n_{Г-К}$	0,0157	0,0153	0,0162
n_M	0,0163	0,0160	0,0169
$n_{П}$	0,0160	0,0156	0,0165

Для обеспечения достаточной гидратации бетонное полотно повторно проливалось через час.

Результаты и их обсуждение. Измерение кинематических характеристик потока было выполнено в 5 мерных створах по длине контрольного участка на его границах и в 3 промежуточных сечениях. В каждом сечении измерение скоростей трубкой Пито и оценка полной энергии потока выполнялись на 11 вертикалях в 6 точках по глубине водотока [8]. После определения скоростей находился коэффициент шероховатости n и другие гидравлические характеристики потока [9, 10], выполнялось построение эпюр скоростей $V = f(z/h)$, приведенных на рисунке 6.

Для определения коэффициента шероховатости n был разработан алгоритм гидравлического расчета, блок-схема которого представлена на рисунке 7, с использованием зависимостей Гангиле-Куттера ($n_{Г-К}$), Маннинга (n_M) и Н.Н. Павловского ($n_{П}$) [11]. Результаты расчета коэффициента по трем основным зависимостям n для бетонного полотна марки BeNotex SK представлены с общепринятыми обозначениями величин [1-12] в таблице.

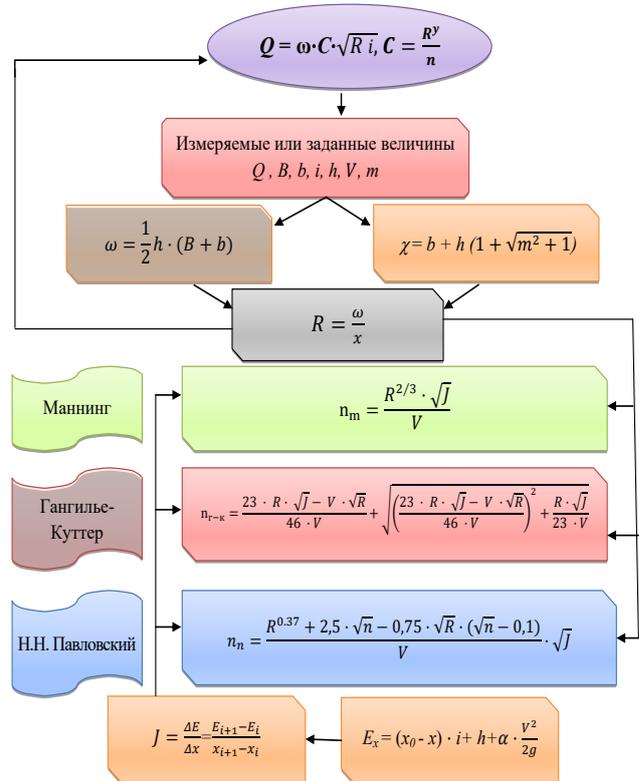


Рис. 7. Предложенная блок-схема гидравлического расчета каналов и участков русел водотоков, укрепленных бетонным полотном марки BeNotex SK

Fig. 7. Proposed block diagram of hydraulic calculation of canals and sections of watercourse channels reinforced with concrete sheet BeNotex SK

Благодаря полученным уточненным значениям коэффициентов шероховатости внедряемого на водных объектах АПК покрытия из бетонного полотна BeNotex SK, можно достаточно достоверно выполнить гидравлический расчет естественного водотока после ревитализации и водоотводного ГТС с защитным полотном данного типа при изменении в большом диапазоне граничных параметров, встречающемся в практике мелиоративного строительства [12]. Значения коэффициента шероховатости, полученные во время исследований, получились довольно схожими со значениями n для таких облицовок, как обыкновенная бутовая кладка, старая кирпичная кладка, грубая бетонировка или гладкая, хорошо разработанная скала, у которых данный коэффициент $n = 0,014...0,017$ и ниже, чем для геомата со щебнем [6, 8] или с травой сорта Райграс (рис. 8).

На основании проведенного анализа и после оценки коэффициентов шероховатостей n по трем классическим формулам (Маннинга, Н.Н. Павловского и Гангиле-Куттера) при варьировании расходов и уклонов водотоков в исследованных рамках рекомендовано в качестве расчетных использовать значение $n = 0,0163$, что при симметричной форме поперечного сечения канала пойдет в запас при оценке пропускной способности водных объектов, ложе которых укреплено бетонным полотном марки BeNotex SK.

Выводы

Проведенные гидравлические исследования защитного покрытия из бетонного полотна марки BeNotex SK позволяют сделать следующие общие выводы.

Противоэрозионные рулоны BeNotex SK в стандартных размерах работают надежно при скоростях потока в канале более 2,2 м/с, стабильно защищая при этом грунтовое русло водотока. При гидравлических расчетах пропускной способности искусственных и естественных русел

Список использованных источников

1. Гурьев А.П. Использование композиционных геоматов для борьбы с водной эрозией / Гурьев А.П., Ханов Н.В., Еремеев А.В., Козлов К.Д., Фартуков В.А., Щукин С.Н. / Монография. М.: РГАУ МСХА, 2020. 253 с.
2. Ханов Н.В. Обзор применения современных геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве / Н.В. Ханов, А.В. Еремеев // Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 150-летию РГАУ-МСХА. 2015. С. 336-339.
3. Козлов К.Д. Гидравлические исследования покрытия из геокомпозитного материала / К.Д. Козлов, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Природообустройство. 2014. № 5. С. 80-86.

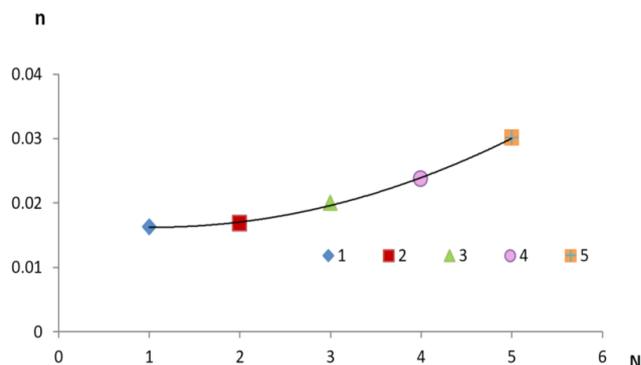


Рис. 8. График зависимости коэффициента шероховатости n для разных типов покрытий, исследованных на модели фрагмента канала в гидравлическом лотке лаборатории водопропускных сооружений ИМВХС имени А.Н. Костякова:

- 1 – бетонное полотно BeNotex SK;
- 2 – геомат Энкамат А20 со щебнем и битумом;
- 3 – геомат с битум-полимерным вяжущим;
- 4 – геомат со щебнем; 5 – геомат с травой сорта Райграс

Fig. 8. Graph of the dependence of the roughness coefficient n for different types of coatings studied on the model of the canal fragment in the hydraulic flume of the laboratory of culverts of the Institute of land reclamation, water management and construction named after A.N. Kostyakov:

- 1 – concrete sheet BeNotex SK;
- 2 – Enkammat A20 geomat with crushed stone and bitumen;
- 3 – geomat with bitumen-polymer binder;
- 4 – geomat with crushed stone;
- 5 – geomat with grass of the Ryegrass variety

водотоков после ренатурирования, покрытых на отдельных участках материалом из геокомпозита BeNotex SK, при пользовании формулой Маннинга для определения коэффициента Шези «С» следует принимать значение коэффициента шероховатости $n = 0,0163$. Проведенные гидравлические исследования для материала – бетонное полотно марки BeNotex SK – показали реальные возможности применения такого крепления в практике гидромелиоративного строительства.

References

1. Guryev A.P. Use of composite geomats to combat water erosion / Guryev A.P., Khanov N.V., Eremeev A.V., Kozlov K.D., Fartukov V.A., Shchukin S.N. / The monograph. M.: RGAU-MSHA, 2020. 253 p.
2. Khanov N.V. Review of the use of modern geosynthetics in hydraulic engineering / N.V. Khanov, A.V. Eremeev // In the collection: International scientific conference of young scientists and specialists dedicated to the 150th anniversary of the RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev Collection of articles. M.: Publishing house of the RGAU-MTAA. 2015. P. 336-339.
3. Kozlov K.D. Hydraulic studies of the coating made of geo-composite material / K.D. Kozlov, A.P. Guryev, N.V. Khanov // Prirodobustrojstvo. 2014. No. 5. P. 80-86.

4. Козлов К.Д. Модельные гидравлические исследования для определения коэффициента шероховатости материала Энкамат А20 / К.Д. Козлов, А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов // Научная жизнь. 2016. № 1. С. 6-12.

5. Гурьев А.П. Гидравлические исследования противозерозионного покрытия – геомата марки Энкамат А20 / А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов, В.А. Фартуков, А.И. Новиченко, С.Н. Шукин // Международная научная конференция «Научное кадровое обеспечение продовольственной безопасности России». Доклады ТСХА. Изд-во: Грин Эра 2, 2015. С. 358-363.

6. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов / В.Т. Чоу. М.: изд-во Литерат. по стр-ву, 1969. 462 с.

7. Khatsuria R.M. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators / R.M. Khatsuria – New York.: Marcel Dekker, 2005. 649 p.

8. Козыр И.Е., Пикалова И.Ф., Ханов Н.В. Практикум по гидравлике. Учебно-методическое пособие. СПб.: «Лань», 2016. 176 с.

9. Schippers W. and K. Pon, Grondsoort, vegetatie en erosiebestendigheid, Landbouwniversiteit, Wageningen, 1983.

10. Hewlett H.W.M, Boorman L.A. and M.E. Bramley, Design of reinforced grass waterways, Report 116, CIRIA, London, 1987.

11. Жукова Т.Ю. Экспериментальные исследования коэффициента шероховатости покрытия из композиционного геомата, заполненного щебнем / Т.Ю. Жукова, Н.В. Ханов, О.Н. Черных, С.Н. Редников // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14. № 2 С. 260-274.

12. Ханов Н.В. Результаты гидравлических исследований геоматов марки Энкамат А20 и Энкамат 7225, заполненных грунтом с посевом многолетних трав / Н.В. Ханов, О.Н. Черных, С.Н. Шукин, Т.Ю. Жукова, Д.А. Алексеев // Природообустройство. 2024. № 5. С. 71-79. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-71-79>

Об авторах

Нартмир Владимирович Ханов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ГТС; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Ольга Николаевна Черных, канд. техн. наук, доцент, WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-код: 7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Татьяна Юрьевна Жукова, ассистент; WoS ResearcherID: RIDAAE-5204-2022; Scopus AuthorID: 57433774600; ORCID: 0000-0002-9654-3039; SPIN-код: 5357-4597; AuthorID: 1111184; t.zhukova@rgau-msha.ru

Даниил Андреевич Алексеев, ассистент, ORCID: 0009-0009-1890-3471; SPIN-код: 8085-3065; daniil.alekseev@rgau-msha.ru

Алабар Ханан, магистр, hananalabar180@gmail.com

Критерии авторства / Criteria of authorship

Н.В., Черных О.Н., Жукова Т.Ю., Алексеев Д.А., Алабар Х. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат. Khanov N.V., Chernykh O.N., Zhukova T. Yu, Alekseev D.A., Alabar H. carried out practical

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют 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 at the editorial office 18.03.2025 Одобрена после рецензирования и доработки / received after peer review and revision on 28.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 28.04.2025

4. Kozlov K.D. Model hydraulic studies to determine the roughness coefficient of the Enkamat A20 material / K.D. Kozlov, A.P. Guryev, D.V. Kozlov, N.V. Khanov // Scientific life. 2016. No. 1. P. 6-12.

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: Literature 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.

8. Kozyr I.E., Pikalova I.F., Khanov N.V. Practical training in hydraulics. Educational-methodical manual. St. Petersburg, “Lan”, 2016. 176 p.

9. Schippers W. and K. Pon, Grondsoort, vegetatie en erosiebestendigheid, Landbouwniversiteit, Wageningen, 1983.

10. Hewlett H.W.M, Boorman L.A. and M.E. Bramley, Design of reinforced grass waterways, Report 116, CIRIA, London, 1987.

11. Zhukova T.Yu. Experimental studies of the roughness coefficient of a coating made of composite geomat filled with crushed stone / T.Yu. Zhukova N.V. Khanov, O.N. Chernykh O.N., S.N. Rednikov // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2024. Vol. 14. No. 2, P. 260-274.

12. Khanov N.V. Results of hydraulic studies of Enkamat A20 and Enkamat 7225 geomats filled with soil and perennial grass seeding / N.V. Khanov, O.N. Chernykh, S.N. Shchukin T.Yu. Zhukova, D.A. Alekseev // Prirodoobustrojstvo. 2024. No. 5. P. 71-79. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-71-79>

About the authors

Nartmir V. Khanov, DSc (Eng), professor; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-code: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Olga N. Chernykh, DSc (Eng), professor; WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-code: 7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Tatyana Yu. Zhukova, assistant; WoS ResearcherID: RIDAAE-5204-2022; Scopus AuthorID: 57433774600; ORCID: 0000-0002-9654-3039; SPIN-code: 5357-4597; AuthorID: 1111184; t.zhukova@rgau-msha.ru

Daniil A. Alekseev, assistant, ORCID: 0009-0009-1890-3471; SPIN-code: 8085-3065; daniil.alekseev@rgau-msha.ru

Hanan Alabar, master; hananalabar180@gmail.com

and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Khanov N.V., Chernykh O.N., Zhukova T. Yu, Alekseev D.A., Alabar H. have a copyright on the article and they are responsible for plagiarism.

Гидравлика и инженерная гидрология

Научная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-69-76>

УДК 551.482.215



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ОСЦИЛЛЯЦИЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДНОГО ПОТОКА

В.А. Фартуков[✉], М.И. Зборовская

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Исследования посвящены сравнительному анализу различных моделей осцилляций свободной поверхности жидкости с акцентом на автоколебательные процессы. Основная цель исследований заключается в сравнительном анализе различных моделей, описывающих осцилляции свободной поверхности жидкости. Осцилляции водных потоков представляют собой сложные колебания, возникающие под влиянием разнообразных факторов – таких, как атмосферные условия и гравитационные силы. В исследованиях рассматриваются основные характеристики осцилляций включая частоту, амплитуду и длину волны, а также важность нелинейных сил и механизмов обратной связи для возникновения автоколебаний. Для анализа используемых расчетных моделей и подходов применяются аналитические методы, что позволяет получить более точные результаты для различных параметров автоколебательного движения открытых водных потоков. Результаты исследований могут послужить основой при дальнейшем изучении динамики водных сред и разработке более эффективных управленческих стратегий для использования водных ресурсов.

Ключевые слова: осцилляции, свободная поверхность жидкости, автоколебания, водные потоки, динамика, гравитационные силы, волны

Формат цитирования: Фартуков В.А., Зборовская М.И. Сравнительный анализ различных моделей осцилляций свободной поверхности водного потока // Природообустройство. 2025. № 3. С. 69-76. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-69-76>

Scientific article

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT MODELS OF FREE SURFACE OSCILLATIONS OF WATER FLOW

V.A. Fartukov[✉], M.I. Zborovskaya

Federal State Budgetary Institution of Higher Education Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction, 49 Timiryazevskaya str., Moscow, 127434, Russia

Abstract. This study is devoted to a comparative analysis of various models of oscillations of the free surface of a liquid with an emphasis on self-oscillatory processes. The main purpose of the study is to evaluate the accuracy, applicability and effectiveness of these models for solving specific tasks. Water flow oscillations are complex fluctuations that occur under the influence of various factors, such as atmospheric conditions and gravitational forces. The study examines the main characteristics of oscillations, including frequency, amplitude, and wavelength, as well as the importance of nonlinear forces and feedback mechanisms for the occurrence of self-oscillations. Analytical methods are used to analyze the calculation models and approaches used, which makes it possible to obtain more accurate results for various parameters of the self-oscillatory motion of open water streams. This work can serve as a basis for further study of the dynamics of aquatic environments and the development of more effective management strategies for the use of water resources.

Keywords: oscillations, free surface of a liquid, self-oscillations, water flows, dynamics, gravitational forces, waves

Format of citation: Fartukov V.A., Zborovskaya M.I. Comparative analysis of different models of free surface oscillations of water flow // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 69-76. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-69-76>

Введение. Осцилляции свободной поверхности водных потоков являют собой сложные колебательные процессы, возникающие под воздействием разнообразных факторов – таких, как ветер, изменения атмосферного давления, осадки и гравитационные силы. Эти колебания могут проявляться в виде волн, ряби и более сложных форм движения, затрагивая как физику жидкости, так и динамику окружающей среды. Основные характеристики осцилляций – такие, как частота, амплитуда и длина волны, являются критически важными для понимания поведения водных систем. Примерами задач для анализа могут быть осцилляции в замкнутых водоемах (сейши), волны на поверхности океана (ветровые волны, приливные волны), колебания в реках и каналах (автоколебания, волны от судов), взаимодействие волн с препятствиями (например, волноломами или береговой линией, водосбросами) [1]. При этом не ослабевают интерес к аналитическим методам. Это связано с тем, что аналитические методы позволяют оценить качественное поведение изучаемого объекта, вскрыть его основные особенности, не прибегая к многочисленным вычислениям. Кроме того, аналитические решения часто служат единственным обоснованием применимости того или иного численного алгоритма [2]. Такой анализ позволяет выбрать наиболее подходящую модель для определенных условий, а также выявить ее ограничения и преимущества.

Особый вид осцилляций – осцилляции свободной поверхности жидкости, связанные с автоколебаниями, которые представляют собой процесс, когда динамическая система начинает колебаться самостоятельно, без постоянного внешнего воздействия. Этот эффект часто возникает благодаря сбалансированному взаимодействию нелинейных сил, механизмов обратной связи и демпфирования, что ведет к формированию устойчивого уровня колебаний и энергии внутри системы.

Условия, необходимые для возникновения автоколебаний, – наличие нелинейных сил и обратных связей, а также характеристик, обеспечивающих затухание (таких, как сила трения и демпфирование). Эти факторы позволяют системе поддерживать постоянный уровень энергии и осуществлять колебательные движения.

Для изучения характеристик автоколебательного движения открытых водных потоков применяются различные расчетные модели и методики. В их основе лежат приближенные численные методы, необходимые для получения точных результатов расчетов параметров

автоколебательного режима течения в открытых водных потоках и определения характеристик. Анализ существующих моделей и методик является ключевым для дальнейшего понимания сложного процесса.

Цель исследований: сравнительный анализ различных моделей, описывающих осцилляции свободной поверхности жидкости; систематизация и анализ имеющихся данных исследований для более детального понимания процессов осцилляции жидкости в различных расчетных областях гидротехники.

При достижении поставленной цели акцент сделан: 1) на определении специфических характеристик различных моделей – таких, как точность, применимость и пределы; 2) на оценке влияния различных факторов включая нелинейные силы, демпфирование и обратные связи (на динамику осцилляций); 3) на определении метода и методики аналитического решения уравнения, описывающих автоколебательный режим течения открытых водных потоков; 4) на определении зависимости амплитуды колебания от параметров системы методом малого параметра [3-6].

Материалы и методы исследований. Исследования включают в себя обширный набор теоретических и численных подходов для определения характеристик автоколебательного движения на открытых водных потоках.

1. Описание исследуемой системы. Исследовательская работа сосредоточена на осцилляциях свободной поверхности воды, которые обусловлены влиянием различных факторов: ветер, изменения давления, осадки, гравитационные силы и др. Эффекты этих факторов приводят к образованию волн, ряби и другим формам динамического поведения жидкости, что требует анализа характеристик осцилляций – таких, как частота, амплитуда и длина волны.

2. Подходы к теоретическому анализу. Для анализа автоколебаний и осцилляций было разработано несколько расчетных моделей. В рамках исследований использовались следующие подходы:

2.1. Метод малого параметра, позволяющий упростить уравнения, описывающие динамику системы, за счет введения малых параметров. Это позволяет проводить анализ в приближенных условиях, что значительно облегчает решение сложных уравнений.

2.2. Интегрирующий множитель. Метод применяется для решения дифференциальных уравнений и позволяет находить аналитические решения для автономных систем. Использование

интегрирующих множителей помогает упрощать уравнения и находить кривые состояния системы.

2.3. Комплексный подход. Использование комплексных переменных позволяет формулировать осцилляции в более удобном виде. Переход к комплексному виду уравнений способствует более эффективной обработке и анализу динамических систем.

Методы составляют основную структуру исследований и позволяют более глубоко понять взаимосвязи различных динамических процессов, которые наблюдаются в открытых водных потоках. Каждый из упомянутых методов требует тщательной настройки и адаптации к конкретным условиям, что подчеркивает сложность и многообразие изучаемых явлений.

Результаты и их обсуждение. Расчет автоколебательного режима и определение зависимости амплитуды колебания от параметров системы и времени произвели методом малого параметра с применением методов: 1) интегрирующего множителя; 2) перехода к комплексному виду.

Для анализа методов расчета автоколебательного режима течения необходимо определить нелинейные силы, установить обратную связь и затухающие силы. Нелинейные силы играют ключевую роль в сложных динамических системах. В отличие от линейных систем, где силы пропорциональны отклонению от равновесия, в нелинейных системах такое соотношение может быть более сложным. Обратная связь представляет собой процесс, в котором выходные данные системы влияют на ее дальнейшее поведение. В автоколебаниях существует положительная и отрицательная обратная связь: положительная увеличивает амплитуду колебаний, отрицательная способствует стабилизации и может привести к колебаниям.

Затухающие силы, сила трения или демпфирование препятствуют возникновению автоколебаний. Однако если затухание сбалансировано с источником энергии, то система может поддерживать постоянный уровень энергии. Для возникновения автоколебаний должны выполняться следующие условия: наличие нелинейных сил, которые могут создавать дополнительные энергии, достаточные для компенсации затухания; выходная обратная связь, создающая цикл обращения энергии в систему. Затухающие характеристики – такие, как сила трения, управляют энергией внутри системы, но недостаточны для ее остановки.

Методы исследований. 1. Метод расчета автоколебательного режима и определение зависимости амплитуды колебания от параметров системы и времени методом малого параметра с применением интегрирующего множителя позволяют производить приближенные расчеты для уравнений, содержащих малые параметры, что является важным при расчете автоколебаний.

Уравнение движения имеет следующий вид:

$$\frac{md^2x}{dt^2} + kx + \epsilon x^3 = 0, \quad (1)$$

где m – масса; k – жесткость; ϵ – малый параметр; x – отклонение от равновесия.

Методика расчета представляет собой изложенную ниже последовательность.

Редукция уравнения. Вводится понятие ϵ – малый параметр, $\epsilon \rightarrow 0$. Разделим переменные входящие в уравнение (1) на линейную и нелинейную части:

$$\frac{md^2x}{dt^2} + kx \approx 0. \quad (2)$$

Решение этого линейного уравнения –

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (3)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – собственная частота; A – амплитуда; φ – фаза.

Введение нелинейного члена. Введем малый параметр ϵ в уравнение. С учетом рассмотренной малости можно считать, что величина x^3 может быть принята за малый параметр, и это позволит разложить уравнение (3) в ряд Тейлора:

$$x^3 = (A \cos(\omega_0 t + \varphi))^3 = A^3 \cos^3(\omega_0 t + \varphi). \quad (4)$$

Применим тригонометрическую формулу:

$$\cos^3(\theta) = \frac{1}{4} \cdot \cos(3\theta) + \frac{3}{4} \cos(\theta). \quad (5)$$

Таким образом, получим:

$$x^3 = \frac{A^3}{4 \cdot \cos(3(\omega_0 t + \varphi))} + \frac{3A^3}{4 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi)}. \quad (6)$$

Подставим выражение x^3 уравнения (6) в уравнение (1):

$$\frac{md^2x}{dt^2} + kx + \epsilon \left(\frac{A^3}{4 \cdot \cos(3(\omega_0 t + \varphi))} + \frac{3A^3}{4 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi)} \right) = 0. \quad (7)$$

Линеаризация уравнения. При малом параметре ϵ производим линейное приближение, рассматривая только слагаемые уравнения первого порядка:

$$\frac{md^2x}{dt^2} + kx + \frac{3\epsilon A^3}{4 \cos(\omega_0 t + \varphi)} \approx 0. \quad (8)$$

Решение уравнения с учетом возмущения. Перенесем левую часть выражения (8):

$$\frac{m d^2 x}{dt^2} + kx = -\frac{3\epsilon A^3}{4 \cos(\omega_0 t + \varphi)}. \quad (9)$$

Полученное уравнение можно решить методом вариации постоянных на определение устойчивости обобщенным методом Грина [7, 8]. Окончательное аналитическое решение уравнения (9) является сложным.

Рассмотрим метод решения методом интегрирующего множителя. В результате решения получим выражение, которое определит зависимость амплитуды колебаний от параметров системы с учетом нелинейного члена, а также анализ параметров устойчивости и определение увеличения амплитуды или частоты.

Аналитическое решение с использованием метода интегрирующего множителя. Приведем уравнение (1) к стандартному виду. Разделим обе стороны на массу m :

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{mx} + \frac{\epsilon}{mx^3} = 0. \quad (10)$$

$$\text{Определим: } \omega_0^2 = \frac{k}{m} \text{ и } \alpha = \frac{\epsilon}{m}.$$

$$\text{Получим: } \frac{dx^2}{dt^2} + \omega_0^2 x + \alpha x^3 = 0. \quad (11)$$

Полученное уравнение второго порядка преобразуем в систему первого порядка. Для этого введем новую переменную: $v = \frac{dx}{dt}$. Получили систему уравнений $\frac{dx}{dt} = v$:

$$\frac{dv}{dt} = -\omega_0^2 x - \alpha x^3. \quad (12)$$

Решение выполняем методом интегрирующего множителя. Для этого начнем с уравнения для v : $\frac{dv}{dt} + \omega_0^2 x + \alpha x^3 = 0$.

Выразим v через x , зависящее от независимой переменной времени t .

Интегрирующий множитель $\mu(t)$ будет равен $e^{\int \omega_0^2 dt}$.

Умножаем уравнение (12) на интегрирующий множитель:

$$e^{\omega_0^2 t} \frac{dv}{dt} + \omega_0^2 e^{\omega_0^2 t} x = -\alpha e^{\omega_0^2 t} x^3.$$

Перепишем уравнение как производную от произведения, получим:

$$\frac{d(e^{\omega_0^2 t} v)}{dt} = -\alpha e^{\omega_0^2 t} x^3.$$

Проинтегрируем обе стороны уравнения по времени:

$$e^{\omega_0^2 t} v = -\alpha \int e^{\omega_0^2 t} x^3 dt + C, \\ e^{\omega_0^2 t} v = -\alpha \int e^{\omega_0^2 t} x^3 dt + C, \text{ где } C - \text{ константа интегрирования.}$$

Произведем замену переменных, введем переменное время $\tau = \omega_0 \cdot t$.

$$\text{Тогда } \frac{dx}{d\tau} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{\omega_0} \frac{dx}{dt}.$$

Получили преобразованное уравнение, которое позволяет получить решение. В результате имеем комплексную форму решения, которая может быть выражена через эллиптические интегралы. Необходимо заметить, что при больших значениях амплитуды возникают колебания типа Ферми-Процедура [9-11]:

$$x(t) \approx A \cos(\omega_0 t + \varphi) + O(\epsilon),$$

где $O(\epsilon)$ – поправка мощности нелинейного члена малого параметра ϵ .

Метод интегрирующего множителя представляет системный подход по определению динамики автоколебательной системы, однако для нахождения точного решения в случае сложных нелинейных членов необходимы дополнительные численные методы расчетов.

2. Метод расчета автоколебательного режима и определение зависимости амплитуды колебания от параметров системы и времени методом малого параметра с переходом к комплексному виду [12, 13]

Рассмотрим уравнение второго порядка (11). Произведем разложение по малому параметру ϵ :

$$x(t) = x_0(t) + \epsilon + O(\epsilon^2),$$

где $x_0(t)$ – решение линейного уравнения; $x_1(t)$ – корректировка, вызванная нелинейным членом.

Решение линейного уравнения $\frac{d^2 x_0}{dt^2} + \omega_0^2 x_0 = 0$ можно записать как

$$x_0(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где A – амплитуда; φ – начальная фаза.

Нелинейные поправки. Подставим $x_0(t)$ в уравнение и определим $x_1(t)$:

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} (A \cos(\omega_0 t + \varphi) + \epsilon x_1(t)) + \omega_0^2 (A \cos(\omega_0 t + \varphi) + \epsilon x_1(t)) + \int (A \cos \omega_0 t + \varphi)^3 = 0.$$

Соберем все члены по порядкам малости.

Для $O(1)$: Линейное уравнение.

Для $O(\epsilon)$: получаем уравнение для

$$x_1: \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \omega_0^2 x_1 = -\frac{1}{4} A^3 \cos^3(\omega_0 t + \varphi).$$

Подставив \cos^3 через формулы приведения, получаем:

$$\cos^3(\omega_0 t + \varphi) = \frac{3}{4} \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{1}{4} \cos(3(\omega_0 t + \varphi)).$$

Тогда решением этого уравнения для x_1 является сумма общего решения линейного уравнения и частного решения.

Общее решение x_1, h : $x_1, h(t) = B \cos(\omega_0 t + \psi)$.

Частное решение x_1, p : частное решение получится при применении метода вариации постоянных или метода определенных коэффициентов.

Решаем систему для $\varphi = 0$. Комплексный вид решения. Чтобы перейти к комплексной форме решения, представим решение следующим образом.

$$\text{Определим: } x(t) = A e^{i(\omega_0 t + \varphi)} + A e^{-i(\omega_0 t + \varphi)},$$

где A – комплексное сопряжение.

Используя форму наложения (с учетом корректировок нелинейного члена), получаем:

$$x(t) = A e^{i\omega_0 t} + A e^{-i\omega_0 t} + O(\epsilon).$$

Таким образом, окончательное аналитическое решение для нелинейного осциллятора в комплексной форме будет иметь вид:

$$x(t) = A e^{i\omega_0 t} + A e^{-i\omega_0 t} + \epsilon (B e^{i\omega_0 t} + B e^{-i\omega_0 t}) + O(\epsilon^2).$$

При этом B – коэффициент, который нужно найти из уравнения для x_1 , учитывая резонансные явления, которые могут возникнуть из-за нелинейных свойств системы.

Полученное уравнение для корректирующей функции $x_1(t)$ представляет однородное уравнение с учетом воздействия внешних сил:

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} + \omega_0^2 x_1 = -\frac{1}{4} A^3 \left(\frac{3}{4} \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{1}{4} \cos(3(\omega_0 t + \varphi)) \right).$$

Его решение выполним методом вариации:

$$x_1 h(t) = C_1 \cos(\omega_0 t) + C_2 \sin(\omega_0 t),$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

Для нахождения частного решения $x_1 p(t)$ используем метод подбора. Поскольку есть два члена в правой части (с частотами ω_0 и $3\omega_0$), можем предположить, что частное решение имеет следующую форму:

$$x_1 p(t) = B \cos(\omega_0 t + \varphi) + D \cos(3(\omega_0 t + \varphi)).$$

Подставляя это выражение в уравнение и сравнивая коэффициенты перед косинусами, получаем:

1. Для члена с $\cos(\omega_0 t + \varphi)$:

$$-\omega_0^2 B = -\frac{3}{16} A^3 \Rightarrow B = \frac{3}{16} \omega_0^2 A^3.$$

2. Для члена с $\cos(3(\omega_0 t + \varphi))$:

$$-\omega_0^2 D = -\frac{1}{16} A^3 \Rightarrow D = \frac{1}{16} \omega_0^2 A^3.$$

Полное решение. При объединении всех частей общее решение будет иметь следующий вид:

$$x(t) = x_0(t) + \epsilon x_1(t) A \cos(\omega_0 t + \varphi) + \epsilon \left(\frac{3}{16} \omega_0^2 A^3 \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{1}{16} \omega_0^2 A^3 \cos(3(\omega_0 t + \varphi)) \right).$$

Это выражение может быть упрощено и переписано как

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \cdot \left(1 + \frac{3}{16} \omega_0^2 \epsilon A^2 \right) + \frac{1}{16} \omega_0^2 \epsilon A^3 \cos(3(\omega_0 t + \varphi)).$$

Анализ полученного решения. Решение показывает, что эффект нелинейности приводит к модификации амплитуды основной гармоники и появлению третьей гармоники. Это явление распространено в системах, подверженных нелинейным взаимодействиям.

Полученное решение описывает изменение амплитуды осцилляций в зависимости от параметра ϵ и начальных условий. Решение также указывает на возможность генерации гармоник, что является характерным признаком нелинейных процессов.

Таким образом, при увеличении ϵ и амплитуды A система будет демонстрировать более сложное поведение включая неустойчивость и переходные процессы.

Результаты анализа применимы к примеру расчета автоколебательного режима течения открытого водного потока. Рассмотрим автоколебательный режим в открытом водном потоке, используя метод малого параметра с применением метода перехода к комплексному виду. В этих целях рассмотрим один из типов автоколебаний, связанных с колебаниями уровня воды в реке или канале с сужением русла.

Исходная модель. Для описания течения воды в открытом канале используем уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности. Для упрощения анализа ограничимся одним пространственным направлением и примем, что движение воды является однородным, со средней скоростью течения. Распишем основные уравнения.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0,$$

где h – уровень воды q – расход воды, который в общем случае выражается как $q = A(h) \cdot v$, где A – площадь поперечного сечения, v – скорость.

Уравнение движения (уравнение Бернулли) представим в виде:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0,$$

где g – ускорение свободного падения.

Переход к сужению русла. Рассмотрим участок канала с сужением. При сужении русло уменьшается, что приводит к повышению скорости течения воды в этом участке. Мы можем описать сужение через изменение площади:

$$A(h) = A_0 (1 - k \cdot (h - h_0)^2),$$

где k – малый параметр; h_0 – средний уровень воды A_0 – площадь поперечного сечения до сужения.

Запись уравнений в комплексном виде. Для дальнейшего анализа сделаем предположение о малом параметре (например, ϵ для отображения отклонений от устойчивого режима). Тогда перепишем переменные в комплексной форме:

$$h(t) = h_0 + \epsilon H e^{i\omega t},$$

где H – комплексная амплитуда колебаний; ω – угловая частота колебаний.

Подставляя это выражение в уравнения и учитывая, что в стационарном состоянии $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, можно рассмотреть изменения уровня воды в малом параметре:

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \epsilon i \omega H e^{i\omega t}.$$

После подстановки в уравнения переходим к комплексному виду.

Переход к линейной системе. При малом отклонении от стационарного состояния получаем линейную систему:

$$\epsilon \frac{d^2 H}{dt^2} + \left(g \frac{\partial h}{\partial x} \right) H = 0.$$

Представляя уровень воды и водный поток в виде гармонических функций, получаем характерное уравнение, описывающее систему автоколебаний. Положим, что $\frac{\partial h}{\partial x} \approx \epsilon H e^{i\omega t}$ с учетом свойств потока и уравнений Бернулли.

Анализ устойчивости. На этом этапе рассматриваем собственные значения системы с помощью метода малых параметров, определяя условия для возникновения автоколебаний. Для получения устойчивого автоколебательного режима исследуем характеристическое уравнение:

$$\epsilon \omega^2 + g (\alpha H) = 0,$$

где α – коэффициент, определяющий сужение.

Условия автоколебаний. Для существования автоколебаний необходима по-

ложительная область параметра, то есть

$$1 - g \frac{H}{(\omega^2 \cdot \alpha)} = 0.$$

Таким образом, применяя методы малого параметра и комплексного вида, можно описать автоколебания в открытом водном потоке с учетом сужения русла. Полученные уравнения могут быть использованы для дальнейшего анализа устойчивости гидравлического режима.

Рассмотрим конкретный пример автоколебательного режима в открытом водном потоке с сужением русла как с одним из измененных внешних факторов с применением метода малого параметра. Будем учитывать влияние сужения на уровень воды в русле и колебания потока, применяя метод интегрирующего множителя для решения уравнений динамики течения.

Условия задачи. Предполагаем, что в прямолинейном открытом канале (ширина b , длина L) имеется участок сужения. Этот участок и уровень воды h могут изменяться в зависимости от времени. Ширина сужения равна b_s . Уровень воды в канале описывается уравнением неразрывности и уравнением Бернулли.

Уравнения динамики. Запишем уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0,$$

где $q = A(h) \cdot v$ – расход воды.

Дополним уравнение Бернулли:

$$\frac{dh}{dt} + \frac{g}{A(h)} \frac{dA(h)}{dt} = 0.$$

При малом параметре ϵ уровень колебаний запишется как

$$h(t) = h_0 + \epsilon H e^{i\omega t},$$

где H – амплитуда колебаний; h_0 – среднее значение.

Площадь поперечного сечения. Рассмотрим сужение, которое влияет на площадь поперечного сечения: $A_s(h) = b_s \cdot h$ для суженного участка.

Уравнение движения. Среднее значение:

$$\frac{d^2 h}{dx^2} + \frac{g}{A(h)} \frac{As dh}{dt} = 0.$$

Применим метод интегрирующего множителя. Для этого предполагаем, что $\mu(t) = e^{\int \frac{g}{A(h)} dt}$. Умножая на $\mu(t)$ и рассматривая асимптотику, получаем: $\mu(t) \frac{dh}{dt} + \frac{gh}{A(h)} = 0$.

После подстановки и получения дифференциального уравнения получим:

$$\frac{d(\mu(t)h)}{dt} = -g \frac{\mu(t)h}{A(h)}.$$

Решение полученного уравнения. После упрощения уравнения, подставляя в него выражение для $A(h)$ и разделив переменные и интегрировав, можно найти выражение колебания уровня воды в зависимости от времени:

$$\int \frac{1}{h} dh = -g \int \frac{1}{A(h)} dt.$$

Интегрируем от начального условия $h(0) = h_0$ до развития колебаний $H(t)$. Получим общее решение. Используя условия на границах, вычислим динамику колебаний, то есть зависимость уровня воды от времени, и уравнение для анализа устойчивости.

Таким образом, с помощью метода малого параметра и интегрирующего множителя можно эффективно проанализировать автоколебательный режим в открытом потоке с учетом сужения русла, что позволит определить динамику уровня воды и его изменения во времени в условиях сужающегося потока.

Выводы

Анализ различных моделей осцилляций свободной поверхности жидкости позволяет прийти к нескольким ключевым выводам.

Список использованных источников

1. Комаристая К.О. Особенности волновых процессов / К.О. Комаристая // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 3-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 21-22 марта 2019 года / Юго-Западный государственный университет, Московский политехнический университет. Том 3. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2019. С. 163-167. EDN: DDMTBM
2. Чугунов В.А. Точные и приближенные решения одномерных уравнений «мелкой воды» и их физическая интерпретация // Информационные технологии и математическое моделирование в экономике, технике, экологии, образовании, педагогике и торговле. 2014. № 7. С. 135-154. EDN: TNAFDJ
3. Костюк В.И. Методы малых параметров в теории дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1975.
4. Губарев А.Н. Методы анализа и синтеза систем с малыми параметрами. Санкт-Петербург: Питер, 2000.
5. Keller H.B. Numerical Methods for Two-Point Boundary Value Problems. New York: Springer, 1987.
6. Vasilev V.V., Kolesnikov A.V. Asymptotic Methods in Analysis. London: Cambridge University Press, 2010.
7. Ландау Л.Д. Квантовая механика: Ненормальные задачи / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. М.: Наука, 1989.
8. Mahan G.D. Many-Particle Physics, New York: Plenum Press, 2000.
9. Смирнов М.А. Вращательная зависимость резонансов типа Кориолиса t Ферми в малых линейных молекулах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2012, № 6 (82). С. 24-30

Многообразие моделей. Существует множество моделей, описывающих осцилляции, каждая из которых имеет свои характеристики и области применения. Это подчеркивает сложность явления и необходимость использования комплексного подхода для точного описания динамики.

Влияние нелинейных сил и обратной связи. Нелинейные силы и механизмы обратной связи играют важную роль в формировании и поддержании автоколебаний. Эти элементы являются критическими для понимания устойчивости и изменения амплитуды колебаний.

Методы расчета. Сравнительный анализ методов – таких, как метод интегрирующего множителя и комплексный подход, показывает, что каждый из них имеет свои преимущества в зависимости от условий задачи. Поэтому выбор метода должен основываться на специфике исследуемого явления и необходимой точности расчетов.

Экспериментальная верификация. Необходимость подтверждения теоретических расчетов экспериментальными данными для более детального понимания специфики автоколебательных процессов.

References

1. Komaristaya K.O. Features of wave processes / K.O. Komaristaya // Youth and science: a step towards success: collection of scientific articles of the 3rd All-Russian Scientific Conference of Promising developments of young Scientists, Kursk, March 21-22, 2019 / Southwestern State University, Moscow Polytechnic University. Volume 3. Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2019. P. 163-167. EDN: DDMTBM
2. Chugunov V.A. Exact and approximate solutions of one-dimensional shallow water equations and their physical interpretation / V.A. Chugunov // Information technologies and mathematical modeling in economics, technology, ecology, education, pedagogy and trade. 2014. No. 7. P. 135-154. EDN: TNAFDJ
3. Kostyuk V.I. Methods of small parameters in the theory of differential equations. Moscow: Nauka, 1975.
4. Gubarev A.N. Methods of analysis and synthesis of systems with small parameters. St. Petersburg: Peter, 2000.
5. Keller H.B. Numerical Methods for Two-Point Boundary Value Problems. New York: Springer, 1987.
6. Vasilev V.V., Kolesnikov A.V. Asymptotic Methods in Analysis. London: Cambridge University Press, 2010.
7. Landau L.D., Lifshits E.M. Quantum Mechanics: Abnormal Problems / L.D. Landau, E.M. Lifshits. Moscow: Nauka, 1989.
8. Mahan G.D. Many-Particle Physics, New York: Plenum Press, 2000.
9. Smirnov M.A. Rotational dependence of Coriolis type resonances Fermi t in small linear molecules // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2012, No. 6 (82). P. 24-30

10. Гринберг Я.С. Квантовые колебания в системах Ферми / Я.С. Гринберг, В.Н. Костюков // Физика твердого тела, том 48, № 5, 2006, с. 825-830. DOI: 10.1134/S1063783406050058.

11. Костюков В.Н. Квантовая механика и статистическая физика. М.: Физматлит, 2003.

12. Фартуков В.А. Асимптотический метод расчета параметров водного потока при сопряжении бьефов гидротехнических сооружений / В.А. Фартуков, М.В. Земляникова // Природообустройство. 2019. № 2. С. 96-99. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-96-100

13. Земляникова М.В. Качественная оценка динамической системы нелинейных колебаний прыжкового сопряжения бьефов. // В сборнике: Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем. Материалы международной научно-практической конференции. 2006. / В.А. Фартуков, М.В. Земляникова. М.: МГУП, 2006. С. 398-401.

10. Grinberg Ya.S. "Quantum oscillations in Fermi systems." / Ya.S. Grinberg, V.N. Kostyukov // Solid State Physics, vol. 48, No. 5, 2006, P. 825-830. DOI: 10.1134/S1063783406050058.

11. Kostyukov V.N. Quantum mechanics and statistical Physics. Moscow: Fizmatlit, 2003.

12. Fartukov V.A. An asymptotic method for calculating water flow parameters when coupling streams of hydraulic structures / V.A. Fartukov, M.V. Zemlyannikova // Prirodoobustroystvo. 2019. No. 2. P. 96-99. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-96-100

13. Zemlyannikova M.V. Qualitative assessment of the dynamic system of nonlinear oscillations of the jump coupling of streams / M.V. Zemlyannikova, V.A. Fartukov // In the collection: The role of environmental management in ensuring the sustainable functioning and development of ecosystems. Materials of the international scientific and practical conference. 2006. Moscow: MGUP, 2006. P. 398-401.

Об авторах

Василий Александрович Фартуков, канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидротехнические сооружения»; Scopus AuthorID: 57494508400; ORCID: 0000-0003-2852-7210; SPIN-код: 5656-7629; AuthorID: 1002745; vasfar@mail.ru

Марина Ильинична Зборовская, канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидротехнические сооружения»; WoS Researcher ID: AAE-2570-2022; Scopus AuthorID: 57219607364; ORCID: 0000-0002-8405-8757; SPIN-код: 6748-0927; AuthorID: 326001; moo_abh@mail.ru, zborovskya@rgau-msha.ru

About the authors

Vasily A. Fartukov, CSc (Eng), associate professor of the department "Hydro technical structures": vasfar@mail.ru; Scopus AuthorID: 57494508400; ORCID: 0000-0003-2852-7210; SPIN-code: 5656-7629; AuthorID: 1002745

Marina I. Zborovskaya, CSc (Eng), associate professor of the department "Hydro technical structures": zborovskya@rgau-msha.ru; WoS ResearcherID: AAE-2570-2022; Scopus AuthorID: 57219607364; ORCID: 0000-0002-8405-8757; SPIN-code: 6748-0927; AuthorID: 326001; moo_abh@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Фартуков В.А., Зборовская М.И. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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 at the editorial office 12.02.2025

Одобрена после рецензирования и доработки / Received after review and revision 15.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 15.04.2025

Fartukov V.A., Zborovskaya M.I. performed theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-77-84>

УДК 556.54:004.42



РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ АНАЛИЗА, ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭВТРОФИКАЦИИ ВОДОЕМОВ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

А.В. Евграфов^{1✉}, Д.А. Москвичев¹, М.В. Климахина²

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

²ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; Технологический колледж; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

Аннотация. В статье рассматривается разработка программного обеспечения для анализа, оценки и прогнозирования эвтрофикации водоемов с использованием языка программирования Python. Эвтрофикация – это процесс, характеризующийся избыточным накоплением питательных веществ в водоемах, что приводит к ухудшению качества воды и негативным последствиям для экосистемы. Разработано программное обеспечение для персонального компьютера, которое использует методы машинного обучения и статистического анализа для обработки данных о химическом составе воды: содержание в ней минеральных веществ, водородные показатели рН и температура, которая влияет на эвтрофикацию водных объектов. Программа состоит из модулей сбора данных и предварительной обработки, которые основаны на эмпирических моделях, позволяющих составить сценарий развития ситуации. Основное внимание уделяется разработке интуитивно понятного интерфейса, который позволяет пользователям без глубоких знаний в программировании взаимодействовать с инструментом. Представлены результаты тестирования программы на данных, полученных по результатам наблюдения и отбора проб за 2023-2024 гг. из Нижнего фермского пруда. Сравнение результатов, оценка точности прогнозирования с помощью программы с полученными экспериментальными данными за два года исследований показывают эффективность разработанного программного обеспечения. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными составило не более 5%, что говорит о возможности использования данного инструмента для прогнозных расчетов и составления сценария развития экологической обстановки, применения превентивных мер для предотвращения или минимизации цветения водных объектов. Таким образом, программное обеспечение – полезный инструмент для экологов, исследователей и органов управления водными ресурсами, способствующий более эффективному управлению водоемами и сохранению их экосистем.

Ключевые слова: разработка программного обеспечения, оценка, прогнозирование, качество воды, эвтрофикации водоемов, программирование

Формат цитирования: Евграфов А.В., Москвичев Д.А., Климахина М.В. Разработка программы для анализа, оценки и прогнозирования эвтрофикации водоемов на языке программирования Python // Природообустройство. 2025. № 3. С. 77-84. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-77-84>

Original article

DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR THE ANALYSIS, ASSESSMENT AND FORECASTING OF EUTROPHICATION OF WATER BODIES IN THE PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE

A.V. Evgrafov^{1✉}, D.A. Moskvichev¹, M.V. Klimakhina²

¹Timiryazev Russian Agrarian University– Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

²Timiryazev Russian Agrarian University – Moscow Agricultural Academy; College of Technology, 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

Abstract. This article discusses the development of software for the analysis, assessment and forecasting of water bodies eutrophication using the Python programming language. Eutrophication is a process characterized by excessive accumulation of nutrients in water bodies, which leads to deterioration in water quality and negative consequences for the ecosystem. As part of the work, software for a personal computer was developed that uses machine learning and statistical analysis methods to process data on the chemical composition of water: the content of minerals, hydrogen pH and temperature, which affects

the eutrophication of water bodies. The program consists of data collection and pre-processing modules, which are based on empirical models that allow you to create a scenario for the development of the situation. The main focus is on the development of an intuitive interface that allows users without deep knowledge of programming to interact with the tool. The article also presents the results of testing the program on the data obtained from observations and sampling for 2023-2024 from the lower farm pond. Comparison of the results, assessment of the forecasting accuracy using the program with the experimental data obtained over two years of research show the effectiveness of the developed software. The discrepancy between the calculated and experimental data was no more than 5%, which indicates the possibility of using this tool for predictive calculations and drawing up a scenario for the development of the environmental situation, the use of preventive measures to prevent or minimize the bloom of water bodies. Thus, the software is a useful tool for ecologists, researchers and water resources management authorities, contributes to more efficient management of water bodies and the preservation of their ecosystems.

Keywords: software development, assessment, forecasting, water quality, eutrophication of water bodies, programming

Format of citation: Evgrafov A.V., Moskvichev D.A., M.V. Klimakhina. Development of a program for the analysis, assessment and forecasting of eutrophication of water bodies in the Python programming language // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 77-84. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-77-84>

Введение. Современные экосистемы водоемов сталкиваются с серьезными вызовами, связанными с эвтрофикацией – процессом, который приводит к ухудшению качества воды и негативным последствиям для биологического разнообразия [1]. Основная угроза эвтрофикации заключается в том, что это явление труднообратимо. Оно изменяет тип круговорота веществ с пастбищного на детритный, что в свою очередь упрощает биотическую структуру экосистемы и уменьшает количество видов водных организмов. В отличие от естественного антропогенное эвтрофирование происходит быстрее ввиду увеличения массы веществ, участвующих в биохимических процессах, и нарастающей нагрузки биогенными веществами. Также стоит отметить, что некоторые виды водорослей, способствующие эвтрофикации водоемов, могут быть ядовитыми для флоры и фауны [2]. Цветение водоемов представляет опасность как для животных, так и для человека. Если водоросли попадают в организм, они выделяют нейротоксины и гепатотоксины, которые могут привести к серьезному отравлению. Примером воздействия токсинов из водорослей на человека служит отравление моллюсками [3]. Биотоксины, образующиеся во время цветения водорослей, накапливаются в моллюсках (мидиях, устрицах), что делает эти продукты небезопасными для людей. Случаи паралитического, нейротоксического и диарейного отравления моллюсками также имеют место. Другие морские организмы могут быть переносчиками таких токсинов.

В условиях растущего антропогенного давления и изменения климата необходимость в эффективных инструментах для анализа и прогнозирования этого явления становится все более

актуальной. В данной статье представлена разработка программного обеспечения на языке Python, которое направлено на решение этой проблемы [4]. Программа сочетает в себе передовые методы машинного обучения и статистического анализа, что позволяет не только обрабатывать данные о качестве воды, но и строить точные прогнозы на основе собранной информации. Мы акцентируем внимание на создании удобного интерфейса, который делает инструмент доступным для пользователей с различным уровнем подготовки.

В ходе работы проведено тестирование программы на реальных данных, что позволило оценить ее эффективность и точность прогнозов. Результаты показывают, что разработанное решение может стать важным шагом к более устойчивому управлению водными ресурсами и сохранению экосистем, открывая новые горизонты для дальнейших исследований в этой области.

Материалы и методы исследований. Эвтрофикация водоемов представляет собой серьезную экологическую проблему, вызванную избыточным накоплением питательных веществ – таких, как азот и фосфор [5]. Этот процесс приводит к ухудшению качества воды, цветению водорослей и снижению уровня кислорода, что негативно сказывается на состоянии водной флоры и фауны. Для анализа и мониторинга эвтрофикации разработаны различные методы, которые помогают оценить состояние водоемов и прогнозировать возможные изменения.

Одним из наиболее распространенных методов является использование статистического анализа, который позволяет выявить зависимости между уровнями питательных веществ и состоянием экосистемы [6]. Этот подход включает в себя сбор данных о качестве воды – таких, как

концентрация нитратов, фосфатов, температура и рН. На основе этих данных можно строить модели, которые помогают прогнозировать развитие эвтрофикации.

Машинное обучение также находит широкое применение при анализе эвтрофикации. Алгоритмы – такие, как регрессионные модели и деревья решений, позволяют обрабатывать большие объемы данных и выявлять сложные паттерны, которые могут быть неочевидными при традиционном анализе. Эти методы могут использоваться для создания предсказательных моделей, которые помогают в управлении водными ресурсами.

Кроме того, современные технологии дистанционного зондирования предоставляют возможность мониторинга состояния водоемов в реальном времени. С помощью спутниковых снимков и других сенсоров можно отслеживать изменения в экосистемах и оперативно реагировать на потенциальные угрозы.

Таким образом, интеграция различных методов анализа, включая статистику, машинное обучение и дистанционное зондирование, создает мощные инструменты для оценки и прогнозирования эвтрофикации. Эти подходы способствуют более эффективному управлению водными ресурсами и сохранению экосистем, что особенно важно в условиях глобальных изменений климата и антропогенного воздействия.

Для разработки программы необходимо собрать данные о водоемах. Это могут быть данные из открытых источников – таких, как государственные экологические службы, а также данные, полученные в результате полевых исследований [8]. Данные должны быть очищены и подготовлены для анализа, что включает в себя обработку пропусков, нормализацию и преобразование переменных.

Программа разрабатывается с использованием библиотек Python – таких, как Pandas для обработки данных, Matplotlib и Seaborn для визуализации, а также Scikit-learn для применения методов машинного обучения [7]. Основные этапы разработки включают в себя:

- импорт необходимых библиотек;
- загрузку и предварительную обработку данных;
- анализ данных с использованием статистических методов;
- построение моделей для прогнозирования эвтрофикации;
- визуализацию результатов.

Эмпирическая модель программы для анализа, оценки и прогнозирования эвтрофикации

водоемов представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

Таким образом алгоритм работы включает в себя:

- сбор данных – сбор экспериментальных данных по параметрам воды (температура, рН, концентрация нитратов, фосфатов, ХПК, прозрачность, биомасса фитопланктона) за определенный период;
- предобработку данных – очистку данных (удаление пропусков, аномалий), нормализацию данных (если необходимо);
- анализ данных – вычисление статистических показателей (средние, медианы, стандартные отклонения), построение графиков для визуализации изменений параметров;
- оценку состояния водоема – определение уровня эвтрофикации на основе собранных данных (например, по критериям, установленным в научной литературе), классификацию состояния водоема (например, от «чистого» до «сильно загрязненного»);
- прогнозирование – использование методов машинного обучения (например, регрессию, деревья решений) для прогнозирования будущих изменений параметров, обучение модели на исторических данных;
- вывод результатов – отображение результатов анализа и прогнозов, генерацию отчетов.

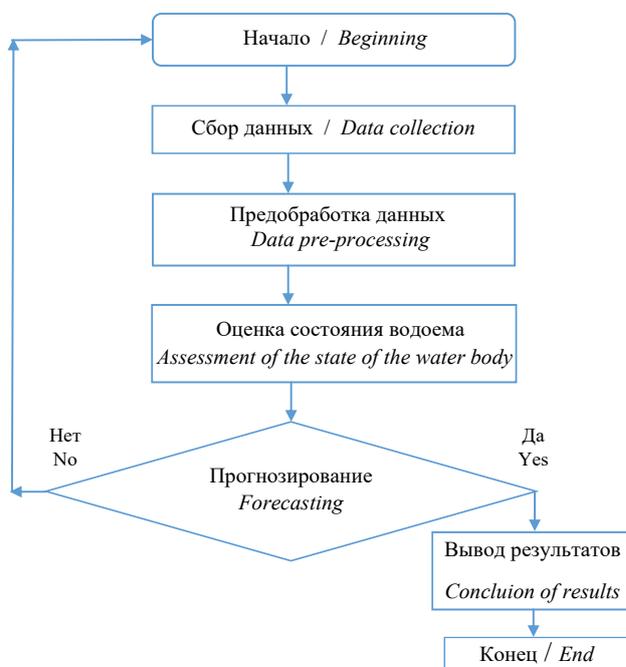
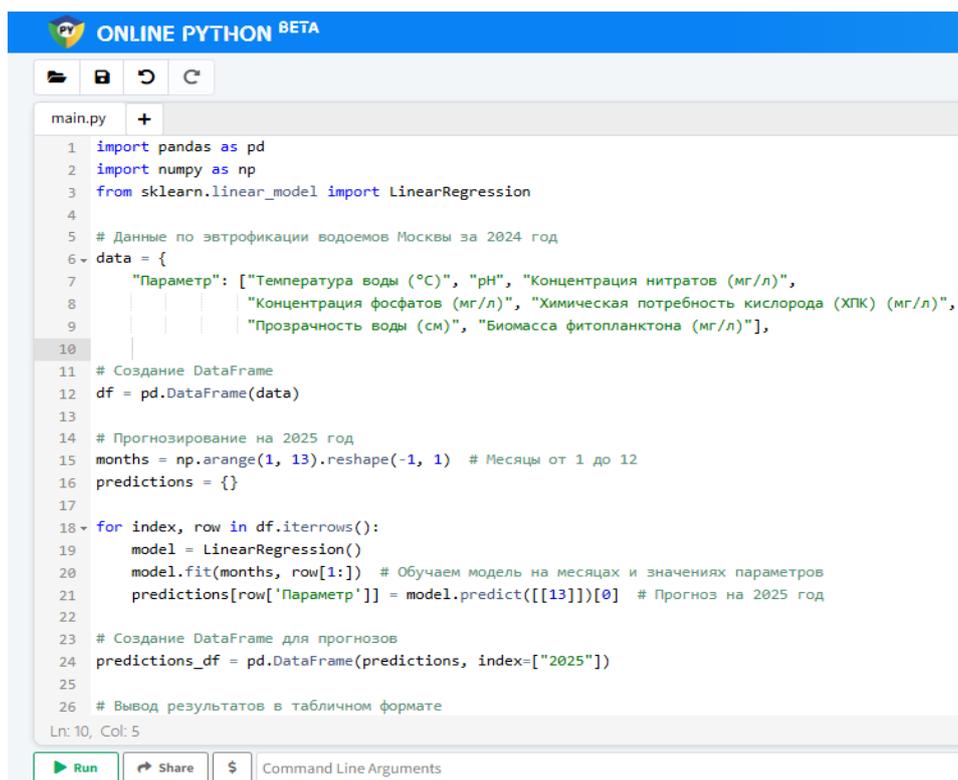


Рис. 1. Блок-схема программы для анализа, оценки и прогнозирования эвтрофикации водоемов

Fig. 1. Flowchart of the program for epy analysis, assessment and prediction of eutrophication of water bodies



```

ONLINE PYTHON BETA
main.py
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 from sklearn.linear_model import LinearRegression
4
5 # Данные по эвтрофикации водоемов Москвы за 2024 год
6 data = {
7     "Параметр": ["Температура воды (°C)", "pH", "Концентрация нитратов (мг/л)",
8                 "Концентрация фосфатов (мг/л)", "Химическая потребность кислорода (ХПК) (мг/л)",
9                 "Прозрачность воды (см)", "Биомасса фитопланктона (мг/л)"],
10
11 # Создание DataFrame
12 df = pd.DataFrame(data)
13
14 # Прогнозирование на 2025 год
15 months = np.arange(1, 13).reshape(-1, 1) # Месяцы от 1 до 12
16 predictions = {}
17
18 for index, row in df.iterrows():
19     model = LinearRegression()
20     model.fit(months, row[1:]) # Обучаем модель на месяцах и значениях параметров
21     predictions[row['Параметр']] = model.predict([[13]])[0] # Прогноз на 2025 год
22
23 # Создание DataFrame для прогнозов
24 predictions_df = pd.DataFrame(predictions, index=["2025"])
25
26 # Вывод результатов в табличном формате
Ln: 10, Col: 5
Run Share Command Line Arguments

```

Рис. 2. Фрагмент программы ЭВМ для анализа, оценки и прогнозирования эвтрофикации водоемов

Fig. 2. Fragment of a computer program for the analysis, assessment and forecasting of eutrophication of water bodies

Для оценки эффективности разработанных моделей используются метрики – такие, как средняя абсолютная ошибка (MAE) и коэффициент детерминации $-R^2$. Это позволяет определить, насколько точно модель прогнозирует уровень эвтрофикации [8, 9].

На основе обученной модели можно прогнозировать изменения уровня эвтрофикации в будущем. Это позволяет принимать меры по предотвращению негативных последствий и улучшению состояния водоемов [10, 11].

На рисунке 2 представлен разработанный фрагмент программы для анализа, оценки и прогнозирования эвтрофикации водоемов.

В качестве экспериментальных данных были выбраны фермские пруды (рис. 3), расположенные в Тимирязевском районе г. Москвы, а именно Нижний фермский пруд.

Климатические данные были получены от метеостанции «Балчут» г. Москвы. Данные по составу воды в фермских прудах определены на основании проб воды, которые отбирались еженедельно (в таблице 1 приведены средние значения за месяц).

Полученные данные по составу воды в пробах (эвтрофикации) за 2023-2024 год представлены в таблице 1.



Рис. 3. Фрагмент карты места нахождения Нижнего фермского пруда, г. Москва

Fig. 3. Fragment of the map of the location of the "Lower Farm pond" in Moscow

Таблица 1. Экспериментальные данные по эвтрофикации за 2023-2024 год

Table 1. Experimental data on eutrophication for 2023-2024

Параметр/Месяц Parameter / Month	Январь January	Февраль February	Март March	Апрель April	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October	Ноябрь November	Декабрь December
2023												
Температура воды (°C) Water temperature (°C)	3.0	2.0	6.0	11.0	16.0	21.0	23.0	20.0	17.0	9.0	4.0	2.0
pH	7.1	7.0	7.2	7.5	7.7	7.9	8.1	8.0	7.6	7.3	7.2	7.1
Концентрация нитратов (мг/л) Concentration of nitrates (mg / l)	4.0	4.5	5.5	7.0	14.0	19.0	24.0	21.0	17.0	11.0	7.0	5.0
Концентрация фосфатов (мг/л) Concentration of phosphates (mg / l)	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	1.1	1.6	1.4	1.0	0.5	0.3	0.2
Химическая потребность кислорода (ХПК) (мг/л) Chemical oxygen demand (COD) (mg / l)	11.0	10.0	13.0	16.0	26.0	31.0	36.0	34.0	29.0	21.0	16.0	13.0
Прозрачность воды (см) Water transparency (cm)	48	52	43	38	28	22	14	17	26	34	44	49
Биомасса фитопланктона (мг/л) Phytoplankton biomass (mg / l)	12	14	17	22	48	95	125	115	75	38	18	14
2024												
Температура воды (°C) Water temperature (°C)	2.5	1.8	5.0	10.0	15.0	20.0	22.5	21.0	16.0	10.0	5.0	3.0
pH	7.0	6.9	7.1	7.4	7.6	7.8	8.0	7.9	7.5	7.2	7.1	7.0
Концентрация нитратов (мг/л) Concentration of nitrates (mg / l)	5.0	5.5	6.0	8.0	15.0	20.0	25.0	22.0	18.0	12.0	8.0	6.0
Концентрация фосфатов (мг/л) Concentration of phosphates (mg / l)	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	1.3	0.9	0.4	0.2	0.1
Химическая потребность кислорода (ХПК) (мг/л) Chemical oxygen demand (COD) (mg / l)	10.0	9.5	12.0	15.0	25.0	30.0	35.0	33.0	28.0	20.0	15.0	12.0
Прозрачность воды (см) Water transparency (cm)	50	55	45	40	30	20	15	18	25	35	45	50
Биомасса фитопланктона (мг/л) Phytoplankton biomass (mg / l)	10	12	15	20	50	100	120	110	80	40	20	15

Температура воды, °C, показывает изменение температуры в течение года. pH – уровень кислотности или щелочности воды, важный для оценки здоровья экосистемы. Концентрация нитратов и фосфатов – это питательные вещества, способствующие эвтрофикации и измеряющиеся как мг на 1 л (мг/л). Химическая потребность кислорода (ХПК) – параметр, который показывает количество кислорода, необходимое для разложения органических веществ. Прозрачность воды измеряется в сантиметрах и указывает на чистоту воды. Биомасса фитопланктона, мг/л, показывает уровень фитопланктона, который может увеличиваться ввиду эвтрофикации.

По данным таблицы 1, качество воды резко ухудшалось в мае как в 2023 г., так и в 2024 г., – начиналось цветение водоема.

Для проверки корректности работы программы в Python были проведены расчеты за 2023-2024 гг. (табл. 2). Сравнение экспериментальных и модельных данных показало, что максимальное расхождение между данными, полученными экспериментальным и расчетным путем, составило не более 10%. Это делает возможным применение данного программного комплекса для прогнозных расчетов.

Эти данные могут быть использованы для анализа тенденций эвтрофикации в фермских прудах г. Москвы, а также для разработки стратегий по управлению водными ресурсами.

При использовании программы в Python спрогнозированы значения эвтрофикации на 2025 г. (табл. 3).

Таблица 2. Расчетные данные по эвтрофикации за 2023-2024 год, полученные при использовании программы в Phyton

Table 2. Estimated eutrophication data for 2023-2024 obtained when using the program in Phyton

Параметр/Месяц Parameter / Month	Январь January	Февраль February	Март March	Апрель April	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October	Ноябрь November	Декабрь December
2023												
Температура воды (°C) / Water temperature (°C)	2,7	2,2	5.8	11.8	17.0	20.0	25.0	19.4	18.0	11.7	3.7	2.3
pH	7.2	6.7	7.0	7.2	7.4	8.4	8.2	8.0	7.7	7.0	7.4	6.8
Концентрация нитратов (мг/л) Concentration of nitrates (mg / l)	3.6	4.4	5.5	7.4	15.0	18.4	24.0	23.0	18.1	11.0	7.5	5.4
Концентрация фосфатов (мг/л) Concentration of phosphates (mg / l)	0.2	0.2	0.2	0.4	0.6	1.1	1.6	1.4	1.0	0.5	0.3	0.2
Химическая потребность кислорода (ХПК) (мг/л) Chemical oxygen demand (COD) (mg / l)	10.0	10.0	14.0	15.0	24.0	33.0	34.0	31.0	31.0	23.0	14.0	14.2
Прозрачность воды (см) Water transparency (cm)	50	54	44	37	26	23	15	18	28	34	47	53
Биомасса фитопланктона (мг/л) Phytoplankton biomass (mg / l)	11	15	15	23	45	97	111	121	81	35	16	15
2024												
Температура воды (°C) / Water temperature (°C)	2.3	1.6	4.7	11.0	17.0	19.0	23.5	23.0	15.4	9.8	5.0	2.7
pH	7.3	7.0	7.3	7.4	7.8	7.5	8.0	7.8	7.4	7.0	6.9	7.0
Концентрация нитратов (мг/л) Concentration of nitrates (mg / l)	5.0	5.0	6.4	8.3	15.0	21.5	27.4	21.0	18.5	11.7	8.7	6.4
Концентрация фосфатов (мг/л) Concentration of phosphates (mg / l)	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	1.3	0.9	0.4	0.2	0.1
Химическая потребность кислорода (ХПК) (мг/л) Chemical oxygen demand (COD) (mg / l)	11.0	8.5	11.3	16.1	23.3	33.0	36.0	30.0	29.4	20.0	14.0	11.9
Прозрачность воды (см) Water transparency (°C)	45	57	43	44	33	22	15	17	23	33	47	48
Биомасса фитопланктона (мг/л) Phytoplankton biomass (mg / l)	10	11	16	19	48	104	118	110	85	43	21	14

Таблица 3. Полученные данные по эвтрофикации с использованием Phyton на 2025 год

Table 3. Obtained data on eutrophication using Phyton for 2025

Параметр/Месяц Parameter / Month	Январь January	Февраль February	Март March	Апрель April	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October	Ноябрь November	Декабрь December
Температура воды (°C) / Water temperature (°C)	2.5	1.8	5.0	10.0	15.0	20.0	22.5	21.0	16.0	10.0	5.0	3.0
pH	7.1	6.8	7.2	7.5	7.7	7.9	8.1	8.0	7.6	7.3	7.2	7.1
Концентрация нитратов (мг/л) Concentration of nitrates (mg / l)	5.2	5.7	6.3	8.5	16.0	21.0	26.0	23.0	19.0	12.5	8.5	6.2
Концентрация фосфатов (мг/л) Concentration of phosphates (mg / l)	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.1	1.6	1.4	1.0	0.5	0.3	0.1
Химическая потребность кислорода (ХПК) (мг/л) Chemical oxygen demand (COD) (mg / l)	10.5	9.8	12.5	16.0	26.0	31.0	36.0	34.0	29.0	21.0	15.5	12.5
Прозрачность воды (см) Water transparency (cm)	49	54	44	39	29	19	14	17	24	34	46	49
Биомасса фитопланктона (мг/л) Phytoplankton biomass (mg / l)	11	13	16	21	52	105	125	115	82	42	21	16

Прогнозируемое повышение температуры воды, концентрации нитратов и фосфатов, а также биомассы фитопланктона указывает на возможное ухудшение состояния водоемов, что может привести к более выраженной эвтрофикации. Увеличение химической потребности кислорода и снижение прозрачности воды также подтверждают эту тенденцию.

Управление водными ресурсами и контроль за качеством воды становятся критически важными для предотвращения дальнейшей деградации экосистемы водоемов г. Москвы. Рекомендуется осуществлять регулярный мониторинг и внедрять меры по улучшению состояния водоемов.

Список использованных источников

1. Дидманидзе О.Н. Экспериментальные исследования влияния освещения на эвтрофикацию водоемов и работу систем капельного орошения / О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, Д.А. Москвичев [и др.] // Природообустройство. 2024. № 3. С. 6-12. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-3-6-12. EDN: OGHRMF
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683359 Российская Федерация. «Техническое обслуживание и ремонт автомобилей»: № 2024682911: заявл. 02.10.2024; опубл. 14.10.2024 / Д.А. Москвичев, А.С. Гузалов, А.В. Евграфов, Д.А. Филимонов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». EDN: AKVBAS
3. Зиновьева А.Е. Влияние активной реакции воды (рН) на распределение водных и прибрежно-водных растений в водоемах юга Обь-Иртышского междуречья / А.Е. Зиновьева, Д.А. Дурников // Известия Алтайского государственного университета. 2012. № 3-2 (75). С. 21-24. EDN: PMDMCF
4. ГОСТ 31865-2012. Вода. Единица жесткости. М.: Стандартинформ, 2019.
5. Ивчатов А.Л. Химия воды и микробиология: Учебник / А.Л. Ивчатов, В.И. Малов. М.: ИНФРА-М, 2011. 216 с. EDN: QKTQGH
6. Беспалова К.В. Питьевое водоснабжение в условиях массового развития сине-зеленых водорослей на водохранилищах / К.В. Беспалова, А.В. Селезнева, В.А. Селезнев // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 2. С. 121-134. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-9. EDN: KSKHDN
7. Москвичев Д.А. Особенности разработки компьютерной программы для систем управления тракторами сельскохозяйственного назначения на основе искусственного интеллекта / Д.А. Москвичев, Р.Т. Хакимов // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 4(121). С. 29-37. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-4121-29-37. EDN: OAPAPS
8. Москвичев Д.А. Применение интеллектуальных и роботизированных систем в сельском хозяйстве / Д.А. Москвичев // Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева: Сборник статей, Москва, 05-07 июня 2023 года. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. С. 554-557. EDN: ZITRIM

Выводы

Разработка программы для анализа, оценки и прогнозирования эвтрофикации водоемов на языке Python является важным шагом в решении экологических проблем. Использование современных методов обработки данных и машинного обучения позволяет эффективно анализировать состояние водоемов и прогнозировать изменения, что способствует более рациональному управлению водными ресурсами. В дальнейшем планируется расширение функционала программы включая интеграцию с геоинформационными системами и разработку пользовательского интерфейса.

References

1. Didmanidze O.N.. Experimental studies of the influence of lighting on the eutrophication of reservoirs and the operation of drip irrigation systems / O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, D.A. Moskvichev [et al.] // Prirodobustrojstvo. 2024. No. 3. P. 6-12. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-3-6-12. EDN: OGHRMF
2. Certificate of state registration of the computer program No. 2024683359 Russian Federation. "Car maintenance and repair": No. 2024682911: application 02.10.2024; published 14.10.2024 / D.A. Moskvichev, A.S. Guzalov, A.V. Evgrafov, D.A. Filimonov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev". EDN: AKVBAS
3. Zinovieva A.E. The influence of the active reaction of water (pH) on the distribution of aquatic and coastal aquatic plants in reservoirs in the south of the Ob-Irtysh interfluvium / A.E. Zinovieva, D.A. Durnikin // Proceedings of the Altai State University. 2012. No. 3-2 (75). P. 21-24. EDN: PMDMCF
4. GOST 31865-2012. Water. Unit of hardness. Moscow: Standartinform, 2019.
5. Ivchatov A.L. Water chemistry and microbiology: textbook / A.L. Ivchatov, V.I. Malov. Moscow: INFRA-M, 2011. 216 p. EDN: QKTQGH
6. Bespalova K.V. Drinking water supply in conditions of mass development of blue-green algae in reservoirs / K.V. Bespalova, A.V. Selezneva, V.A. Seleznev // Russian water industry: problems, technologies, management. 2021. No. 2. pp. 121-134. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-9. EDN: KSKHDN
7. Moskvichev D.A. Features of the development of a computer program for agricultural tractor control systems based on artificial intelligence / D.A. Moskvichev, R.T. Khakimov // Agroecoengineering. 2024. No. 4(121). P. 29-37. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-4121-29-37. EDN: OAPAPS
8. Moskvichev D.A. Application of intelligent and robotic systems in agriculture / D.A. Moskvichev // International scientific conference of young scientists and specialists dedicated to the 180th anniversary of the birth of K.A. Timiryazev: Collection of articles, Moscow, 05-07 June 2023. Moscow: RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev, 2023. P. 554-557. EDN: ZITRIM
9. Moskvichev D.A. Improving the monitoring system of agricultural machinery / D.A. Moskvichev // Proceedings of the International Scientific Conference of young scientists

9. Москвичев Д.А. Совершенствование системы мониторинга сельскохозяйственной техники / Д.А. Москвичев // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича: Сборник статей, Москва, 03-05 июня 2024 года. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. С. 535-539. EDN: PZSLBK

10. Eremina T. Analysis of decadal dynamics of eutrophication parameters in the Eastern part of the Gulf of Finland / T. Eremina, A. Ershova, E. Lange // 8th Baltic Sea Science Congress: Book of abstracts, St. Petersburg, 22-26 августа 2011 года. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2011. P. 219. EDN: IXKJIS

Об авторах

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

Дмитрий Александрович Москвичев, канд. техн. наук; ORSID:0009-0002-7082-4876, AuthorID: 964662, moskvichev@rgau-msha.ru 89773547973.

Марина Владимировна Климахина, канд. с.-х. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-2673-4964, AuthorID: 1108029, mklimahina@yandex.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Евграфов А.В., Москвичев Д.А., Климахина М.В. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare no conflicts of interests

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 at the editorial office 11.03.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 01.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 01.04.2025

and specialists dedicated to the 150th anniversary of the birth of A.Ya. Milovich: Collection of articles, Moscow, June 03-05, 2024. Moscow: RGAU-MSHA named after K.A. Timiryazev, 2024. P. 535-539. EDN: PZSLBK

10. Eremina T. Analysis of decadal dynamics of eutrophication parameters in the Eastern part of the Gulf of Finland / T. Eremina, A. Ershova, E. Lange // 8th Baltic Sea Science Congress: Book of abstracts, St. Petersburg, 22-26 августа 2011 года. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2011. P. 219. EDN: IXKJIS

About the authors

Alexey V. Evgrafov, DSc (Eng), associate professor; ORSID: 0000-0002-2313-2191, AuthorID: 828739; labpoliv@list.ru

Dmitry A. Moskvichev, CSc (Eng), associate professor ORSID:0009-0002-7082-4876, AuthorID: 964662, moskvichev@rgau-msha.ru

Marina V. Klimakhina, CSc (Agro), associate professor, ORCID: 0000-0002-2673-4964, AuthorID: 1108029, mklimahina@yandex.ru

Evgrafov A.V., Moskvichev D.A., M.V. Klimakhina. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-85-92>

УДК 626/627:556.11



РАЗРАБОТКА ПЕРВООЧЕРЕДНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ, ПРОИЗВОДИМЫХ ДО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА ИЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ

В.Б. Жезмер

ФГБНУ Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44, корп. 2, Россия

Аннотация. Цель исследований заключалась в определении первоочередных мероприятий по повышению пропускной способности гидромелиоративной системы, выполняемых до осуществления капитального ремонта или реконструкции. Методы защиты ГТС и поддержания условий их безаварийной эксплуатации в настоящее время разработаны достаточно подробно и широко применяются. Вопрос заключается в целесообразности, последовательности, интенсивности и месте их применения. В условиях дефицита финансовых средств, выделяемых на восстановление гидромелиоративных систем, имеет смысл проводить анализ распределения затрат на восстановление работоспособности ГМС согласно закону Парето (принцип Парето, принцип 80/20), который в наиболее общем виде формулируется как «...20% усилий дают 80% результата, а остальные 80% усилий – лишь 20% результата». В нашем случае применительно к линейным сооружениям это означает ликвидацию отдельных неисправностей, наиболее существенно влияющих на пропускную способность канала. Такие неисправности можно считать узким звеном. Узкое звено – это любой ресурс, чья пропускная способность равна или меньше потребности в нем. При недостаточном уровне или отсрочке финансирования осуществляется определение «узких звеньев» в работе системы с целью их устранения и повышения производительности ГМС. Кроме того, определяется экономическая эффективность мероприятий. В нашем случае узкое место – участок линейного сооружения, чья пропускная способность равна или меньше необходимой в настоящее время. Снижение пропускной способности, как правило, происходит вследствие уменьшения поперечного сечения канала по разным причинам. Решение по способу восстановления работоспособности сооружений принимается после детального обследования в зависимости от вида и объема работ, наличия доступной техники и ресурсов, в том числе финансовых. При анализе конкретного объекта (Сарпинской ООС Республики Калмыкия) установлено, что стоимость ликвидации узких мест составляет 0,23% от стоимости капитального ремонта. Указанные работы относятся к текущему ремонту. Эксплуатация линейного сооружения после такой ликвидации является мерой временной, однако позволяет осуществлять водообеспечение эксплуатируемых в настоящее время площадей в течение ограниченного периода, предшествующего ремонту или реконструкции.

Ключевые слова: водопользование, гидромелиоративные системы (ГМС), гидротехнические сооружения (ГТС), линейные сооружения, эффективность водоподачи, безопасность ГТС

Формат цитирования: Жезмер В.Б. Разработка первоочередных мероприятий по повышению пропускной способности гидромелиоративной системы, производимых до осуществления капитального ремонта или реконструкции // Природообустройство. 2025. № 3. С. 85-92. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-85-92>

Original article

DEVELOPMENT OF PRIORITY MEASURES TO INCREASE THE CAPACITY OF THE HYDRAULIC RECLAMATION SYSTEM, PRODUCED BEFORE THE IMPLEMENTATION OF MAJOR REPAIRS OR RECONSTRUCTION

V.B. Zhezmer

A.N. Kostyakov Federal State Budgetary Institution Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation; 44 B. Akademicheskaya str., bldg. 2, Moscow, 127434, Russia

Abstract. Methods for protecting hydraulic structures and maintaining conditions for their trouble-free operation have currently been developed in sufficient detail and are widely used. The question is one of appropriateness, consistency, intensity and place of their application. In the context of a shortage

of financial resources allocated for the restoration of hydromelioration systems, it makes sense to conduct an analysis of the distribution of costs for restoring the operability of hydromelioration systems in accordance with the Pareto Law. The Pareto law in its most general form is formulated as “20% of the effort gives 80% of the result, and the remaining 80% of the effort gives only 20% of the result.” In our case, as applied to linear structures, this means eliminating individual faults that have the most significant impact on the canal’s throughput. Such faults can be considered as bottlenecks. A bottleneck is a resource whose capacity to provide bandwidth is less than the demand for it. If the level of funding is insufficient or funding is delayed, bottlenecks in the system’s operation are identified in order to eliminate them and improve the performance of the HMS. In addition, the economic efficiency of the measures is determined. In our case, the bottleneck is a section of a linear structure whose capacity is equal to or less than that currently required. The decrease in throughput usually occurs due to a decrease in the canal cross-section due to various reasons. The decision on the method for restoring the functionality of the structures is made after a detailed examination, depending on the type and volume of work, the availability of available equipment and resources, including financial ones. When analyzing a specific facility (Sarpinskaya OOS of the Republic of Kalmykia), it was found that the cost of eliminating bottlenecks is 0.23% of the cost of major repairs. The above works are related to current repairs. Operation of a linear structure after such liquidation is a temporary measure, but it allows for water supply to irrigated areas currently in operation for a limited period prior to repair or reconstruction.

Keywords: water use, irrigation and drainage systems (IDS), hydraulic structures (HS), linear structures, water supply efficiency, HS safety

Format of citation: Zhezmer V.B. Development of priority measures to increase the capacity of the hydraulic reclamation system, produced before the implementation of major repairs or reconstruction // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 85-92. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-85-92>

Введение. В Указе Президента РФ от 30 января 2010 г. № 120 говорится о том, что обеспечение продовольственной безопасности страны сопряжено с рисками, которые могут существенно ее ослабить. К наиболее значимым относятся агроэкологические риски, обусловленные неблагоприятными климатическими изменениями, а также чрезвычайными ситуациями, в том числе возникающими при эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) мелиоративного комплекса [1].

Методы защиты ГТС и поддержания условий их безаварийной эксплуатации в настоящее время разработаны достаточно подробно и широко применяются. Вопрос заключается в целесообразности, последовательности, интенсивности и месте их применения. Согласно Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [2] необходимо осуществление мер по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений. При этом собственник гидротехнического сооружения и (или) эксплуатирующая организация обязаны обеспечивать соблюдение обязательных требований при эксплуатации гидротехнических сооружений, а также их техническое обслуживание и текущий ремонт. В то же время средств на ремонт у собственника или эксплуатирующей организации, как правило, бывает недостаточно.

В настоящее время выбор способа восстановления работоспособности ГМС проводится

исключительно на основе существующих нормативных документов. Пропускная способность гидромелиоративной системы зависит от степени повреждения конструкций и линейных объектов. Линейный объект (сооружение) – это объект, линейная протяженность которого несоизмеримо больше его поперечных размеров [3]. К линейным сооружениям гидромелиоративных систем относятся каналы, трубопроводы, закрытые дренажи, собиратели [4].

Степень повреждения конструкций и линейных объектов определяется в ходе регулярного обследования, на основании чего составляется соответствующий акт. Следует отметить, что наряду с капитальным ремонтом и реконструкцией существует система планово-предупредительных ремонтов, представляющая собой комплекс организационно-технических мероприятий, осуществляемых в плановом порядке с целью содержания систем и сооружений в постоянной надлежащей эксплуатационной готовности [5].

Поскольку постоянно ощущается дефицит финансовых средств, выделяемых на восстановление гидромелиоративных систем, имеет смысл проводить анализ распределения затрат на восстановление работоспособности ГМС согласно закону Парето. Закон Парето (принцип Парето, принцип 80/20) – эмпирическое правило, названное в честь экономиста и социолога Вильфредо Парето, в наиболее общем виде формулируется как «...20% усилий дают 80%

результата, а остальные 80% усилий – лишь 20% результата». Принцип может использоваться как базовая установка в анализе факторов эффективности какой-либо деятельности и оптимизации ее результатов: правильно выбрав минимум самых важных действий, можно быстро получить значительную часть от планируемого полного результата, при этом дальнейшие улучшения могут быть неэффективными. В нашем случае применительно к линейным сооружениям это означает ликвидацию отдельных неисправностей, наиболее существенно влияющих на пропускную способность канала. Такие неисправности можно считать узкими звеньями.

Согласно работе Э. Голдратта «Цель» [6] узкое звено – это любой ресурс, чья пропускная способность равна или меньше потребности в нем. При недостаточном уровне или отсрочке финансирования определяются узкие звенья в работе системы с целью их устранения и повышения производительности ГМС, а также экономическая эффективность мероприятий.

Материалы и методы исследований.

Работы проводились на основании анализа существующих нормативных документов по защите и безопасной эксплуатации ГТС – таких, как Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [7], СП 421.1325800.2018. Свод правил. Мелиоративные системы и сооружения. Правила эксплуатации [8]. Необходимость и способ проведения ремонтно-восстановительных работ определялись согласно Градостроительному кодексу Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. [9], СТО 4.2-6-2014. Мелиоративные системы и сооружения. Эксплуатация. Основные положения по проведению планово-предупредительного ремонта [10], Системы и сооружения мелиоративные. РЕКОНСТРУКЦИЯ [11].

Обследование объектов проводилось на основании общепринятых методик – таких, как ГОСТ Р 70566-2022. Системы и сооружения мелиоративные. Правила обследования и мониторинга технического состояния [12], а также согласно правилам составления акта регулярного обследования [13].

При разработке первоочередных мероприятий по повышению пропускной способности гидромелиоративной системы руководствовались принципом Парето и способом определения узких звеньев [6]. В тексте приведены фотографии и космоснимки разных лет из архива автора. Научно-методические основы исследований базируются на работах отдела гидротехники и гидравлики и лаборатории безопасности ГТС

гидромелиоративного комплекса ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова» по обследованию с участием автора, гидротехнических сооружений в Московской, Волгоградской, Владимирской, Курганской и других областях Российской Федерации, а также в Республике Крым и Республике Калмыкия.

Результаты и их обсуждение. В нашем случае узкое место – участок линейного сооружения, чья пропускная способность равна или меньше необходимой в настоящее время. Снижение пропускной способности, как правило, происходит вследствие уменьшения поперечного сечения канала по приведенным ниже причинам:

- заиливание профиля канала (рис. 1);
- образование препятствий движению воды в русле канала (рис. 2);
- разрушение гребня канала (рис. 3);
- интенсивное зарастание откосов канала (рис. 4).



Рис. 1. Заиливание профиля канала
Fig. 1. Silting of the canal profile



Рис. 2. Образование препятствий движению воды в русле канала
Fig. 2. The formation of obstacles in the canal bed that hinder the flow of water



Рис. 3. Разрушение гребня канала

Fig. 3. Destruction of the canal ridge



Рис. 4. Интенсивное зарастание откосов канала

Fig. 4. Intensive overgrowth of the canal slopes

Способы восстановления пропускной способности каналов, в том числе устранения «узких мест», могут быть различными как по составу производимых работ, так и по набору применяемых механизмов. Так, расчистка профиля канала от заиливания может производиться одноковшовыми экскаваторами с ковшом вместимостью 2,5; 1; 0,65; 0,4; 0,25 м³, многоковшовыми экскаваторами поперечного черпания с ковшом вместимостью 15 л и другими способами. Расценки на производство работ при этом будут значительно различаться [14].

Способ восстановления гидромелиоративных систем зависит от изложенных ниже факторов.

*Обеспечение уровня водоподачи**, необходимо:

– для водообеспечения орошаемых в настоящее время мелиорированных земель;

– для дополнительного водообеспечения вовлекаемых в оборот деградированных мелиорированных земель сельскохозяйственного назначения (уровень водоподачи определяется исходя из площадей, орошаемых данной ГМС,

типа орошения и водопотребности выращиваемых культур).

Состояние и степень износа объектов гидромелиоративной системы [13].

Комплекс мероприятий, необходимых для восстановления ГМС:

– до работоспособного состояния – текущий ремонт [10];

– до проектных значений – капитальный ремонт [15];

– до повышения технико-экономических показателей системы – реконструкция [16].

Выбор способа восстановления ГМС достаточно сложен и неоднозначен. Кроме того, определение стоимости работ может варьироваться в значительных пределах. При недостаточном уровне или отсрочке финансирования определяются узкие места в работе системы с целью их устранения и повышения производительности ГМС.

Сравнение эффективности и стоимости мероприятий по ремонту сооружений и устранению узких мест осуществлялось на примере Сарпинской оросительно-обводнительной системы Республики Калмыкия.

Мероприятия по повышению эффективности функционирования указанной системы можно подразделить на две группы:

– работы по ликвидации узких мест. К таким работам относятся ликвидация препятствий движению воды в русле канала и мероприятия по приведению гребня дамбы до проектных параметров с целью ликвидации мест возможного перелива воды;

– работы по восстановлению объектов гидромелиоративной системы, относящиеся к капитальному ремонту или реконструкции, куда входят мероприятия по приведению гребня дамбы до проектных параметров, расчистке мест интенсивного зарастания откосов канала, расчистке мест заиливания профиля канала, а также уплотнение откосов канала с целью предотвращения интенсивной фильтрации.

При расчете сравнительной стоимости работ по ликвидации узких мест и работ, осуществляемых при капитальном ремонте сооружений, а также влияния ликвидации «узких звеньев» на пропускную способность канала в количественном выражении были использованы следующие документы и программы:

– «ВНиР. Ведомственные нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Сборник В12. Специальные работы в мелиоративном и водохозяйственном строительстве» [17];

– Федеральные единичные расценки на строительные и специальные строительные работы. ФЕР 81-02-01-2001 [14];

– Программа «ГРАНД-Смета», предназначенная для автоматизации определения сметной стоимости строительства и учета выполненных работ [18].

Расчет стоимости работ по восстановлению объектов гидромелиоративной системы, а также работ по ликвидации «узких мест» производился аналогично расчету стоимости ликвидации препятствий движению воды в русле канала (табл. 1).

Стоимость ликвидации препятствий движению воды в русле канала общей протяженностью порядка 100 м составляет 458056,34 руб. Увеличение пропускной способности при ликвидации препятствий, несомненно, будет иметь место, однако численное значение повышения можно установить только посредством натуральных исследований. При изучении указанного вопроса [19-21] авторы статей пришли к выводу о том, что точная оценка производительности и профилей поверхности воды, даже при испытаниях в лотках и аналогичных искусственно созданных сооружениях, сопряжена со значительными трудностями, вследствие чего ограничились результатами численного моделирования.

Стоимость ликвидации мест возможного перелива воды через дамбу канала общей протяженностью 130 м составляет 199266,43 руб. В результате ликвидации «узких мест» реальное поперечное сечение канала на всем протяжении

линейного объекта составит 42 м², что позволит беспрепятственно пропускать необходимое для затопления эксплуатируемых в настоящее время рисовых чеков количество воды при неразмывающей скорости потока 0,28-0,36 м/с [22].

Естественно, что достичь уровня водообеспечения, необходимого для затопления дополнительных площадей под рисом, можно только после увеличения профиля канала до проектных значений. Все необходимые для этого работы, согласно СТО 4.2-6-2014 [10], относятся к текущему ремонту, который необходимо проводить на всем протяжении канала, – 58700 м. Но поскольку, согласно указанному документу, «К текущему ремонту относятся ремонтные работы..., не превышающие 20% балансовой стоимости ремонтируемого объекта на открытой и 15% на закрытой мелиоративной сети и гидротехнических сооружениях», при таком уровне затрат это уже капитальный ремонт.

В результате приведенных выше мероприятий по восстановлению объектов гидромелиоративной системы поперечное сечение канала возрастет до проектных отметок (77 м²), то есть при той же неразмывающей скорости потока [17] имеется возможность подавать почти вдвое большее количество воды, что позволит в 2 раза увеличить площади под рисом.

Сравнение затрат на проведение мероприятий по восстановлению объектов гидромелиоративной системы и работ по ликвидации «узких мест» приведено в таблице 2.

Таблица 1. Расчет стоимости расчистки мест интенсивного зарастания откосов канала деревьями

Table 1. Calculation of the cost of clearing areas of intensive overgrowth of canal slopes with trees

Общая протяженность, м <i>Total length, m</i>	Наименование работ <i>Name of works</i>	Единица измерения <i>Unit measurements</i>	Количество / Quantity	Общая стоимость с накладными расходами и сметной прибылью в текущем уровне цен (2024 г.), руб. <i>Total cost with overhead costs and estimated profit at the current price level (2024), RUB.</i>	
				На единицу измерения <i>Per unit of measurement</i>	Всего <i>Total</i>
15000	Валка деревьев с корня, диаметр стволов: свыше 16 до 20 см <i>Felling of trees from the root, trunk diameter: over 16 to 20 cm</i>	100 шт. <i>100 pcs</i>	37	6944,86	256 959.82
	Трелевка хлыстов древесины на расстояние до 300 м тракторами мощностью: 79 кВт (108 л.с.), диаметр стволов до 20 см <i>Skidding of logs of timber at a distance of up to 300 m with tractors with a power of: 79 kW (108 hp), trunk diameter up to 20 cm</i>	100 шт. <i>100 pcs</i>	37	13 585,90	502 678.30
ИТОГО <i>TOTAL</i>					759 638.12

Таблица 2. Сравнительная стоимость мер по устранению повреждений линейных объектов Сарпинской оросительно-обводнительной системы

Table 2. Comparative cost of measures to eliminate damages to linear objects of the Sarpinskaya irrigation and water supply system

Работы <i>Works</i>	Общая стоимость с накладными расходами и сметной прибылью в текущем уровне цен (2024 г.), руб. <i>Total cost with overhead costs and estimated profit at the current price level (2024, rbl.</i>	В % к сумме <i>In % of the amount</i>
Работы по ликвидации «узких мест» / Work to eliminate bottlenecks		
Ликвидация препятствий движению воды в русле канала <i>Elimination of obstacles to water movement in the canal bed</i>	458 056,34	
Мероприятия по приведению гребня дамбы до проектных параметров с целью ликвидации мест возможного перелива воды <i>Measures to bring the dam crest up to design parameters in order to eliminate potential water overflow areas</i>	199 266,43	
Всего / Total	557 322,77	0,23
Работы по восстановлению объектов гидромелиоративной системы, относящиеся к капитальному ремонту <i>Work on restoration of hydromelioration system facilities related to major repairs</i>		
Расчистки мест интенсивного зарастания откосов канала деревьями <i>Clearing areas of intensive overgrowth of canal slopes with trees</i>	759 638,12	
Расчистки мест заиливания профиля канала <i>Clearing silted areas of the canal profile</i>	241 500 621,97	
Уплотнение откосов каналов с целью ликвидации интенсивной фильтрации <i>Sealing of canal slopes to eliminate intensive filtration</i>	2 995 538,94	
Мероприятия по приведению гребня дамбы до проектных параметров с целью ликвидации мест возможного перелива воды <i>Measures to bring the dam crest up to design parameters in order to eliminate potential water overflow areas</i>	199 266,43	
Всего / Total	245 455 065,46	99,77
ИТОГО / TOTAL	246 012 388,23	100,00

Из данных таблицы следует, что стоимость ликвидации узких мест составляет 0,23% от стоимости капитального ремонта. Указанные работы, согласно СТО «Мелиоративные системы и сооружения» [10], относятся к текущему ремонту. Собственник ГТС и (или) эксплуатирующая организация обязаны проводить техническое обслуживание, эксплуатационный контроль и текущий ремонт гидротехнических сооружений [2]. Даже при дефиците средств на ремонт и реконструкцию ГТС сравнительно незначительные суммы, необходимые для ликвидации узких мест, собственником ГТС или эксплуатирующей организацией могут быть изысканы. Естественно, что эксплуатация линейного сооружения после этого является мерой временной, однако позволяет осуществлять водообеспечение эксплуатируемых в настоящее время площадей в течение ограниченного периода, предшествующего ремонту или реконструкции.

Выводы

1. В условиях постоянного дефицита финансовых средств, выделяемых на восстановление гидромелиоративных систем, имеет смысл проводить анализ распределения затрат на восстановление работоспособности ГМС согласно закону Парето (принцип Парето, принцип 80/20), который в наиболее общем виде формулируется как «...20% усилий дают 80% результата, а остальные 80% усилий – лишь 20% результата».
2. При недостаточном уровне или отсрочке финансирования определяются «узкие звенья» в работе системы с целью устранения и повышения производительности ГМС, а также экономическая эффективность мероприятий по их ликвидации.
3. Наибольшая эффективность первоочередных мероприятий по повышению пропускной способности системы, выполняемых до осуществления капитального ремонта или

реконструкции, отмечается при ликвидации «узких мест» – участков линейного сооружения, чья пропускная способность равна или меньше необходимой в настоящее время.

4. При проведении анализа конкретного объекта (Сарпинской ООС Республики Калмыкия) установлено, что стоимость ликвидации узких мест составляет 0,23% от стоимости

капитального ремонта. Указанные работы относятся к текущему ремонту. Эксплуатация линейного сооружения после такой ликвидации является мерой временной, однако позволяет осуществлять водообеспечение эксплуатируемых в настоящее время площадей в течение ограниченного периода, предшествующего ремонту или реконструкции.

Список использованных источников

1. Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 30 января 2010 г. № 120.
2. О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ, ред. от 8 августа 2024 г., с изм. и доп., вступ. в силу с 1 сентября 2024 г.
3. ГОСТ 34968-2023 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Инженерные изыскания» от 20 июля 2023 г.
4. ГОСТ 21-709-2019 «Правила выполнения рабочей документации линейных сооружений гидромелиоративных систем». М.: Стандартинформ, 2020. 24 с.
5. Правила эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений: утв. Минсельхозпродом РФ 26 мая 1998 г. Дата сохранения: 13.12.2016 http://www.old.tunadzor.rwdoc/zem/pravila_ekspl.pdf (дата обращения: 22.04.2024).
6. Голдратт Э. Цель. Процесс непрерывного совершенствования. «Альпина Диджитал». М., 2004. 226 с.
7. О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1997. № 30, ст. 3589; 2018. № 31, ст. 4860. docs.cntd.ru/document/420225740 (дата обращения: 11.07.2024).
8. Свод правил «СП 421.1325800.2018. Свод правил. Мелиоративные системы и сооружения. Правила эксплуатации»: утв., введ. приказом Минстроя России от 24 декабря 2018 г. № 854/пр. М.: Стандартинформ, 2019. docs.cntd.ru/document/554403585 (дата обращения: 11.07.2022).
9. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (принят Государственной Думой 22 декабря 2004 г.).
10. СТО 4.2-6-2014. Мелиоративные системы и сооружения. Эксплуатация. Основные положения по проведению плано-предупредительного ремонта. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014.
11. Системы и сооружения мелиоративные. РЕКОНСТРУКЦИЯ. Общие требования. rosniiipm.ru/TK151...R_Ameliorative...Interrupted...into... (дата обращения: 22.04.2023).
12. ГОСТ Р 70566-2022. Системы и сооружения мелиоративные. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
13. Об утверждении формы акта регулярного обследования гидротехнического сооружения (за исключением судоходных и портовых гидротехнических сооружений): приказ Ростехнадзора от 4 декабря 2020 г. № 497, рег. в Минюсте России 18 декабря 2020 г. № 61552.
14. Государственные сметные нормативы. Федеральные единичные расценки на строительные и специальные строительные работы. ФЕР 81-02-01-2001. Приложение № 1 к приказу Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской

References

1. Decree of the President of the Russian Federation of January 30, 2010 No.120 “On Approval of the Doctrine of food security of the Russian Federation” base.garant.ru/12172719// (accessed 31.05.2023).
2. Federal Law of 21.07.1997 No. 117-FZ (as amended on 08.08.2024) “On the safety of hydraulic structures” (with amendments and additions, effective from 01.09.2024) (accessed 31.01.2025).
3. “GOST 34968-2023 Main pipeline transportation of oil and petroleum products. Engineering Surveys” dated 20.07.2023 (Accessed 22.04.2024).
4. GOST 21-709-2019 Rules for the implementation of working documentation of linear structures of hydro-reclamation systems M. Standartinform. 2020. 24 p. (Accessed 07.03.2025).
5. Rules for the operation of reclamation systems and separately located hydraulic structures” (approved by the Ministry of Agriculture and Food of the Russian Federation on 26.05.1998) Date saved: 13.12.2016 http://www.old.tunadzor.rwdoc/zem/pravila_ekspl.pdf (Accessed 22.04.2024).
6. Goldratt E. Goal. Continuous improvement process. Alpina Digital, Moscow, 2004. 226 p.
7. Federal Law of July 21, 1997 No 117-FZ “On the Safety of Hydraulic Structures” (Collected Legislation of the Russian Federation, 1997, No 30, art. 3589; 2018, No 31, art. 4860) docs.cntd.ru/document/420225740 (accessed 11.07.2024).
8. The Code of Rules “SP 421.1325800.2018. Code of Rules. Reclamation systems and structures. Operating Rules”, approved and put into effect by the order of the Ministry of Construction of Russia dated 24.12.2018 No 854/pr (Moscow: Standartinform, 2019). docs.cntd.ru/document/554403585 (accessed 11.07.2022).
9. Town planning Code of the Russian Federation of December 29, 2004 No 190-FZ (adopted by the State Duma on December 22, 2004).
10. SТО 4.2-6-2014. Reclamation systems and structures. Operation. Basic provisions for scheduled preventive maintenance. Novocherkassk, RosNIIPM, 2014.
11. Reclamation systems and structures. RECONSTRUCTION. General requirements. rosniiipm.ru/TK151...R_Ameliorative... Interrupted...into... (Accessed 22.04.2023).
12. GOST R70566-2022 Reclamation systems and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition.
13. Order of Rostekhnadzor dated 04.12.2020 No. 497 “On Approval of the Form of the Act of Regular Inspection of Hydraulic Structures (Except for Navigable and Port Hydraulic Structures)” (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 18.12.2020 No. 61552).
14. State Estimate Standards. Federal Unit Rates for Construction and Special Construction Works. FER81-02-01-2001. Appendix No 1 to the Order of the Ministry

Федерации от 26 декабря 2019 г. № 876/пр. minstroyrf.gov.ru/trades/view.fer-2020.php (дата обращения: 26.04.2024).

15. Министерство финансов Российской Федерации. Письмо от 17 октября 2017 г. № 03-03-РЗ/67741.docs.cntd.ru/document/440597565 (дата обращения: 13.07.2024).

16. Министерство финансов Российской Федерации. Департамент налоговой и таможенной политики. Письмо от 6 октября 2017 г. № 03-03-06/1/65431docs.cntd.ru/document/456097843 (дата обращения: 13.07.2024 г.).

17. ВНиР. Ведомственные нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Сборник В12. Специальные работы в мелиоративном и водохозяйственном строительстве. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/vnir_vedomstvennye-normy-i-rascenki/0/vnir_vedomstvennye-normy_i_rascenki_na_stroitelnye_822.html.

18. Программа «ГРАНД-Смета», включенная в Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных. Запись в реестре № 11163 от 21.07.2021 г. произведена на основании приказа Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 21 июля 2021 г. № 750. URL: <https://www.grandsmeta.ru/product-grand-smeta> (дата обращения: 19.08.2024).

19. Ebrahim Hamid Hussein Al-Qadami a, Abdurrahman Sa'id Abdurrahman Za-hiraniza Mustaffa, Khamaruzaman Wan Yusof M.A. Malek b, Aminuddin Ab Ghani. Numerical modelling of flow characteristics over sharp crested triangular hump. Results in Engineering. 2019. December. Vol. 4. 100052. Pp. 136-142.

20. A. Ferrari, SPH simulation of free surface flow over a sharp-crested weir, Adv. Water Resour. 2010. № 33 (3). Pp. 270-276.

21. A.S.I. Abdurrahman K.W. Yusof, H.B. Takaijudin, A. Ab, B.S. Iskandar, Effects of backwater on hydraulic performance evaluation of rainsmart modules in sustainable drainage systems // International Conference on Water Resources, Langkawi, Malaysia, 2018. November. Pp. 27-28.

22. ВТР-П-25-80. Ведомственные строительные нормы. Руководство по определению допускаемых неразмывающих скоростей водного потока для различных грунтов при расчете каналов: утв. приказом Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР 4 декабря 1980 г. № 409, дата введения 1981-06-01.

Об авторе

Валентин Борисович Жезмер, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией безопасности ГТС; SPIN-код: 3974-7933; AuthorID: 897093; //orcid.org/0000-0003-2889-5638; v1532133@yandex.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Жезмер В.Б. выполнил практические и теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись. Жезмер В.Б. имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 12.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after review and revision 12.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 12.05.2025

of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation dated December 26, 2019 No 876/pr. minstroyrf.gov.ru/trades/view.fer-2020.php (Accessed 26.04.2024).

15. Ministry of Finance of the Russian Federation. Letter dated 17.10.2017 No 03-03-RZ/67741docs.cntd.ru/document/440597565 (accessed 13.07.2024).

16. Ministerstvo finansov Rossiyskoy Federatsii Departament nalogovoy i tamozhennoy politiki Pis'mo ot 06.10.2017 № 03-03-06/1/65431docs.cntd.ru/document/456097843 (data obrashcheniya 13.07.2024 g.).

17. VNiR. Departmental norms and prices for construction, installation and repair and construction works. Collection B12. Special works in reclamation and water management construction. https://meganorm.ru/mega_doc/norm/vnir_vedomstvennye-normy-i-rascenki/0/vnir_vedomstvennye-normy_i_rascenki_na_stroitelnye_822.html

18. The GRAND-Smeta program is included in the Unified Register of Russian Programs for Electronic Computers and Databases. The entry in the register No11163 dated 07/21/2021 was made on the basis of the order of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation dated 07/21/2021 No750. <https://www.grandsmeta.ru/product-grand-smeta> (accessed 19.08.2024)

19. Ebrahim Hamid Hussein Al-Qadami a, Abdurrahman Sa'id Abdurrahman Za-hiraniza Mustaffa, Khamaruzaman Wan Yusof M.A. Malek b, Aminuddin Ab Ghani. Numerical modelling of flow characteristics over sharp crested triangular hump. – Results in Engineering, Volume 4, December 2019, 100052 P. 136-142.

20. A. Ferrari, SPH simulation of free surface flow over a sharp-crested weir, Adv. Water Resour. 33 (3) (2010) 270-276.

21. A.S.I. Abdurrahman K.W. Yusof, H.B. Takaijudin, A. Ab, B.S. Iskandar, Effects of backwater on hydraulic performance evaluation of rainsmart modules in sustainable drainage systems, in: International Conference on Water Resources, Langkawi, Malaysia, November, 2018, pp. 27-28

22. VTR-P-25-80. Departmental Construction Standards. Guidelines for Determining the Permissible Non-Erosion Velocities of Water Flow for Different Soils in Channel Design. Date of introduction 1981-06-01 Approved by the order of the Ministry of Land Reclamation and Water Resources of the USSR on December 4, 1980, N409.

About the author

Valentin B. Zhezmer, candidate of agricultural sciences, leading researcher, head of the laboratory of safety of hydraulic structures irrigation and drainage complex; SPIN-код: 3974-7933; AuthorID: 897093; //orcid.org/0000-0003-2889-5638 v1532133@yandex.ru

V.B. Zhezmer carried out practical and theoretical research, on the basis of which he generalized and wrote a manuscript. Zhezmer V.B. has copyright on the article and is responsible for plagiarism.

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

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-93-100>

УДК 630*:551.583



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОМЕЛИОРАТИВНЫХ ПОЛОС ЮГА РОССИИ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

Н.В. Примаков^{1,2✉}, М.А. Бандурин², В.А. Волосухин²

¹Кубанский государственный университет; 350040 г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, Россия

²Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены результаты исследований полезащитных лесомелиоративных систем в условиях возрастающих климатических изменений на юге России. Изменения частоты и возрастания резкости смены погодных явлений, а именно постепенный переход от четырех времен года к двум временам – зима и лето, уже создает определенные трудности в возделывании сельскохозяйственных культур для аграриев нашей страны, что может поставить под угрозу продовольственную безопасность России. Основная цель исследований – анализ неблагоприятных природных явлений, связанных с изменением климата на юге России, а именно изучение роли лесозащитных насаждений в комплексной системе коррекционных мероприятий в современных условиях для снижения последствий погодных явлений в стрессовых условиях агроландшафта. Исследования проводились на черноземах обыкновенных. В результате исследований полезащитных лесомелиоративных систем установлено, что все 10 лесных полос имеют отклонение в конструкции. Рекомендуемая ажурная конструкция в результате неконтролируемого роста (без должного ухода) замещена плотной конструкцией. Лесные полосы с главной древесной породой из *Robinia pseudoacacia L* имеют более устойчивую 3-ю (сильно ослабленные) категорию экологического состояния насаждений. В некоторых лесных полосах отмечаются участки, подверженные распаду в результате их деградации или вырубке. Распределение по высотам насаждений на изучаемых вариантах составляет от 5,83 (*Fraxinus pubescens Marsh*) до 12,62 м (*Robinia pseudoacacia L*) при их среднем значении для двух районов от 10,14 до 10,34 м. Использование полезащитных лесомелиоративных насаждений в комплексе системы, направленной на смягчение стрессовых ситуаций на полях агроландшафтов, подтверждается как эффективное. Увеличение территории защитного эффекта на полях возможно при восстановлении лесомелиоративных сообществ, приведении конструкций к рекомендуемым.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда (грант № 24-26-20003)

Ключевые слова: лесомелиоративный комплекс, изменение климата, микроклимат, агроландшафт, ветровой поток, лесные полосы

Формат цитирования: Примаков Н.В., Бандурин М.А., Волосухин В.А. Оценка эффективности лесомелиоративных полос юга России при климатических изменениях // Природообустройство. 2025. № 3. С. 93-100. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-93-100>

Scientific article

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF FOREST RECLAMATION BELTS IN THE SOUTH OF RUSSIA UNDER CLIMATE CHANGE

N.V. Primakov^{1,2✉}, M.A. Bandurin², V.A. Volosukhin²

¹Kuban State University; 149 Stavropol Street, Krasnodar, 350040. Russia

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; 13 Kalinina St., Krasnodar, 350044. Russia

Abstract. The article considers the studies of field-protective forest melioration systems in the conditions of increasing climate change in the south of Russia. Changes in the frequency and increase in the sharpness

of changes in weather phenomena, namely the gradual transition from four seasons to two seasons – winter and summer, already creates certain difficulties in the cultivation of agricultural crops for farmers of our country, which can threaten the food security of Russia. The main objective of the study is to analyze adverse natural phenomena associated with climate change in the south of Russia, namely, to study the role of forest protection plantations in a comprehensive system of corrective measures in modern conditions to reduce the effects of weather phenomena in stressful conditions of the agroforest landscape. The studies were conducted on ordinary chernozems (black soils). As a result of the studies of field-protective forest melioration systems, it was found that all 10 forest belts have a deviation in the design. The recommended openwork design as a result of uncontrolled growth (without proper care) is replaced by a dense one. Forest belts with the main tree species of black locust have a more stable 3 (strongly weakened) category of ecological condition of stands. In some forest belts, there are areas subject to decay as a result of their degradation or cutting. Distribution by heights of stands in the studied variants ranges from 5.83 m (*Fraxinus pubescens Marsh*) to 12.62 m (*Robinia pseudoacacia L*), with their average value for two regions from 10.14 m to 10.34 m. The use of field-protective forest reclamation plantations in a complex of the system aimed at mitigating stress situations in the fields of agrolandscapes is confirmed to be effective. An increase in the territory of the protective effect on the fields is possible with the restoration of forest reclamation communities, bringing the structures to the recommended ones.

Financing. The work was financially supported by the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation (grant No. 24-26-20003)

Keywords: forest reclamation complex, climate change, microclimate, agrolandscape, wind flow, forest belts. forest reclamation complex, climate change, microclimate, agrolandscape, wind flow, forest belts

Format of citation: Primakov N.V., Bandurin M.A., Volosukhin V.A. Assessment of the effectiveness of forest reclamation belts in the South of Russia under climatic changes // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 93-100. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-93-100>

Введение. История использования лесомелиоративных насаждений в Краснодарском крае насчитывает несколько десятилетий. Еще в середине XX в. ученые и практики начали осознавать необходимость создания лесных полос для защиты полей от ветровой эрозии и улучшения микроклимата. Эти насаждения стали важной частью стратегии устойчивого сельского хозяйства в регионе. В настоящее время климатические изменения требуют пересмотра подходов к использованию лесных полос, чтобы сделать их еще более эффективными в новых условиях.

Россия, обладая огромной территорией и разнообразием климатических зон, всегда сталкивалась с природными катаклизмами. Однако в последние два десятилетия эта проблема приобрела новый масштаб. Одной из ключевых причин увеличения числа погодных катаклизмов является глобальное потепление. Средняя температура на планете повышается, что приводит к изменению традиционных климатических режимов. В России это проявляется в увеличении числа экстремальных метеорологических явлений – таких, как аномальная жара, проливные дожди и сильные ветры.

На юге России за последние 50 лет средняя температура начала стремительно повышаться. Так, только за период с 1980 по 2022 гг. средняя

температура повысилась почти на 1°C, при этом среднегодовой прирост температуры составил почти 0,2°C/декаду. Среднегодовой прирост температуры по территории России составил в 2023 г. уже более +0,45°C/декаду [1].

Изменения в количестве и распределении осадков влияют на водный баланс региона [2]. Изменение климата ведет к снижению урожайности культур, ухудшению качества почв и увеличению затрат на ирригационные системы [3]. Одним из главных вызовов современного сельского хозяйства в Краснодарском крае является изменение климата. В последние годы наблюдается тенденция повышения средней температуры воздуха, что приводит к усилению засухливости и увеличению частоты экстремальных метеорологических явлений – таких, как засуха и сильные ветры. Эти изменения ставят перед сельхозпроизводителями новые задачи по сохранению и улучшению плодородия почв, обеспечению стабильного водоснабжения и защите урожая от негативных внешних факторов. Засухи и наводнения становятся все более частым явлением, что требует внедрения новых технологий и методов ведения сельского хозяйства [4, 5].

Целью работы является анализ неблагоприятных природных явлений в связи с изменением климата, изучение роли лесных

полезащитных насаждений в системе комплексных мелиоративных мероприятий в современных условиях по смягчению воздействия погодных явлений в стрессовых условиях на агролесоландшафты юга России.

Материалы и методы исследований.

Объектом исследований являются агролесоландшафты Краснодарского края. Изучение характеристик лесных полеззащитных насаждений определяли по общепринятым методикам [6]. Скорость ветрового потока изучали при помощи ручного чашечного анемометра МС-13 в пятикратной повторности. Вычисление скорости ветра выполняли по переводному графику. Построение графиков выполняли с помощью программных продуктов Microsoft Excel, КОМПАС-График V14.

Исследования направлены на выяснение оптимальных схем конструкций лесных полос, определение объемов выборки насаждений с различными древесными породами и анализ статистических данных, позволяющих обосновать эффективность существующих и перспективных подходов к использованию лесных насаждений в сельском хозяйстве. Объект исследований расположен в агролесоландшафтах Краснодарского края включая Динской и Кореновский районы. Были выбраны 10 временных пробных площадей по 5 площадок в каждом районе. Выбор пробных площадок основывался на рекомендациях ОСТ 56-69-83 «Методика закладки пробных площадей». Схема заложения временных пробных площадей в лесной полосе строилась после проведения маршрутного ее исследования и выбора площади, наиболее типичной для данного

насаждения. На такой площади производили перечень не менее 200 деревьев для дальнейшей выборки и математической обработки данных.

При исследованиях применялись стандартные методики, рекомендованные для оценки лесомелиоративных насаждений:

– определение высоты деревьев и диаметра стволов с использованием специальных приборов (высотомеров);

– анализ состояния лесного массива, включающий в себя санитарную оценку деревьев и насаждения в целом;

– исследование распределения ветровых потоков с помощью анемометра, определение зависимости скорости ветра от высоты лесной полосы в зависимости от типа ее конструкции.

Результаты и их обсуждение. На территории двух районов Краснодарского края было заложено 10 временных пробных площадей по 5 площадок в Динском и Кореновском районах. Их размещение на территории районов представлено на рисунках 1, 2, из которых следует, что изучению подвергались основные полеззащитные насаждения в агролесоландшафтах районов исследований.

Главными древесными породами изучаемых насаждений являлись робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.), гледичия трехколочковая (*Cleditsia triacanthos* L.), ясень зеленый (*Fraxinus lanceolate* Borch) и пушистый (*F. pubescens* Marsh). Возраст насаждений – от 50 до 70 лет (по году посадки).

Исследования проводились на черноземах обыкновенных. Среднегодовое количество



Рис. 1. Фрагмент исследуемых лесополос в Динском районе Краснодарского края:
№ лесной полосы 1, 2, 3, 4, 5

Fig. 1. Fragment of the studied forest belts in the Dinsky district of the Krasnodar krai:
No of forest belt 1, 2, 3, 4, 5



Рис. 2. Фрагмент исследуемых лесополос в Кореновском районе Краснодарского края:
№ лесной полосы 6, 7, 9, 10

Fig. 2. Fragment of the studied forest belts in the Korenovsky district of the Krasnodar kraï:
No of forest belt 6, 7, 9, 10

осадков в районах исследований составляет от 550 до 600 мм. Среднее число дней с сильным ветром – от 26 до 54 дней, преобладают ветры север-восточного и восточного направлений. За последние 13 лет среднегодовая температура составила +14,8 °С, что выше нормы на 4,8 °С.

По данным [7-9], изменение климатических характеристик за последние десятилетия все более отчетливо оказывает существенное влияние на агроландшафты. В результате они испытывают стресс, что в свою очередь проявляется в изменении экологии поля, ухудшении

почвенных характеристик, увеличении развития деградиционных процессов и др. [10]. На полях это приводит к недобору урожая сельскохозяйственных культур [11]. В такие периоды жизни сельскохозяйственных растений система комплексных мелиораций должна исправить ситуацию на поле. Важным звеном такой системы мелиорации выступает лесомелиорация [12]. Характеристики полевых защитных лесных полос в исследуемых районах представлены в таблице 1.

Из данных таблицы 1 следует, что большинство лесных полос имеет удовлетворительное

Таблица 1. Характеристики полевых защитных лесных полос в исследуемых районах
Table 1. Characteristics of protective forest belts in the studied areas

№ лесной полосы No of forest belt	Главная древесная порода Main woody species	Средние // Average			
		Высота, м Height, m	Диаметр, см Diameter, cm	Бонитет, бал Site, class	Экологическое состояние (категория) Ecological condition (category)
Динской район / Dinsky district					
1	Fraxinus lanceolate Borch	12,00	28,90	III	4
2	Fraxinus lanceolate Borch	8,02	19,48	III	4
3	Robinia pseudoacacia L, Cleditsia triacanthos L	11,21	20,64	IV	4
4	Robinia pseudoacacia L	9,00	19,60	IV	4
5	Robinia pseudoacacia L, Fraxinus lanceolate Borch	11,49	20,41	IV	3
Среднее Average	–	10,34	21,81	IV	4
Кореновский район / Korenovsky district					
6	Fraxinus pubescens Marsh	5,83	9,43	IV	4
7	Robinia pseudoacacia L	12,62	13,53	IV	3
8	Robinia pseudoacacia L	11,81	13,08	IV	3
9	Robinia pseudoacacia L	10,10	14,15	III	3
10	Robinia pseudoacacia L	10,35	15,93	IV	3
Среднее Average	–	10,14	13,22	IV	3

состояние. Лесные полосы с главной древесной породой из *Robinia pseudoacacia L* имеют более устойчивую 3-ю (сильно ослабленные) категорию экологического состояния насаждений. Средний класс бонитета для обоих изучаемых районов – IV, более хороший бонитет класса III отмечен для 4-й лесной полосы робинии лжеакация в Кореновском районе, а также первой и второй лесных полос из ясеня зеленого, первой и второй полос в Динском районе.

Одной из основных характеристик лесных полезащитных полос, оказывающих влияние на прилегающий агроландшафт, является высота насаждения. Распределение по высотам насаждений на изучаемых вариантах составляет от 5,83 (*Fraxinus pubescens Marsh*) до 12,62 м (*Robinia pseudoacacia L*) при их среднем значении для двух районов от 10,14 до 10,34 м.

В результате исследований полезащитных лесомелиоративных систем установлено, что все 10 лесных полос имеют отклонение в конструкции. Рекомендуемая ажурная конструкция в результате неконтролируемого роста (без должного ухода) замещена плотной конструкцией. Для лесных полос, по данным [13, 14], максимальное влияние составляет 20 высот (Н) насаждения. В некоторых лесных полосах отмечаются участки, подверженные распаду в результате их деградации или вырубки. Одной из основных характеристик погодных явлений, оказывающих влияние на температуру воздуха, атмосферную и почвенную влагу и другие показатели, является ветер. Места изучения влияния полезащитных лесных полос на распределение ветрового

потока с заветренной стороны представлены на рисунке 3.

Из данных рисунка 3 следует, что наибольшее расстояние с заветренной стороны составляет 20 Н, что, по данным исследований других авторов, соответствует влиянию полезащитной лесной полосы плотной конструкции [15]. На контрольном участке, где на распределение ветрового потока не оказывает влияние полезащитная лесная полоса, скорость ветра составила 3,1 м/с. Результаты измерения скорости ветра полезащитных лесных полос на опытных участках с заветренной и наветренной сторон представлены в таблице 2.

Из данных таблицы 2 следует, что лесные полосы, несмотря на измененную конструкцию, оказывают влияние на распределение ветрового потока. Средняя скорость ветра на расстоянии 20 Н составила 2,54 м/с, тогда как на расстоянии 1 Н она была меньше и составила 0,86 м/с. Лесные полосы № 3, 6 и 8 не оказывают влияния на распределение ветрового потока на расстоянии 20 Н, тогда как на расстоянии 10 Н влияние прослеживается. По нашему мнению, такая ситуация складывается ввиду состояния лесных насаждений, которое необходимо исправлять. Зависимость скорости ветра от скорости в открытом поле для лесных насаждений представлена на рисунке 4.

Из данных рисунка 4 следует, что на перераспределение ветрового потока большое влияние оказывает конструкция лесных полос. Для изучаемых насаждений плотной конструкции средние значения процента скорости ветра от скорости ветрового потока в открытом поле наиболее существенно проявляются на расстоянии



Рис. 3. Места изучения влияния полезащитных лесных полос на распределение ветрового потока с заветренной стороны

Fig. 3. Places where the influence of protective forest belts on the distribution of wind flow from the windward side is studied

Таблица 2. Результаты измерения скорости ветра полезащитных лесных полос на опытных участках

Table 2. The results of measuring the wind speed of protective forest belts in experimental areas

№ п/п лесной полосы No of forest belt	Скорость ветра, м/с / Wind speed, m/s					
	за лесополосой behind a forest belt	в лесополосе in a forest belt	1Н	5Н	10Н	20Н
1	1,2	0,0	1,0	1,0	1,2	2
2	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,5
3	2,1	0,0	0,0	1,7	2,2	3,2
4	1,5	0,0	0,0	1,0	1,9	2,2
5	1,7	0,0	1,0	1,0	1,5	2,5
6	1,9	1,0	1,0	1,0	2,4	3,1
7	4,0	2,1	1,5	1,0	1,7	2,7
8	4,1	3,7	2,1	1,0	2,2	3,5
9	2,1	1,0	1,0	1,0	2,0	2,1
10	2,5	1,0	1,0	1,0	1,9	2,55
Среднее Average	2,21	0,88	0,86	1,07	1,8	2,54

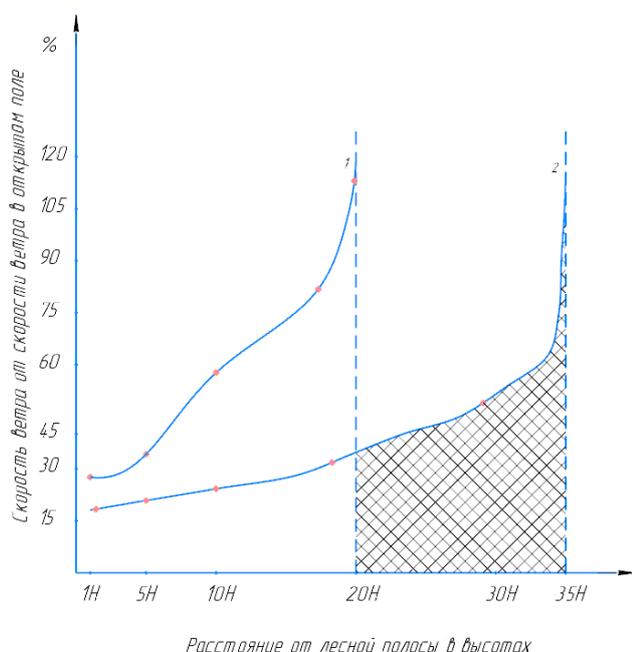


Рис. 4. Зависимость скорости ветра от скорости в открытом поле для лесных полос:

- 1 — плотной конструкции;
- 2 — ажурной конструкции

Fig. 4. The dependence of wind speed on speed in an open field for forest belts:
1 — dense structure; 2 — openwork structure

до 20 Н. При приведении полезащитных насаждений к рекомендуемой ажурной конструкции, как показано на рисунке 2, перераспределение ветрового потока будет прослеживаться с заветренной стороны лесной полосы на расстояние до 30-35 Н [16]. Указанное расстояние выделено на рисунке. Оно составит для исследуемых агроландшафтов Динского района до 361,9 м,

что увеличит защиту полосы части поля шириной от 103,4 до 155,1 м. Для Кореновского района этот показатель составит 354,9 м, а дополнительная защита полосы поля увеличится на 101,4-152,1 м.

Таким образом, приведение конструкции лесных полос к рекомендуемым [17, 18] позволит полностью защитить агроландшафты от действия вредоносных ветров, что приведет к изменению микроклимата полей, рациональному расходу влажности почвы, защите ее от дефляционных процессов и повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Для агролесоландшафтов Краснодарского края, где распаханность составляет более 80% [19], а для некоторых районов края — до 90%, это смягчит воздействие неблагоприятных факторов на большей части территории районов.

Выводы

Применение полезащитных лесомелиоративных насаждений в комплексе системы, направленной на смягчение стрессовых ситуаций на полях агроландшафтов, подтверждается как эффективное. Увеличение территории защитного эффекта на полях возможно при восстановлении лесомелиоративных сообществ, приведении конструкций к рекомендуемым.

В наших исследованиях установлено, что для агролесоландшафтов Динского района эффект защиты лесными полосами с заветренной стороны составит до 361,9 м, для Кореновского района — 354,9 м. Приведение конструкции лесных полос к рекомендуемым позволит полностью защитить агроландшафты от действия вредоносных ветров, стабилизировать температурный

градиент, что приведет к изменению микроклимата полей, рациональному расходу влажности почвы, защите ее от дефляционных процессов и повышению урожайности сельскохозяйственных культур.

Список использованных источников

1. Ткаченко Ю.Ю. Атлас опасных природных явлений Краснодарского края / Ю.Ю. Ткаченко, Е.А. Перов, В.И. Денисов. Ростов-на-Дону – Таганрог: Южный федеральный университет, 2018. 160 с. ISBN 978-5-9275-3047-2.
2. Ткаченко Ю.Ю. Оценка повторяемости опасных явлений погоды на юге России в связи с климатическими изменениями / Ю.Ю. Ткаченко, И.А. Приходько, М.А. Бандурин, В.И. Денисов // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 3(399). С. 255-259. DOI: 10.55186/25876740_2024_67_3_255.
3. Дубенок Н.Н. Потенциальная продуктивность лесов Московского региона в связи с климатическими изменениями / Н.Н. Дубенок, А.В. Лебедев, В.М. Градусов // Природоустройство. 2023. № 5. С. 118-124. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-5-118-124
4. Дубенок Н.Н. Теоретические основы обоснования комплексных мелиораций и управление мелиоративными режимами в агроландшафтах в степной и лесостепной зоне / Н.Н. Дубенок // Научно-агрономический журнал. 2023. № 4(123). С. 16-21. DOI: 10.34736/FNC.2023.123.4.002.16-21.
5. Паспорт гидрометеорологической безопасности Краснодарского края (2017) Обнинск, Росгидромет, ВНИИГМИ-МЦД, 117 с.
6. ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустroительные. Метод закладки. М.: ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1983. 60 с.
7. Хлюстов В.К. Влияние климатических показателей на продуктивность основных древостоев / В.К. Хлюстов, И.И. Васенев, А.М. Ганихин // Природоустройство. 2022. № 5. С. 121-131. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-121-131
8. Ивонин В.М. Регенеративная агролесомелиорация / В.М. Ивонин // Региональные геосистемы. 2024. Т. 48, № 1. С. 30-44. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-30-44.
9. Кулик К.Н. Изменения климата и агролесомелиорация / К.Н. Кулик, А.С. Рулев, Н.А. Ткаченко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 2(46). С. 58-67. EDN: ZRTCZV
10. Примаков Н.В. Экологическая устойчивость почвенного покрова под защитой лесных насаждений / Защитное лесоразведение, мелиорация земель, проблемы агроэкологии и земледелия в Российской Федерации: материалы Межд. научн.-практ. конференции. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2016. С. 587.
11. Примаков Н.В. Влияние лесных насаждений на продуктивность степного разнотравья / Н.В. Примаков // Земледелие. 2007. № 1. С. 10.
12. Примаков Н.В. Состояние защитных лесных насаждений Азовского побережья Краснодарского края // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2023. № 1. С. 77-87. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-77-87
13. Агролесомелиорация: Учебное пособие / О.В. Грибачева, Р.Г. Ноздрачева, А.И. Торба, А.Л. Кравец. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. 216 с.

Собственникам полезащитных лесных полос рекомендуется осуществлять пожизненный уход за лесными полосами, а при неудовлетворительном их состоянии проводить мероприятия по их восстановлению.

References

1. Tkachenko Yu.Yu. Atlas of dangerous natural phenomena of the Krasnodar Territory / Yu.Y. Tkachenko, E.A. Perov, V.I. Denisov. Rostov-on-Don – Taganrog: Southern Federal University, 2018. 160 p. ISBN 978-5-9275-3047-2.
2. Tkachenko Yu.Yu. Assessment of the recurrence of dangerous weather phenomena in southern Russia due to climate change / Yu.Yu. Tkachenko I.A. Prikhodko, M.A. Bandurin, V.I. Denisov // International Agricultural Journal. 2024. № 3(399). P. 255-259. DOI: 10.55186/25876740_2024_67_3_255.
3. Dubenok N.N. Potential productivity of forests of the Moscow region in connection with climatic changes / N.N. Dubenok, A.V. Lebedev, V.M. Degrees // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 5. P. 118-124. DOI: 10.26897/1997601120235-118-124.
4. Dubenok N.N. Theoretical foundations of the justification of complex land reclamation and management of land reclamation regimes in agro-landscapes in the steppe and forest-steppe zone / N.N. Dubenok // Scientific and Agronomic Journal. 2023. № 4(123). P. 16-21. DOI: 10.34736/FNC.2023.123.4.002.16-21.
5. Passport of hydrometeorological safety of the Krasnodar Territory (2017) Obninsk, Roshydromet, VNIIGMI-MCD, 117 p.
6. OST 56-69-83. Trial forest management areas. The bookmark method. Moscow: Central Research Institute of the State Forestry of the USSR, 1983. 60 p.
7. Khlyustov V.K. The influence of climatic indicators on the productivity of pine stands / V.K. Khlyustov, I.I. Vasenev, A.M. Ganikhin // Prirodoobustrojstvo. 2022. No. 5. P. 121-131. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-121-131
8. Ivonin V.M. Regenerative agroforestry / V.M. Ivonin // Regional geosystems. 2024. Vol. 48, No. 1. pp. 30-44. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-30-44.
9. Kulik K.N. Climate change and agroforestry / K.N. Kulik, A.S. Rulev, N.A. Tkachenko // Izvestia of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex: Science and higher professional education. 2017. № 2(46). Pp. 58-67. EDN: ZRTCZV
10. Primakov N.V. Ecological stability of soil cover under the protection of forest plantations / Protective afforestation, land reclamation, problems of agroecology and agriculture in the Russian Federation: proceedings of the International Scientific-practical conferences. Volgograd: VNIALMI, 2016, p. 587.
11. Primakov N.V. The influence of forest plantations on the productivity of steppe grasslands / N.V. Primakov // Agriculture. 2007. No. 1. S. 10.
12. Primakov N.V. The state of protective forest plantations of the Azov coast of the Krasnodar Territory // Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal. 2023. No. 1. pp. 77-87. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-77-87
13. Agroforestry: A textbook / O.V. Gribacheva, R.G. Nozdracheva, A.I. Torba, A.L. Kravets. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 2021. 216 p.
14. Rules for the design, creation and maintenance of protective forest plantations on agricultural lands. RosNIIPM

14. Правила проектирования, создания и ухода за защитными лесными насаждениями на землях сельскохозяйственного назначения. ФГБНУ «РосНИИПМ». Новочеркасск, 2015. 41 с.

15. Балакай Н.И. Влияние защитных лесных насаждений на микроклимат прилегающей территории и влажность почвы / Н.И. Балакай // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2017. № 1(65). С. 50-55. EDN: YIYAXZ

16. Примаков Н.В. Эффективность конструкции полезащитных лесных насаждений Краснодарского края / Н.В. Примаков, А.С. Латифова, Е.Ю. Дубровин // Успехи современного естествознания 2022. № 10. С. 41-45. DOI: 10.17513/use.37905.

17. Примаков Н.В. Лесохозяйственные мероприятия в полезащитных лесных полосах Краснодарского края / Н.В. Примаков, В.В. Танюкевич // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 4(400). С. 185-192. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-185-192.

18. О жизненном состоянии искусственных насаждений и необходимость лесоводственного ухода в зеленом поясе города Нур-Султан / В.К. Панкратов, А.В. Эбель, С.В. Залесов [и др.] // Природообустройство. 2022. № 1. С. 117-123. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-117-123.

19. Непоклонов В.Б. Мониторинг и рациональное использование земель сельскохозяйственного назначения Краснодарского края / В.Б. Непоклонов, И.А. Хабарова, Д.А. Хабаров // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2018. Т. 23, № 1. С. 167-178. EDN: YWRBVC

Federal State Budgetary Institution. Novocherkassk, 2015. 41 p.

15. Balakai N.I. Influence of protective forest plantations on the microclimate of the adjacent territory and soil moisture / N.I. Balakai // Ways to increase the efficiency of irrigated agriculture. 2017. № 1(65). P. 50-55. EDN: YIYAXZ

16. Primakov N.V. Efficiency of the construction of protective forest plantations in the Krasnodar Territory / N.V. Primakov, A.S. Latifova, E.Yu. Dubrovin // Successes of modern natural science. 2022 No. 10. p. 41-45. DOI: 10.17513/use.37905.

17. Primakov N.V. Forestry measures in the protective forest belts of the Krasnodar Territory / N.V. Primakov, V.V. Tanyukevich // News of higher educational institutions. Forest Magazine. 2024. № 4(400). P. 185-192. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-185-192.

18. On the vital state of artificial plantings and the need for forestry care in the green belt of the city of Nur-Sultan / V.K. Pankratov, A.V. Ebel, S.V. Zalesov [et al.] // Prirodobustroystvo. 2022. No. 1. P. 117-123. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-117-123

19. Nepoklonov V.B. Monitoring and rational use of agricultural lands in the Krasnodar Territory / V.B. Nepoklonov, I.A. Khabarova, D.A. Khabarov // Bulletin of the Siberian State University of Geosystems and Technologies. 2018. Vol. 23, No. 1. P. 167-178. EDN: YWRBVC

Об авторах

Николай Владимирович Примаков, канд. с.-х. наук, доцент кафедры: ¹геоэкологии и природопользования; ²эксплуатации и технического сервиса, доцент, SPIN-код: 1475-1077, ORCID: 0000-0001-9225-024X, ID РИНЦ: 414848, Scopus Author ID: 57201780087, WOS Research ID: D-5293-2016; nik-primakov@yandex.ru

Михаил Александрович Бандурин, д-р техн. наук, доцент, декан факультета гидромелиорации; SPIN-код: 6451-2467, ORCID: 0000-0002-0986-8848, ID РИНЦ: 518464, Scopus Author ID: 57488488700, WOS Research ID: ABD-8930-2021; chepura@mail.ru

Виктор Алексеевич Волосухин, д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов; SPIN-код: 3214-4973, ORCID: 0000-0001-9029-7802, ID РИНЦ: 290467, Scopus Author ID: 57201781001; director@ibgts.ru

Критерии авторства / Criteria authorship

Примаков Н.В., Бандурин М.А., Волосухин В.А. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no 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 at the editorial office 03.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review and revision 26.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 26.05.2025

About the authors

Nikolay V. Primakov, associate professor of the department: ¹geoecology and environmental management; ²exploitation and technical service, associate professor, CSs (Agro), SPIN-code: 1475-1077, ORCID: 0000-0001-9225-024X, RSCI ID: 414848, Scopus Author ID: 57201780087, WOS Research ID: D-5293-2016; nik-primakov@yandex.ru

Mikhail A. Bandurin, dean of the faculty of hydroreclamation, associate professor, DSs (Eng), SPIN-code: 6451-2467, ORCID: 0000-0002-0986-8848, RSCI ID: 518464, Scopus Author ID: 57201780087, WOS Research ID: D-5293-2016; chepura@mail.ru

Viktor A. Volosukhin, professor of the department of construction and operation of water management facilities, professor, DSs (Eng), SPIN-code: 3214-4973, ORCID: 0000-0001-9029-7802, RSCI ID: 290467, Scopus Author ID: 57201781001; director@ibgts.ru

Primakov N.V., Bandurin M.A., Volosukhin V.A. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have a copyright on the article and they are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-101-107>

УДК 630*266:631.6: 631.312.6



СОГЛАСОВАННОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ СОДЕРЖАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЛЕСОПОЛОС И МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ

Н.С. Севрюгина^{1✉}, А.Ю. Фомин¹, М.Н. Ахилбеков²

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 14/7, Россия

² НАО «Южно-Казахстанский университет имени М. Ауезова»; 160012, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5, Республика Казахстан

Аннотация. В статье дано обоснование создания системы сохранения природной идентичности путем согласования мероприятий аграрного и лесного секторов как взаимодополняющих и взаимозависимых структур. Установлено, что на государственном уровне реализация требований по сохранению лесных массивов обеспечивается путем создания территориальных гослесополос. Выявлено, что нарушение гидрологического режима является одним из основных факторов, снижающих жизнеустойчивость лесов и заградительных полос. Представлен аналитический обзор мероприятий, реализуемых на федеральном уровне, по сохранению агро- и лесоландшафта. Предложена концепция ведения хозяйственной деятельности в щадящем для окружающей среды режиме путем преобразования агроландшафта в агролесоландшафт. Отмечена общность применяемых средств механизации при уходных мероприятиях в лесных массивах и для решения задач мелиоративным комплексом в рамках ведения сельскохозяйственной работы. Предложено использование типового комплекса малогабаритных средств механизации при дополнении их адаптивной системой управления, функционально согласованной для поддержания эффективного содержания агролесоландшафта. Намечены этапы проведения дальнейшей работы по созданию территориального цифрового кластера устойчивого развития окружающей среды, включающего в себя разработку технического блока обеспечения территорий секторов АПК и лесных массивов, средствами механизации Z-беспикового (зерро-нулевого) воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: лесополосы, мелиоративные каналы, защита, экосистема, технологии, средства малой механизации

Формат цитирования: Севрюгина Н.С., Фомин А.Ю., Ахилбеков М.Н. Согласованность технологий содержания защитных лесополос и мелиоративных каналов // Природообустройство. 2025. № 3. С. 101-107. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-101-107>

Original article

COORDINATION OF TECHNOLOGIES FOR THE MAINTENANCE OF PROTECTIVE FOREST BELTS AND RECLAMATION CANALS

N.S. Sevryugina¹, A.Y. Fomin¹, M.N. Akhilbekov²

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; Goryachkin Institute of Mechanics and Energy, 127434, Moscow, Pryanishnikova str., 14/7, Russia

² NAO “M. Auezov South Kazakhstan University”, 5 Tauke Khan Ave., Shymkent, 160012. Republic of Kazakhstan

Abstract. The rationale for the creation of a system for preserving natural identity by coordinating the activities of the agricultural and forestry sectors, as complementary and interdependent structures, is given. It has been established that at the state level, the implementation of the requirements for the conservation of forest areas is ensured by creating territorial state forest belts. It is revealed that the violation of the hydrological regime is one of the main factors that reduce the viability of forests and barrier belts. An analytical review of measures implemented at the federal level to preserve the agro- and forest-landscape is presented. The concept of conducting economic activities in an environmentally friendly mode by transforming the agrolandscape into the agroforest landscape is proposed. The commonality of the means of mechanization used in care measures in forests and for the tasks solved by the reclamation complex in the framework of agricultural work is noted. It is proposed to create a complex of small-sized means of mechanization, equipped with adaptive system control, functionally coordinated to maintain the effective maintenance of the agroforest landscape. The stages of further work on the creation of a territorial digital cluster of sustainable environmental development are outlined,

including the development of a technical block to provide the territories of the agro-industrial complex sectors and forests with means of mechanization of Z-shockless (zero) impact on the environment.

Keywords: forest belts, reclamation canals, protection, ecosystem, technologies, means of small-scale mechanization

Format of citation: Sevryugina N.S., Fomin A.Y., Akhilbekov M.N. Coordination of technologies for the maintenance of protective forest belts and reclamation canals // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 101-107. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-101-107>

Введение. Программы интенсификации развития агропромышленного комплекса в рамках задач устойчивого развития предполагают согласованность в части достижения результатов триады «Человек – природа – технологии». Здесь ключевым понятием является человек, который в стремлении к повышению благосостояния становится источником нарушения идентичности природной среды. Наибольшее воздействие на окружающую среду человек оказывает в местах выполнения сельскохозяйственных работ. Как правило, данные территории примыкают к лесным массивам, которые могут загрязняться и вырубаться, что не способствует их расширению [1, 2].

Следует обратить внимание на то, что природе свойственны самоочищение и самоорганизация, хотя для достижения уровня природной идентичности ей все же потребуется достаточно большой промежуток времени. Человечеству же для масштабной реализации любых технологий требуется использование технических средств механизации [3].

Конструктивное исполнение средств механизации функционально соответствует видам выполняемых работ, и имеется широкий класс сельхозмашин и машин для лесного хозяйства. Такое различие при удаленном расположении площадок функционирования не позволяет использовать их эффективно. В свою очередь, интенсивность развития систем автономного управления делает актуальной проблему модернизации технических средств, функционально приспособленных к выполнению задач по сохранению как близлежащих с сельскохозяйственными угодьями лесных массивов, так и удаленных от них [4].

Цель исследований: оценка согласованности технологий содержания защитных лесополос и мелиоративных каналов в концепции преобразования агроландшафта в агролесоландшафт для ведения хозяйственной деятельности в щадящем для окружающей среды режиме путем применения малогабаритных комплексов средств механизации, оборудованных адаптивной системной управления.

Материалы и методы исследований. Пространственная составляющая территорий

включает в себя функциональные зоны, согласованное существование которых гарантирует получение максимального результата в проекте «Устойчивое развитие». Это, в частности, территории, используемые в АПК, урбанизированные территории и пространства окружающей среды с условной идентичностью природной самоорганизации (условность выражается уровнем воздействия человека и плотностью окружающей техносферы) [5].

Пространства, выделенные под сельскохозяйственные виды возделывания, имеют четкий граничный рельеф, обеспечивающий реализацию задач на максимальном уровне. Человек заинтересован в сохранении полезных характеристик земли для своего же блага, что обеспечивается постоянным усовершенствованием технологий ведения сельскохозяйственных работ, созданием техники с уменьшенным отрицательным воздействием на окружающую среду [6].

Урбанизированные территории, хотя и подчинены социальным запросам человека, для создания комфортной и здоровой окружающей среды все больше и больше включают в себя зеленые зоны и объекты малой водной архитектуры [7].

Природное пространство остается как незащищенные территории, воздействие человека на которые зачастую становится катастрофичным (например, изменение состояния лесных массивов, биоразнообразия).

Исследования решают задачи, поставленные в Федеральном проекте «Сохранение лесов» (рис. 1), который реализуется в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства», утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 318 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации „Развитие лесного хозяйства“», и национального проекта «Экология» [8].

Для сохранения лесного массива создаются гослесополосы (приказ Минприроды России от 30 июля 2020 г. № 534 «Об утверждении Правил ухода за лесами»), размещение которых кардинально различается. Так, в европейской части России гослесополосы размещаются по водораздельным пространствам и по берегам крупных

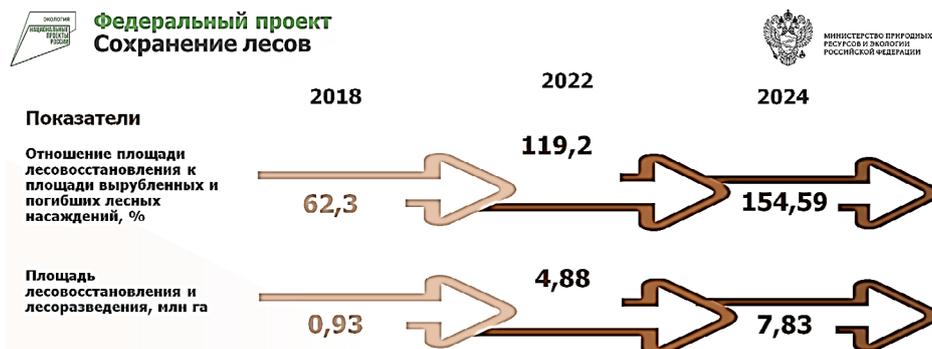


Рис. 1. Динамика реализации заявленных показателей выполнения Федерального проекта «Сохранение лесов»

Fig. 1. Dynamics of the implementation of the declared indicators of the fulfillment of the Federal project “Forest Conservation”

рек, а в азиатской части России – вдоль автодорог. Гослесополосы выполняют рекреационную роль и оказывают существенное почвоулучшающее влияние, но допущенные ошибки при их расположении и нарушения в уходных мероприятиях привели к существенному снижению их жизнестойкости – как правило, к усыханию насаждений, что в настоящее время становится причиной возникновения широкомасштабных пожаров [7].

Результаты и их обсуждение. Нормативные требования содержания лесного фонда введены в Лесной кодекс Российской Федерации от 4 декабря 2006 г. № 200-ФЗ, ред. от 26 декабря 2024 г., с изм. и доп., вступ. в силу с 1 января 2025 г. (ЛК РФ).

Имеющиеся ресурсы картографирования позволили сформировать инфограммы лесных массивов России, выделяя зоны ответственности лесхозов и других хозяйствующих субъектов, с возможностью оценки динамики изменения состояния.

Лесопатологическое обследование насаждений проводится на регулярной основе и актируется. Следует отметить, что около 60% обследований проводятся в основном с использованием технологий визуального наземного контроля, в то время как инструментальный – дистанционный контроль – позволяет повысить результат, оцифровав данные, и составить паспорт динамики изменения состояния лесного массива.

В качестве примера представлена карта с выделением лесов высокой природоохранной ценности для Белгородской области и зон потери лесопокрытой площади в границах Воронежской области (рис. 2).

В данные обследуемых лесных участков включается следующая информация (рис. 3):

- характеристика лесного массива;
- вид деления – участковое лесничество, урочища (дача);

- географическое положение (координаты);
- площадь, га;
- таксационная характеристика.

В части установления уровня загрязнения лесного участка отходами и выбросами по видам (промышленными, бытовыми) требуется оценка не только площади загрязнения (га), но и объемов (куб. м). Оценка степени токсичности выявленных материалов не проводится, хотя такие данные можно получить путем цифрового анализа видов отходов и забора проб почвенного слоя. В заключение рассчитывается уровень соответствия базовому таксационному описанию пространства.

После составления акта принимается решение по оздоровлению насаждений. Типовые коды мероприятий представлены в «Справочнике» и выбираются в зависимости от полученных результатов обследования (например, назначается код 130 – профилактические биотехнические мероприятия).

Поставленная в работе задача преобразования агроландшафта в агролесоландшафт решается с учетом оценки применения в реализуемых мероприятиях средств механизации, для чего проведена выборка из «Справочника кодов мероприятий по защите леса» (табл.).

Аналитические исследования показывают общность применяемых средств механизации при уходных мероприятиях в лесных массивах и для решения задач мелиоративным комплексом в рамках ведения сельскохозяйственной работы. На основании этого обоснованным является создание комплекса малогабаритных средств механизации, оборудованных адаптивной системной управления, функционально согласованных для поддержания эффективности агролесоландшафта.

Среди разнообразия задач содержания агролесоландшафта задача поддержания гидрологического режима является ключевой как для ландшафтов сельскохозяйственных угодий ввиду

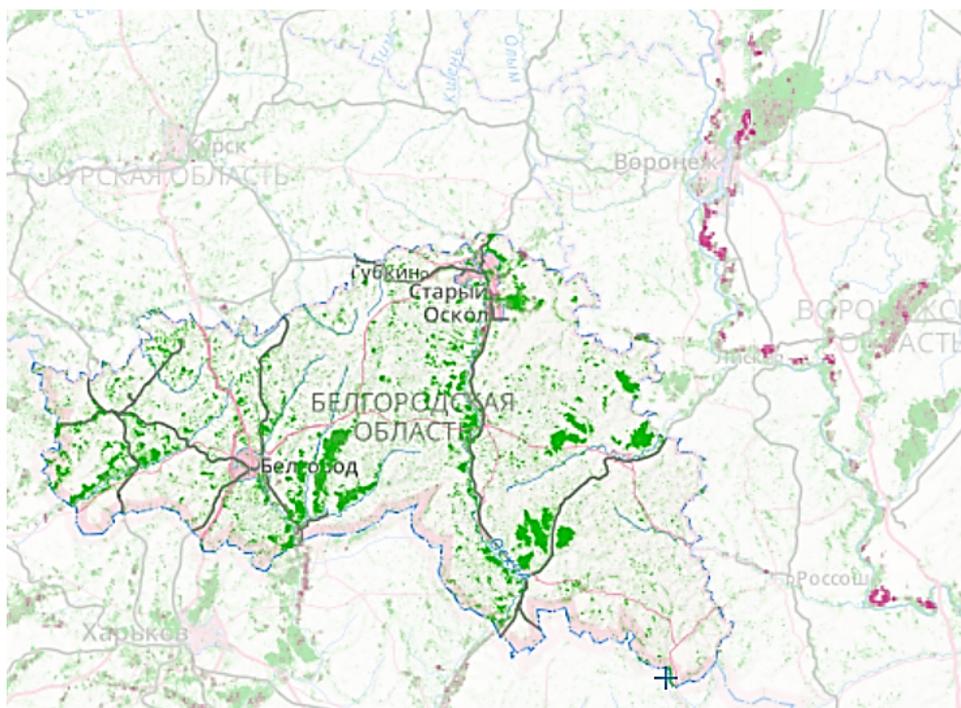


Рис. 2. Леса высокой природоохранной ценности (ЛВПЦ) России – ЛВПЦ Белгородской области: **зеленые зоны** – лесные массивы; **красные зоны** – потери лесопокрытой площади (URL: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-belgorod>)

Fig. 2. Forests of high conservation value (HCVF) of Russia – HCVF of the Belgorod region: **green zones** – forests; **red zones** – loss of forested area (Electronic resource – open access: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-belgorod>)

Приложение 1.1
к акту лесопатологического обследования

Результаты проведения лесопатологического обследования
лесных насаждений за 16.06.2017 г.
июнь(месяц)

Субъект Российской Федерации Белгородская область Лесничество (лесопарк) Яковлевское
Участковое лесничество Без деления Урочище (лесная дача) _____

Номер квартала	Номер выдела	Площадь выдела, га	Целевое назначение лесов	Категория защитных лесов	Номер лесопатологического выдела	Площадь лесопатологического выдела, га	Таксационная характеристика лесного насаждения										Число деревьев на рубке, шт.	Распределение деревьев по категориям состояния, % от												Признаки повреждения деревьев	Доля поврежденных деревьев, %	Признаки ослабления, повреждения	Подложки рубке, %	Назначенные мероприятия			
							состав	порода	возраст	средняя высота, м	средний диаметр, см	тип леса	полнота	богатст	запас, куб. м/га	Без причины ослабления		ослабленные	сильно ослабленные	усыхающие	свежий сухойстой	старый сухойстой	свежий ветровал	старый ветровал	свежий бурелом	старый бурелом	аварийные деревья	вид	площадь, га								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34				
Без деления на участковые																																					
53	33	5,9	Защитные	Противопожарные леса	-	-	5ДННП	ДННП									70	20	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
							КЛП										55	20	10	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
							ЯОН		90	23	32	ДЮСЛ	0,7	3	250		75	15	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
							ОС										70	20	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 3. Пример приложения к акту лесопатологического обследования (URL: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-belgorod>)

Fig. 3. An example of a forest pathology survey report (Electronic resource – open access: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-belgorod>)

опасности потери урожая, так и для лесных массивов в случае критических ситуаций, приводящих к пожарам [9].

Технические решения стабилизации гидрологического режима лесного массива

с использованием ресурса мелиоративного комплекса и средств малой механизации. Преобразование агроландшафта в агролесоландшафт происходит путем проведения уходных работ на мелиоративных системах с координированием

нарушенных участков и контролем за гидрологическим режимом, направленным на сохранение зеленого каркаса (рис. 4) [10].

Лесной кодекс РФ предусматривает перечень мер противопожарного обустройства, среди которых – требования по созданию в целях тушения лесных пожаров условий для забора в любое

время года воды из источников наружного водоснабжения и проведение гидромелиорации земель, что согласуется с мероприятиями обеспечения сельскохозяйственных угодий водой в развитии сети мелиоративных каналов.

В долгосрочной перспективе создание гидромелиоративных защитных полос требует

Таблица 1. Выборка из справочника кодов мероприятий по защите леса

Table 1. Selection from the directory of codes of forest protection measures

Код Code	Группа Group	Наименование мероприятия / Name of measures
100	ПРОФ / PROF	Профилактические мероприятия / Preventive measures
113	ЛХ / LH	Ограничение рекреационной нагрузки / Limitation of recreation load
114	ЛХ LH	Постановка механической защиты (в т.ч. огораживание лесных культур) Installation of mechanical protection (including fencing of forest crops)
130	ПРОФ / PROF	Профилактические биотехнические мероприятия / Preventive bio technical measures
150	ПРОФ / PROF	Профилактические лесохозяйственные мероприятия / Preventive forest economic measures
300	ГЛПМ GLPM	Регулярные наземные наблюдения за санитарным и лесопатологическим состоянием лесов Regular ground-based observations over sanitary and forest pathological state of forests
310	ГЛПМ GLPM	Дистанционные наблюдения за санитарным и лесопатологическим состоянием лесов Distance observations over sanitary and forest pathological state of forests
350	ЛПО / LPO	Лесопатологическое обследование лесов / Forest pathological survey of forests
370	ЛПО LPO	Проведение ЛПО инструментальным способом Fulfilment of FPO by the instrumentation method
510		Рубка погибших и поврежденных лесных насаждений Cutting of dead and damaged forest plantations
533	ЛХ / LH	Очистка леса от захламления и загрязнения / Forest clearing of clutter and pollution
534	СОМ / COM	Уборка неликвидной древесины / Harvesting of illiquid wood
540	РАД / RAD	Рубка аварийных деревьев / Cutting of dangerous trees



Рис. 4. Агролесомелиорация и противопожарные разрывы в лесу

Fig. 4. Agroforestry reclamation and fire breaks in the forest

постоянного контроля за их состоянием и проведения профилактических уходовых мероприятий, что осуществляется применением минитехники в сочетании с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) [11]. БПЛА дистанционно обследуют пространства, выявляя участки застарения и передавая информацию в блок автономного управления. Модуль принятия решений после обработки информации выдает сигнал для средств механизации по выбору рабочего оборудования и координатам выезда на участок для устранения выявленного нарушения [12].

Координацию работы автономного комплекса оператор выполняет удаленно, находясь в центре сбора данных по зонам территориального разграничения.

Следующая задача исследований в концепции преобразования агроландшафта в агролесоландшафт направлена на создание территориального цифрового кластера устойчивого развития окружающей среды, включающего в себя:

- цифровой блок предиктивной аналитики устойчивости развития агролесоландшафта, сопоставимой с природной идентичностью;

Список использованных источников

1. Голубев И.Г. Состояние и перспективы вовлечения залежных земель в оборот / И.Г. Голубев, А.С. Апатенко, Н.С. Севрюгина // Мелиорация. 2021. № 3(97). С. 67-74.
2. Голубев И.Г. Передовые практики введения залежных земель в оборот / И.Г. Голубев, Н.П. Мишуров, В.В. Голубев [и др.] – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2021. 80 с. ISBN 978-5-7367-1638-8.
3. Хоружий Л.И. Применение концепции бережливого производства в учетно-аналитической системе организаций АПК / Л.И. Хоружий, Ю.Н. Катков, А.А. Романова, А.Ю. Фомин // Бухучет в сельском хозяйстве. 2023. № 5. С. 262-271. DOI: 10.33920/sel-11-2305-01. EDN: FBCOEF
4. Апатенко А.С. Научно-аналитический обзор технологий ресурсосбережения при эксплуатации технических средств в АПК / А.С. Апатенко, И.Н. Кравченко, Н.С. Севрюгина [и др.]. Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амирит», 2023. 152 с. ISBN 978-5-00207-449-5. EDN: DZPMNS
5. Чубенко Т.В. Анализ показателей, характеризующих влияние хозяйственной деятельности человека на природные водные ресурсы // Т.В. Чубенко, С.Е. Германова, Н.Б. Самброс [и др.] Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 3-2. С. 27-32. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.03-2.19.
6. Севрюгина Н.С. Мелиоративные системы и цифровая идентичность как механизм управления ресурсом / Н.С. Севрюгина, А.С. Апатенко, П.Д. Капырин // Природообустройство. 2021. № 3. С. 6-13. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-6-13.

- модуль технологических инноваций гармоничного социального развития урбанизированных территорий и агролесоландшафта;
- технический блок обеспечения всех секторов АПК территории и лесных массивов средствами механизации Z-бесшпокового (нулевого) воздействия на окружающую среду.

Выводы

Представлен аналитический обзор мероприятий, реализуемых на федеральном уровне по сохранению агро- и лесоландшафта.

Предложена концепция ведения хозяйственной деятельности в щадящем для окружающей среды режиме путем преобразования агроландшафта в агролесоландшафт.

Предложено создание комплекса малогабаритных средств механизации, оборудованных адаптивной системной управления, функционально согласованных для поддержания эффективного содержания агролесоландшафта.

Намечены этапы проведения дальнейшей работы по созданию территориального цифрового кластера устойчивого развития окружающей среды.

References

1. Golubev I.G. The state and prospects of involving fallow lands in circulation / I.G. Golubev, A.S. Apatenko, N.S. Sevryugina // Melioration. 2021. № 3(97). P. 67-74.
2. Golubev I.G. Advanced practices of introducing fallow lands into circulation / I.G., Golubev N.P. Mishurov, V.V. Golubev. [et al –Moscow: Russian Scientific Research Institute of Information and Technical and Economic Research on engineering and technical support of the agro-industrial complex, 2021. 80 p. ISBN 978-5-7367-1638-8.
3. Khoruzhiy L.I. Application of the concept of lean production in the accounting and analytical system of agricultural organizations / L.I. Khoruzhiy, Y.N. Katkov, A.A. Romanova, A. Y Fomin //Accounting in agriculture. 2023. № 5. P. 262-271. DOI: 10.33920/sel-11-2305-01. EDN: FBCOEF
4. Apatenko A.S. Scientific and Analytical Review of Resource-Saving Technologies in the Operation of Technical Facilities in the Agro-Industrial Complex / A.S. Apatenko, I.N. Kravchenko, N.S. Sevryugina [et al.]. Saratov: Limited Liability Company "Amirit", 2023. 152 p. ISBN 978-5-00207-449-5. EDN: DZPMNS
5. Chubenko T.V. Analysis of indicators characterizing the influence of human economic activity on natural water resources / T.V. Chubenko, S.E. Germanova, N.B. Sambros. [et al.] //Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences. 2022. № 3-2. P. 27-32. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.03-2.19.
6. Sevryugina N.S. Meliorative systems and digital identity as a resource management mechanism / N.S. Sevryugina, A.S. Apatenko, P.D. Kapyrin // Prirodoobustroistvo. 2021. No. 3. P. 6-13. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-6-13.
7. Sevryugina N.S., Fomin A.Yu., Losev A.A., Voitovich E.V. Aspects of conservation of small water bodies in an urbanized environment // Prirodoobustroistvo. 2022. No. 3. P. 83-90. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-83-90.

7. Севрюгина Н.С. Аспекты сохранения малых водных объектов в урбанизированной среде / Н.С. Севрюгина, А.Ю. Фомин, А.А. Лосев, Е.В. Войтович // Природообустройство. 2022. № 3. С. 83-90. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-83-90.

8. Есимов Е.К. Ускоренный способ определения величины просадки лессовой толщи от собственного веса / Е.К. Есимов, М.Н. Ахилбеков, А.Х. Онгарова, А.Н. Байжанова // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции, Омск, 23-24 апреля 2020 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2020. С. 535-538. EDN: NMWXQG

9. Севрюгина Н.С. Технологии и технические средства рекультивации залежных земель с регулированием уровня увлажненности почвы / Н.С. Севрюгина, А.С. Апатенко, И.Г. Голубев [и др.] // Природообустройство. 2023. № 3. С. 38-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-38-44. EDN: HZXHKE

10. Севрюгина Н.С. Риски экосистемы при функционировании водохозяйственных комплексов / Н.С. Севрюгина, А.С. Апатенко, Е.В. Войтович // Природообустройство. 2020. № 2. С. 115-122. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-2-115-122. EDN: BJVTGX

11. Патент № 2820689 C1 Российская Федерация, МПК E02B15/00, E02B3/02, B60F 3/00. Устройство для очистки водных и прибрежных объектов от загрязнений: № 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».

12. Manabayev N.T., Tukhtakuziyev A., Akhilbekov M.N. [et al.] Perfection of universal multifunctional mounted tool // Industrial technologies and engineering (cite-2018): V International scientific practical Conference, Шымкент, 28 ноября 2018 года / Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова. Vol. 6. – Шымкент: Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения «Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова», 2018. P. 296-300. EDN: ANLZYH

Об авторах

Надежда Савельевна Севрюгина, д-р техн. наук, доцент; AuthorID: 144506; <https://orcid.org/0000-0002-3494-1437>; sevruginans@rgau-msha.ru

Александр Юрьевич Фомин, канд. техн. наук, AuthorID: 804021; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>; a.fomin@rgau-msha.ru

Мухат Наршович Ахилбеков, канд. техн. наук, доцент; AuthorID: 264491; <https://orcid.org/0009-0005-1692-8756>; Akhilbekov@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Севрюгина Н.С., Фомин А.Ю., Ахилбеков М.Н. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 06.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after review and revision 01.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 01.04.2025

8. Esimov E.K. Accelerated method for determining the value of subsidence of loess strata from its own weight / E.K. Esimo, M.N. Akhilbekov, A.Kh. Ongarova A.N. Baizhanova // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Collection of Materials of the III National Scientific and Practical Conference, Omsk, April 23-24, 2020. – Omsk: Siberian State Automobile and Road University (SibADD), 2020. P. 535-538. EDN: NMWXQG

9. Sevryugina N.S. Technologies and Technical Means of Reclamation of Fallow Lands with Regulation of the Soil Moisture Level / N.S. Sevryugina, A.S. Apatenko, I.G. Golubev [et al.] // Prirodoobustroistvo. 2023. № 3. P. 38-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-38-44. EDN: HZXHKE

10. Sevryugina N.S. Ecosystem risks in the functioning of water management complexes / N.S. Sevryugina, A.S. Apatenko, E.V. Voitovich // Prirodoobustroistvo. 2020. No. 2. P. 115-122. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-2-115-122. EDN: BJVTGX

11. 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; application. 03/27/2023; publ. 06/07/2024 / A.Y. Fomin, N.S. Sevryugina, A.S. Apatenko [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian State Agrarian University – Ministry of Agriculture named after C.A. Timiryazev”.

12. Manabayev N.T. Perfection of universal multifunctional mounted tool / N.T. Manabayev, A. Tukhtakuziyev, M.N. Akhilbekov [et al.] // Industrial technologies and engineering (cite-2018): V International scientific practical Conference, Шымкент, 28 ноября 2018 года / South-Kazakhstan state university named after M. Auezov, Vol. 6. – Shymkent: Republican State Enterprise on the Right of Economic Management “South Kazakhstan State University named after M. Auezov”, 2018. S. 296-300. EDN: ANLZYH

About the authors

Nadezhda S. Sevryugina, DSc (Eng), associate professor; AuthorID: 144506; <https://orcid.org/0000-0002-3494-1437>; sevruginans@rgau-msha.ru

Alexander Yu. Fomin, CSc (Eng), AuthorID: 804021; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>; a.fomin@rgau-msha.ru

Mukhat N. Akhilbekov, CSc (Eng), associate professor; AuthorID: 264491; <https://orcid.org/0009-0005-1692-8756>; Akhilbekov@mail.ru

Sevryugina N.S., Fomin A.Y., Akhilbekov M.N. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-108-116>

УДК 630*43: 004.94



ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С УЧЕТОМ ВЕТРОВОЙ ДИНАМИКИ

С.И. Некрасов , А.Ю. Фомин, А.С. Апатенко

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева;

Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 14/7, Россия

Аннотация. В статье представлена разработка имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики, реализованная в среде AnyLogic. Модель основана на синтезе клеточно-автоматного и агентного подходов, что позволяет учитывать пространственную неоднородность лесного покрова, топографические особенности местности и динамические изменения метеорологических условий. Математический аппарат модели включает в себя модифицированные уравнения Ротермела, дополненные параметризацией ветрового воздействия через векторное поле, учитывающее среднюю скорость и турбулентную составляющую, при которых наблюдаются качественные изменения динамики пожара. Полученные результаты подчеркивают важность учета ветровой динамики и нелинейных эффектов при моделировании лесных пожаров. Разработанная модель может быть использована для решения задач оперативного прогнозирования развития пожароопасных ситуаций, оптимизации ресурсов пожаротушения и оценки эффективности противопожарных мероприятий. Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией данных дистанционного зондирования в реальном времени и разработкой адаптивных алгоритмов управления для экстремальных условий.

Ключевые слова: лесные массивы, сохранность, интенсивность, ветровая динамика, моделирование, ущерб, имитационное моделирование, лесные пожары, ветровая динамика, агентное моделирование, Anylogic

Формат цитирования: Некрасов С.И., Фомин А.Ю., Апатенко А.С. Имитационная модель распространения и возникновения лесных пожаров с учетом ветровой динамики // Природообустройство. 2025. № 3. С. 108-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-108-116>

Original article

SIMULATION MODEL OF THE SPREAD AND OCCURRENCE OF FOREST FIRES TAKING INTO ACCOUNT WIND DYNAMICS

S.I. Nekrasov , A.Y. Fomin, A.S. Apatenko

Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering; 14/7 Pryanishnikova St., Moscow, 127434, Russia

Abstract. The article presents the development of a simulation model for the spread of forest fires, considering wind dynamics, which was implemented in the AnyLogic environment. The model is based on a synthesis of cellular automata and agent-based approaches, allowing for the consideration of spatial heterogeneity in forest cover, topographical features of the area, and dynamic changes in meteorological conditions. The mathematical apparatus of the model consists of modified Rotermel equations, supplemented by the parameterization of wind action through a vector field that considers average velocity and turbulent components. Qualitative changes in the fire dynamics are observed in this model. The results obtained emphasize the significance of considering wind dynamics and non-linear effects when simulating forest fires. The developed model can be used to address the challenges of operational forecasting of fire-hazardous situations, optimizing fire extinguishing resources, and assessing the effectiveness of firefighting measures. Future research opportunities lie in integrating real-time remote sensing data and developing adaptive control algorithms for extreme conditions.

Keywords: woodlands, conservation, fire, intensity, wind dynamics, modeling, damage, simulation modeling, forest fires, wind dynamics, agent-based modeling, Anylogic

Format of citation: Nekrasov S.I., Fomin A.Yu., Apatenko A.S. Simulation model of the spread and occurrence of forest fires, taking into account wind dynamics // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 108-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-108-116>

Введение. Лесные пожары представляют собой одну из наиболее значимых экологических и социально-экономических проблем современности. Ежегодно они уничтожают миллионы гектаров леса, наносят ущерб экосистемам, угрожают жизни людей и приводят к значительным экономическим потерям. В условиях изменения климата частота и интенсивность пожаров возрастают, что требует разработки более эффективных методов их прогнозирования и предотвращения.

Ветер является ключевым фактором, определяющим скорость и направление распространения лесных пожаров. Он способен резко изменять поведение огня, усложняя процесс тушения и увеличивая риски для населенных пунктов. Динамика интенсивности распространения пожара может быть спрогнозирована путем построения модели. Проведенный анализ существующих методик построения модели распространения пожара показал, что не всегда учитывается сложная ветровая динамика, а это снижает их точность [1-9].

Современные практические методики оценки пожарной опасности, разработанные ведущими специалистами (В.Г. Нестеров, Л.Ф. Ноженкова, D.X. Viegas, E.L. Garsia Diez, C.E. van Wagner, M.E. Alexander, I.E. Deeming, B.J. Stocks и др.), основаны на анализе обширных статистических массивов данных о природных пожарах. Они включают в себя формализованные алгоритмы, эмпирические формулы и критериальные показатели, выведенные путем статистического усреднения параметров возгораний. Особенностью данных подходов является их пространственно-временная обобщенность, предполагающая агрегацию характеристик пожароопасных условий на значительных территориях и продолжительных временных интервалах [10-15].

Анализ существующих методик выявил существенный пробел в области научно-практического исследования физико-химических процессов, происходящих в слое лесных горючих материалов при воздействии локальных источников энергии. В частности, недостаточно изучены фундаментальные аспекты тепло- и массопереноса, играющие определяющую роль в механизмах возникновения и развития пожаров.

В результате анализа современных теоретических подходов к моделированию распространения лесных пожаров (А.Н. Субботин, А.М. Гришин, В.А. Перминов, Л.Ю. Катаева, Г.А. Доррер, В.Г. Зверев, О.В. Шипулина и др.) выявлены существенные ограничения в прогнозировании пожарной опасности. Результаты моделирования в рамках указанных теоретических подходов

позволяют получить ряд ключевых параметров пожарной динамики (пространственно-временное распределение температурных полей в зоне горения, кинематические характеристики движения пиролизных газов и продуктов сгорания, термодинамические параметры газовой среды (векторные поля давления и плотности), скоростные характеристики распространения фронта горения). Данные выходные параметры модели представляют собой количественное описание отдельных аспектов пожарной динамики. Однако следует отметить, что получаемые характеристики носят преимущественно локальный характер и не всегда отражают интегральную картину развития пожара в сложных природных условиях. Особую сложность представляет моделирование взаимного влияния указанных параметров, что существенно ограничивает прогностическую ценность существующих подходов [16-23]. В связи с этим представляется перспективной разработка нового подхода к прогнозированию лесной пожарной опасности, основанного в отличие от известных (опирающихся на статистическую информацию) на имитационном моделировании.

Традиционные методы мониторинга и прогнозирования пожаров являются зачастую недостаточно оперативными и точными. Использование компьютерного моделирования позволяет анализировать различные сценарии развития пожаров с учетом множества факторов включая рельеф, тип растительности и метеорологические условия. Разработка имитационной модели, учитывающей ветровую динамику, может значительно повысить достоверность прогнозов и помочь в планировании противопожарных мероприятий.

Цель исследований: разработка имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики для повышения точности прогнозирования и оптимизации противопожарных мероприятий.

Материалы и методы исследований. В исследованиях применялся комплекс методов математического и компьютерного моделирования для разработки имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики. В качестве исходных данных использовались геопространственные материалы (цифровые модели рельефа, карты лесного покрова), метеорологические показатели (скорость и направление ветра, температура, влажность), а также архивные данные о реальных пожарах для верификации модели.

Уравнение Ротермела представляет собой фундаментальную эмпирическую модель для

прогнозирования скорости распространения фронта лесного пожара (R), учитывающую комплекс физических и термодинамических параметров. Основное уравнение включает в себя: (1) интенсивность реакции горения (I_r), зависящую от нагрузки горючего материала, его влажности и морфологических характеристик; (2) коэффициент распространения (ξ), определяемый удельной

поверхностью и компактностью топлива; (3) ветровой фактор (ϕ_w), описывающий влияние скорости и направления ветра через степенные зависимости; (4) топографический фактор (ϕ_s), учитывающий угол наклона местности.

Основу математического аппарата составили модифицированные уравнения Ротермела, представленные в формуле 1, интегрирующие



Рис. 1. Карта лесных пожаров, составленная Гидрометцентром России в 2025 г. (Электронный ресурс – свободный доступ: <https://newizv.ru/news/2025-03-19/sezon-lesnyh-pozharov-ob-yavlyaetsya-otkrytym-gde-i-pochemu-rossiya-budet-polyhat-436279>)

Fig. 1. The map of forest fires compiled by the Hydrometeorological Center of Russia in 2025 (Electronic resource – free access: <https://newizv.ru/news/2025-03-19/sezon-lesnyh-pozharov-ob-yavlyaetsya-otkrytym-gde-i-pochemu-rossiya-budet-polyhat-436279>)

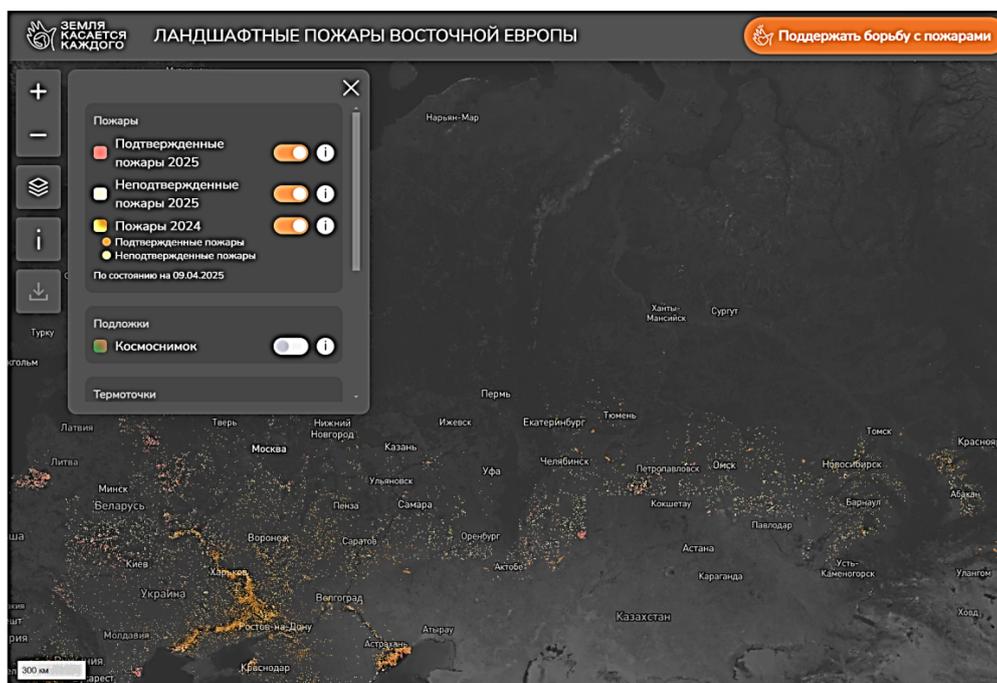


Рис. 2. Фрагмент карты лесных пожаров в режиме реального времени (Электронный ресурс – свободный доступ: https://maps.earthtouches.me/maps/fires_ml/#3.44/59.6/64.65)

Fig. 2. A fragment of the map of forest fires in the regime of real time (Electronic resource – free access: https://maps.earthtouches.me/maps/fires_ml/#3.44/59.6/64.65)

факторы ветрового воздействия, топографических особенностей и характеристик горючих материалов:

$$R = \frac{I_r \cdot \xi \cdot (1 + \phi w + \phi s)}{\rho b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}, \quad (1)$$

где I_r – интенсивность реакции горения; ξ – коэффициент распространения; ϕw – ветровой фактор; ϕs – топографический фактор; ρb – насыщенная плотность слоя; ε – эффективность нагрева; Q_{ig} – энергия воспламенения.

Модель параметризована для 13 стандартных типов лесных горючих материалов с учетом их теплофизических свойств: теплоты сгорания, зольности, минерального состава и влагосодержания. Современные модификации базового уравнения дополняют его динамическими параметрами влажности, нестационарными ветровыми эффектами и пространственной неоднородностью топлива. Несмотря на ограничения (применимость только для поверхностных пожаров, диапазон влажности – 5-30%, скорость ветра – до 20 м/с), модель Ротермела остается ядром большинства оперативных систем прогнозирования благодаря своей физической обоснованности и относительной вычислительной простоте. Критически важным аспектом является корректная параметризация входных данных, особенно характеристик горючих материалов и метеорологических условий, что определяет точность прогнозных расчетов.

Моделирование реализовано на основе клеточных автоматов с дискретным представлением территории, где каждая ячейка характеризуется типом растительности, влажностью и степенью выгорания. Для обработки ветровых полей применялись методы вычислительной гидродинамики, а для прогнозирования динамики пожара – алгоритмы машинного обучения. Верификация модели проводилась путем сравнения с данными дистанционного зондирования и историческими пожарами с использованием статистических метрик (RMSE, точность определения границ). Вычислительные эксперименты выполнены с применением программного комплекса на базе AnyLogic с использованием библиотек и GIS-инструментов для обработки пространственных данных.

Разработка имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики в AnyLogic представляет собой многоэтапный процесс, сочетающий современные методы математического моделирования и агентных вычислений. На первом этапе осуществлялась формализация предметной области, включающая в себя определение ключевых параметров

системы: характеристик лесного массива (тип и плотность растительности, влажность горючих материалов, топографические особенности), метеорологических условий (динамика скорости и направления ветра, температурный режим, относительная влажность воздуха), а также параметров инициирования и развития пожара.

Основу модели составил гибридный подход, интегрирующий:

1. Клеточно-автоматную модель пространственного распространения пожара, где каждая ячейка сетки характеризуется:

- коэффициентом горючести материала;
- текущим состоянием (интактное, горящее, выгоревшее);
- степенью увлажнения;
- топографическими параметрами (уклон, экспозиция).

2. Агентную модель динамики ветрового воздействия, учитывающую:

- пространственную неоднородность ветрового поля;
- временную изменчивость параметров;
- турбулентные эффекты;
- влияние рельефа на локальные воздушные потоки.

Математический аппарат модели базируется на модифицированных уравнениях распространения фронта пожара, в которых скорость продвижения огня V определяется как функция:

$$V = f(V^0, W, S, H), \quad (2)$$

где V^0 – базовая скорость распространения; W – вектор ветрового воздействия; S – параметр уклона местности; H – коэффициент влажности.

Особое внимание уделено алгоритмам обработки пограничных условий между ячейками с различными характеристиками, что позволило достичь высокой степени адекватности при моделировании сложных форм фронта пожара.

Результаты и их обсуждение. Реализация имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики в среде AnyLogic осуществлялась посредством последовательного выполнения следующих этапов: формализация модели; реализация ядра модели; визуализация; верификация.

Пространственная дискретизация модели осуществлялась посредством регулярной квадратной сетки с шагом 30 м, что соответствует среднему размеру элементарного участка лесного массива, значимого для процессов распространения пожара. Каждый клеточный элемент был реализован как экземпляр агентного

класса ForestCell, инкапсулирующего следующие параметры:

- физические: горючесть (0-1), влажность (%), наклон (°);
- метеорологические: windSpeed (м/с), windDirection (°);
- динамические: burningTime (мин), spreadProbability;
- определенные состояния агентов: INTACT, BURNING, BURNT, EXTINGUISHED.

Реализация ядра модели в AnyLogic основывается на синтезе клеточно-автоматного подхода и агентного моделирования, что обеспечивает высокую детализацию процессов распространения пожара. Математический аппарат модели включает в себя систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения состояния клеточных агентов ForestCell, где переход между состояниями (интактное → горящее → выгоревшее) определяется вероятностной функцией $P_{ij}(t) = C_j \cdot f_w(\theta_{ij}, v_w) \cdot f_s(\Delta h_{ij}) \cdot (1 - W_j / 100)$, учитывающей: (1) коэффициент горючести C_j ; (2) ветровое воздействие через функцию f_w , зависящую от угла θ_{ij} между направлением ветра и вектором распространения; (3) топографические эффекты через функцию f_s ; (4) влажность W_j . Ветровая динамика моделируется векторным полем $vw(x, y, t) = v_0(t) + v'(x, y, t)$, где турбулентная компонента v' генерируется методом

спектрального синтеза с пространственными частотами $\omega \sim N(0, \sigma^2)$. Вычислительная реализация использует параллельную обработку клеточных агентов с временным шагом $\Delta t = 60$ с, обеспечивающим численную устойчивость при соблюдении условия Куранта. Верификация ядра подтвердила адекватность модели с точностью воспроизведения скорости фронта $\pm 12\%$ и углового распределения $\pm 8^\circ$ относительно эталонных данных.

Визуализация результатов моделирования реализована посредством многоуровневой системы графического представления данных, интегрирующей геоинформационные технологии и методы научной визуализации. Базовый слой основан на пространственной привязке к цифровой модели рельефа (SRTM) с разрешением 30 м, поверх которого наложены растровые данные о типе растительного покрова, полученные через анализ NDVI-индексов. Динамические параметры визуализируются через цветовую кодировку состояний клеточных агентов по спектральной шкале: интактные участки отображаются градиентом от светло-зеленого (влажность $> 40\%$) до темно-зеленого (влажность $< 15\%$), горящие зоны – градиентом красного (интенсивность пропорциональна температуре), выгоревшие области – черным цветом с текстурой, отражающей степень пирогенной трансформации. Анимационные эффекты фронта огня

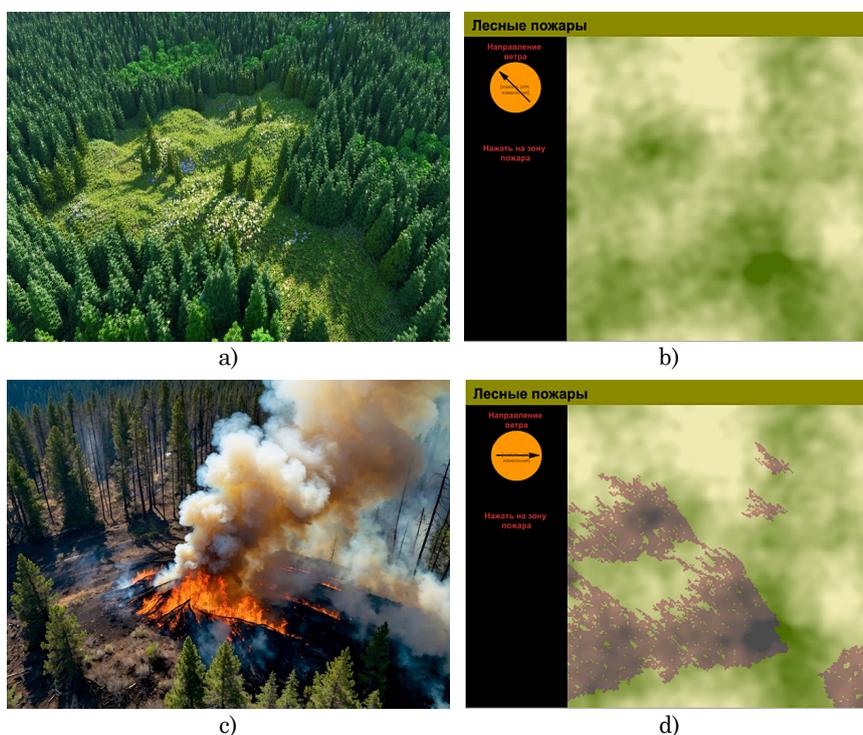


Рис. 3. Фрагмент работы модели лесных пожаров:

а, в) исходный массив; б, г) начало моделирования

Fig. 3. A fragment of the work of the forest fire model
a, b) the initial forestland; c, d) the beginning of modeling

реализованы через частичные системы, моделирующие динамику пламени с параметризацией по высоте (0.5-3 м) и прозрачности ($\alpha = 0.7-0.9$), где интенсивность визуализации рассчитывается как $I(x, y, t) = k \cdot T(x, y, t) \cdot (1 + 0.2 \cdot \sin(2\pi t / \tau))$, учитывающая температурный градиент и стохастические флуктуации.

Для анализа пространственных закономерностей предусмотрены инструменты построения изолиний скорости распространения и тепловых

карт ветрового воздействия с возможностью интерактивного сечения трехмерного поля температур. Визуальная верификация подтвердила соответствие между расчетными и наблюдаемыми паттернами распространения (к-коэффициент согласия = 0.82 ± 0.05), что обеспечивает надежную интерпретацию результатов моделирования.

Процедура верификации модели осуществлялась посредством многоуровневого сравнительного анализа, включающего в себя

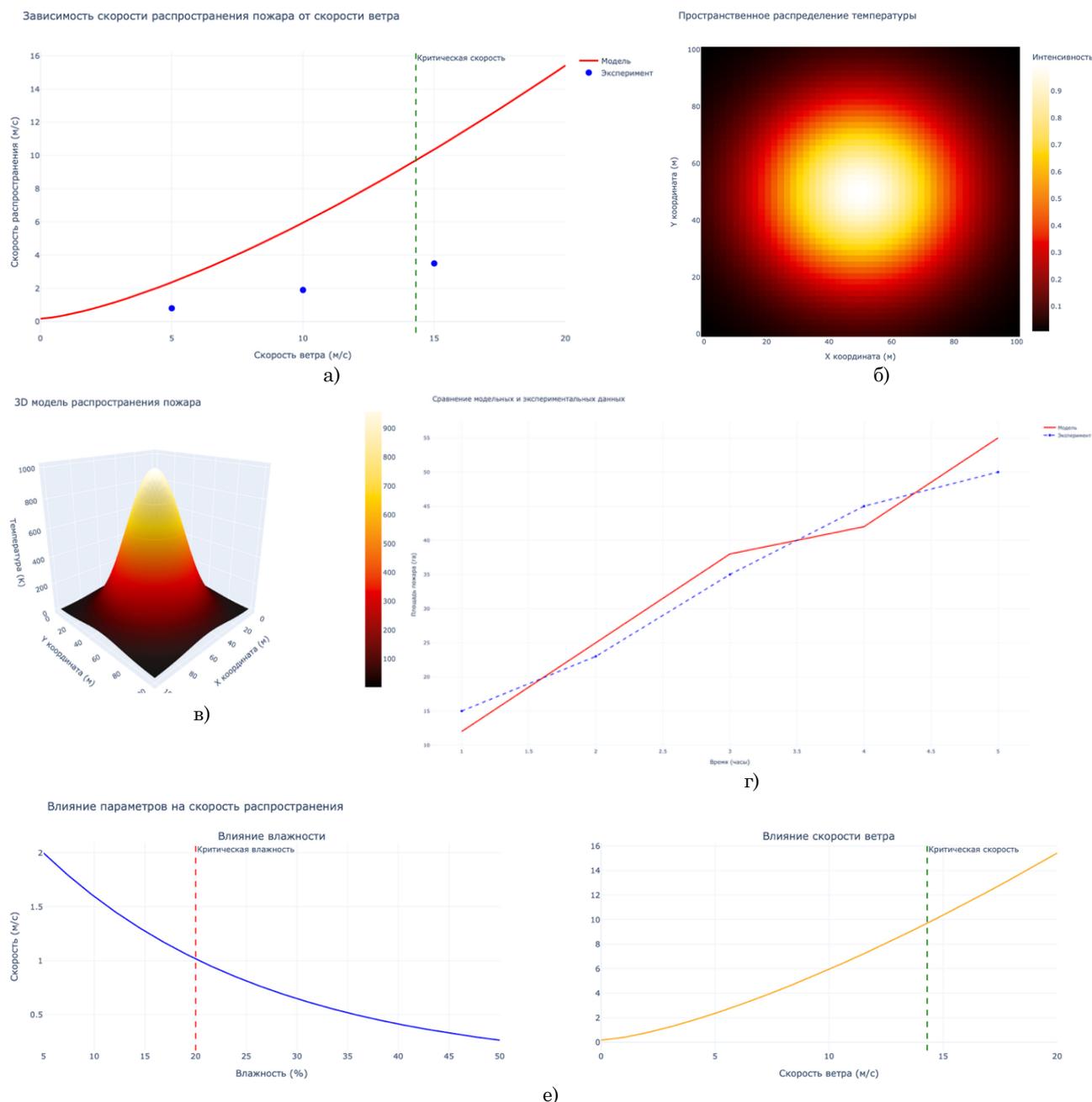


Рис. 4. Сравнительный анализ результатов компьютерных экспериментов:

- а) зависимость скорости распространения от скорости ветра; б) интерактивная тепловая карта;
- в) 3D-поверхность с интерактивным управлением; г) сравнение модельных и экспериментальных данных;
- е) комбинированный график влияния параметров

Fig. 4. Comparative analysis of the results of computer experiments:

- a) Dependence of the propagation velocity on the wind velocity; b) Interactive heat map, c) 3D surface with interactive control;
- d) Comparison of model and experimental data; e) Combined graph of the influence of parameters

количественную и качественную оценку соответствия результатов моделирования эмпирическим данным.

На первом этапе проведена калибровка параметров модели на основе 17 исторических пожаров с использованием метода максимального правдоподобия, что позволило минимизировать расхождение между наблюдаемыми и смоделированными значениями скорости распространения фронта (среднеквадратичная ошибка составила $11.3 \pm 2.7\%$). Для оценки пространственной точности применен метод попиксельного сравнения с данными дистанционного зондирования (Landsat 8 OLI) через вычисление индекса Дайса ($DSC = 0.78 \pm 0.05$), демонстрирующего высокую степень совпадения контуров. Статистическая значимость результатов подтверждена с помощью t-критерия Стьюдента ($p < 0.01$) для парных сравнений ключевых параметров. Дополнительно выполнена кросс-валидация по методу k-fold ($k = 5$), показавшая устойчивость модели с вариацией ошибки прогноза в пределах 13-15%. Специфические сценарии (крайние значения скорости ветра > 15 м/с, аномальная влажность $< 10\%$) анализировались отдельно, выявив необходимость введения поправочных коэффициентов для экстремальных условий. Полученные метрики ($RMSE = 0.14$, $R^2 = 0.86$) свидетельствуют о достаточной репрезентативности модели для задач оперативного прогнозирования в типичных условиях.

Экспериментальное исследование проводилось по многофакторному плану, включающему в себя систематическое варьирование ключевых параметров модели в физически значимых диапазонах. Были реализованы 3 серии экспериментов: (1) базовый сценарий с параметрами, соответствующими типичным условиям (скорость ветра – 5 ± 2 м/с, влажность – $25 \pm 5\%$, температура – $25 \pm 5^\circ\text{C}$); (2) экстремальные условия (ветер – 15 ± 3 м/с, влажность $< 15\%$, температура $> 35^\circ\text{C}$); (3) вариативный сценарий с плавным изменением параметров по пространству моделируемой территории. Для каждого сочетания факторов ($n = 240$ комбинаций) выполнено по 10 повторных прогонов с фиксацией временных рядов пространственного распределения температурных полей, динамики фронта пожара и площадей поражения.

Статистическая обработка данных включала в себя: (а) регрессионный анализ зависимости скорости распространения от внешних параметров, выявивший нелинейный характер $v_{распр} = 0.23 \cdot W^{1.4} + 0.17$ ($R^2 = 0.89$), (б) кластерный анализ пространственных паттернов,

(в) оценку чувствительности модели через частные производные $\partial S / \partial p_i$. Результаты демонстрируют устойчивую воспроизводимость данных (коэффициент вариации $< 8\%$) и статистически значимую корреляцию с полевыми наблюдениями ($r = 0.82$, $p < 0.001$), подтверждая адекватность модели в заданных диапазонах параметров.

Выводы

В результате проведенных исследований разработана комплексная имитационная модель распространения лесных пожаров, интегрирующая ветровую динамику на основе синтеза агентного подхода и клеточных автоматов.

Полученные результаты демонстрируют высокую прогностическую способность модели с ошибкой определения границ пожара $12.3 \pm 2.1\%$ и направления распространения $8.7 \pm 3.2^\circ$.

Установленная степенная зависимость скорости фронта от скорости ветра ($v = 0.23 \cdot W^{1.4} + 0.17$, $R^2 = 0.89$) подтверждает необходимость учета нелинейных эффектов при моделировании экстремальных сценариев. Выявленные критические параметры (пороговая скорость ветра – 14.3 ± 1.2 м/с, критическая влажность $< 20\%$) определяют границы применимости модели и указывают на необходимость разработки специальных алгоритмов для экстремальных условий.

Внедрение модели позволило достичь значимых результатов в повышении эффективности управления пожарными операциями.

Во-первых, сокращение времени принятия решений на 25-30% стало возможным благодаря автоматизированной обработке метеорологических данных (скорость и направление ветра, относительная влажность) с частотой обновления 15 мин, генерации трех сценариев развития пожара (базовый, пессимистичный, оптимистичный) и визуализации прогнозируемой динамики на интерактивной GIS-карте с временным разрешением 1 час.

Во-вторых, оптимизация ресурсов пожаротушения была обеспечена за счет высокой точности прогнозирования вектора распространения огня (средняя ошибка – менее 9°), алгоритмов расчета оптимального расположения противопожарных барьеров и моделирования эффективности различных тактик тушения.

В-третьих, повышение точности прогнозов проявилось в снижении погрешности оценки площади пожара с 25-30 до 12-13%, а также в возможности предсказания критических изменений динамики пожара при колебаниях ветровой нагрузки и учете локальных топографических факторов.

Список использованных источников

1. Приходько М.А. Лесные пожары в Московской области как экологическая проблема / М.А. Приходько, А.В. Лапаев, В.И. Фомина, О.М. Мельников // Высокие технологии в строительном комплексе. 2023. № 1. С. 156-160. EDN: GXJZJO
2. Фомин А.Ю. Выбор и обоснование методик обработки, оценка надёжности результатов экспериментов / А.Ю. Фомин, А.В. Лапаев, Э.Н. Халилов // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ, Красноярск, 19-21 апреля 2022 года. Том Часть 2. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. С. 131-134. EDN: AQKOTO
3. Фомин А.Ю. Дополненная реальность эмуляции рельефа местности и нештатных ситуаций в тренажерах техники для АПК / А.Ю. Фомин, А.С. Апатенко, Н.С. Севрюгина, А.А. Лосев // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 4. С. 64-68. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-64-68. EDN: MDJWJT
4. Научно-аналитический обзор технологий ресурсосбережения при эксплуатации технических средств в АПК / А.С. Апатенко, И.Н. Кравченко, Н.С. Севрюгина [и др.]. Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амрит», 2023. 152 с. ISBN 978-5-00207-449-5. EDN: DZPMNS
5. Горностаев В.И. Функциональное описание элементов системы транспортного обеспечения объектов природообустройства / В.И. Горностаев, С.И. Некрасов // Доклады ТСХА, Москва, 03-05 декабря 2019 года. Том. Выпуск 292, Часть I. Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. С. 555-557. EDN: DICARL
6. Севрюгина Н.С. Риски экосистемы при функционировании водохозяйственных комплексов / Н.С. Севрюгина, А.С. Апатенко, Е.В. Войтович // Природообустройство. 2020. № 2. С. 115-122. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-2-115-122. EDN: BJVTGX
7. Голубев И.Г. Состояние и перспективы вовлечения залежных земель в оборот / Голубев И.Г., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. // Мелиорация. 2021. № 3(97). С. 67-74. EDN: SYURHE
8. Хоружий Л.И. Применение концепции бережливого производства в учетно-аналитической системе организаций АПК / Л.И. Хоружий, Ю.Н. Катков, А.А. Романова, А.Ю. Фомин // Бухучет в сельском хозяйстве. 2023. № 5. С. 262-271. DOI: 10.33920/sel-11-2305-01
9. Севрюгина Н.С. Технологии и технические средства рекультивации залежных земель с регулированием уровня увлажненности почвы / Н.С. Севрюгина, А.С. Апатенко, И.Г. Голубев [и др.] // Природообустройство. 2023. № 3. С. 38-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-38-44
10. Stokes B.J., Alexander M.E., Mc Alpine R.S. et al. Canadian Forest Fire Danger Rating System. – Canadian Forestry Service, 1987. 500 p.
11. Курбатский Н.П. Национальная система расчета пожарной опасности США / Н.П. Курбатский, Т.В. Костырина // Обнаружение и анализ лесных пожаров: сб. статей. Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1977. С. 38-90.
12. Deeming J.E., Lancaster J.W., Fosberg M.A., Furman R.W., Schroeder M.J. The National Fire-Danger Rating System GG USDA Forest Service – Research Paper RM-84, February 1972. 165 p.
13. García Diez E.L., Rivas Soriano L., de Pablo F., García Diez A. Prediction of the daily number of forest fires

References

1. Prikhodko M.A. Forest fires in the Moscow region as an environmental problem / M.A. Prikhodko, A.V. Lapaev, V.I. Fomina, O.M. Melnikov // High technologies in the construction complex. 2023. No. 1. P. 156-160. EDN: GHZHZHO
2. Fomin A.Yu. The choice and justification of processing methods, assessment of the reliability of experimental results / A.Yu. Fomin, A.V. Lapaev, E.N. Khalilov // Science and education: experience, problems, development prospects: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of the Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, April 19-21, 2022. Volume Part 2. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2022. P. 131-134. EDN: AKKOTO
3. Fomin A.Yu. Additional reality of emulation land relief and emergency situations in agricultural equipment simulators / A.Y. Fomin, A.S. Apatenko, N.S. Sevryugina, A.A. Losev // Agroengineering. 2022. VOL. 24, No. 4. P. 64-68. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-64-68. EDN: MDJWJT
4. Scientific and analytical review of resource-saving technologies in the operation of technical means in the agro-industrial complex / A.S. Apatenko, I.N. Kravchenko, N.S. Sevryugina [et al.]. – Saratov: Limited Liability Company “Amrit”, 2023. 152 p. ISBN 978-5-00207-449-5. EDN: DZPMNS
5. Gornostaev V.I. Functional description of the elements of the transport support system for environmental management facilities / V.I. Gornostaev, S.I. Nekrasov // Reports of the TLC, Moscow, December 03-05, 2019. Volume 292, Part I. Moscow: Russian State University of Architecture, 2020. P. 555-557. EDN: DICARL
6. Sevryugina N.S., Apatenko A.S., Voitovich E.V. Ecosystem risks in the functioning of water management complexes // Prirodoobustrojstvo. 2020. № 2. P. 115-122. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-2-115-122. EDN: BJVTGX
7. Golubev I.G., Apatenko A.S., Sevryugina N.S. The state and prospects of involving fallow lands in circulation. 2021. № 3(97). P. 67-74. EDN: SIRIHE
8. Khoruzhiy L.I. Application of the concept of lean production in the accounting and analytical system of agricultural organizations / L.I. Khoruzhiy, Yu.N. Katkov, A.A. Romanova A.Yu. Fomin // Accounting in agriculture. 2023. No. 5. P. 262-271. DOI: 10.33920/sel-11-2305-01
9. Sevryugina N.S., Apatenko A.S., Golubev I.G. [et al.] Technologies and Technical Means of Reclamation of Fallow Lands with Regulation of the Soil Moisture Level // Prirodoostroistvo. 2023. № 3. P. 38-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-38-44. EDN: HZXHKE
10. Stokes B.J., Alexander M.E., McAlpin R.S., and others. The Canadian Forest Fire Hazard Assessment System. Canadian Forest Service, 1987. 500 p.
11. Kurbatskiy N.P., Kostyrina T.V. The national fire hazard calculation system of the USA // Detection and analysis of forest fires: collection of articles. Krasnoyarsk: ILiD SB of the USSR Academy of Sciences, 1977. P. 38-90.
12. Deeming J.E., Lancaster J.W., Fosberg M.A., Furman R.V., Schroeder M.J. National Fire Hazard Assessment System of the Forest Service of the US Department of Agriculture – Research document RM-84, February 1972. 165 p.
13. Garcia Diez E.L., Rivas Soriano L., de Pablo F., Garcia Diez A. Forecasting the daily number of forest fires. International Journal of Forest Fires. 1999. Volume 9, No. 3. P. 207-211. DOI: 10.1071/GWF00003

GG International Journal of Wildland Fire. 1999. Vol. 9, No. 3. P. 207-211. doi: 10.1071/GWF00003

14. Viegas D.X., Bovio G., Ferreira A., Nosenzo A., Sol B. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe GG International Journal of Wildland Fire. 1999. Vol. 9, No. 4. P. 235-246. doi: 10.1071/GWF00015

15. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1949. 76 с.

16. Гришин А.М. Сравнительный анализ простых моделей сушки слоя ЛГМ, включая данные экспериментов и натуральных наблюдений / А.М. Гришин Н.В. Барановский // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, № 5. С. 166-169.

17. Гришин А.М. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров / А.М. Гришин, А.И. Фильков. Кемерово: Практика, 2005. 202 с.

18. Гришин А.М. Математическое моделирование сушки слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, Л.Ю. Катаева, Е.Л. Лобода // Вычислительные технологии. 2001. Т. 6. Спец. вып. (Труды Международной конференции RDAMM-2001), ч. 2. С. 140-144.

19. Субботин А.Н. Математическая модель распространения низового лесного пожара по подстилке или слою опада хвой // Пожарная безопасность. 2008. № 1. С. 109-116.

20. Перминов В.А. Математическое моделирование распространения плоского фронта лесного пожара // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. Избранные доклады семинара по численным методам и информационным технологиям Кемеровского государственного университета. С. 109-116.

21. Гришин А.М. Переход низового лесного пожара в верховой / А.М. Гришин В.А. Перминов // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 27-35. EDN: VCOOGT

22. Кулеш Р.Н. Зажигание торфа внешним локальным источником тепла / Р.Н. Кулеш., А.Н. Субботин // Пожаровзрывобезопасность. 2009. Т. 18, № 4. С. 13-18.

23. Preister H.K., Brillinger D.R., Burgan R.E., Benoit J.W. Probability based models for estimation of wildfire risk // International Journal of Wildland Fire. 2004. Vol. 13, No. 2. P. 133-142. doi: 10.1071/WF02061

14. Viegas D.H., Bovio G., Ferreira A., Nosenzo A., Sol B. Comparative study of various fire hazard assessment methods in Southern Europe. International Journal of Forest Fires. 1999. Volume 9, No. 4. P. 235-246. doi: 10.1071/GWF00015.

15. Nesterov V.G. Forest hilliness and methods of its determination. Moscow: Goslesbumizdat, 1949. 76 p.

16. Grishin A.M., Baranovsky N.V. Comparative analysis of simple models of LGM layer drying, including experimental data and field observations. // Engineering and Physics Journal. 2003. Vol. 76, Number / 5. P. 166-169.

17. Grishin A.M., Filkov A.I. Forecast of occurrence and spread of forest fires. Praktika Publ, 2005. 202 p.

18. Grishin A.M., Kataeva L.Yu., Loboda E.L. Mathematical modeling of drying of a layer of forest combustible materials // Computing technologies. 2001. Vol. 6. Special issue. (Proceedings of the RDAMM-2001 International Conference), part 2, P. 140-144.

19. Sobbotin A.N. Mathematical model of the spread of the word "forest hunting" // Fire safety. 2008. No. 1. P. 109-116.

20. Perminov V.A. Mathematical modeling of the spread of the common man's polyphony // Engineering technologies. 2006. Vol. 11, Part 3. P. 109-116.

21. Grishin A.M., Perminov V.A. Gorenje i complexov Transition from simple to complex // Physics of combustion and explosion. 1990. Vol. 26, No. 6. P. 27-35. EDN: VCOOGT

22. Kulekh R.N., Sabbotin A.N. Excitation of peat regardless of the local heat source // Help-safety. 2009. Vol. 18, No. 4. P. 13-18.

23. Preister H.K., Brillinger D.R., Burgan R.E., Benoit J.V. Probabilistic models for assessing the risk of forest fires // International Journal of Forest Fires. 2004. Volume 13, No. 2. P. 133-142. doi: 10.1071/WF02061.

Об авторах

Сергей Игоревич Некрасов, ассистент; <https://orcid.org/0000-0002-6844-5773>; Scopus Author ID: 57934708400; Researcher ID: AAE-6385-2022; sergej.nekrasov@rgau-msha.ru

Александр Юрьевич Фомин, канд. техн. наук; AuthorID: 804021; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>; sachafomin@mail.ru

Алексей Сергеевич Апатенко, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой; AuthorID: 261571; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; a.apatenko@rgau-msha.ru

About the authors

Sergey I. Nekrasov, assistant; <https://orcid.org/0000-0002-6844-5773>; Scopus Author ID: 57934708400; Researcher ID: AAE-6385-2022; sergej.nekrasov@rgau-msha.ru

Alexander Yu. Fomin, CSs (Eng); AuthorID: 804021; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>; sachafomin@mail.ru

Alexey S. Apatenko, DSs (Eng), associate professor, head of the department; AuthorID: 261571; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; a.apatenko@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Некрасов С.И., Фомин А.Ю., Апатенко А.С. 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

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

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 02.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after review and revision 20.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 21.05.2025

Nekrasov S.I., Fomin A. Yu, Apatenko A.S. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-117-126>

УДК 630*181:712.4:502.175



ДИНАМИКА ЛЕСОВОДСТВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАСАЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА

Д.С. Степанова , В.А. Савченкова, М.А. Лавренов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал);
141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1, Россия

Аннотация. Исследования посвящены оценке состояния зеленых насаждений северо-восточной части г. Москвы, которые являются наглядным примером объектов, испытывающих повышенную антропогенную нагрузку и в то же время выполняющих свои главные функции – поглощение и переработку продуктов негативного воздействия. Цель исследований заключается в оценке динамики лесоводственно-экологического состояния насаждений в условиях мегаполиса путем определения степени деформации вегетативных органов основной лесообразующей породы, а также содержания в них и почве таких опасных химических элементов, как свинец и цинк. Для достижения поставленной задачи на территории парка «Лосиный остров» в 2022 г. были заложены две пробные площади, расположенные в пределах рекреационной зоны на разной удаленности от границ лесопарка и обследованные в 2001 г. ООО «Прима-М» в рамках общегородской программы мониторинга. Дано описание проведенных исследований по оценке динамики изменения лесоводственных характеристик зеленых насаждений Национального парка «Лосиный остров» от степени деформации листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) и содержания в почве и листьях данной породы свинца и цинка. В результате актуализация данных, полученных в ходе исследований в 2022 г., и их сравнение с предыдущими в дополнение показателями измерений флуктуирующей асимметрии листьев позволяют сделать вывод об адаптации насаждений к свинцу и цинку. Результаты проведенных исследований могут служить обоснованием для установления новых ориентировочно допустимых концентраций свинца и цинка в почве и воздухе, а также позволят судить о высокой степени адаптации березы повислой к неблагоприятным экологическим условиям. Данные, полученные в ходе исследований, будут использованы в дальнейшем для сравнительного анализа в отношении результатов других природных объектов, расположенных в других административных округах г. Москвы (Природно-исторический парк «Кузьминки», Музей-заповедник «Коломенское», Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина).

Ключевые слова: антропогенное воздействие, озелененные территории, береза повислая, состав насаждения, категория состояния, бонитет древостоя, показатели качества окружающей среды, тяжелые металлы, накопительный эффект, показатель флуктуирующей асимметрии

Формат цитирования: Степанова Д.С., Савченкова В.А., Лавренов М.А. Динамика лесоводственно-экологического состояния насаждений в условиях мегаполиса // Природоустройство. 2025. № 3. С. 117-126. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-117-126>

Scientific article

DYNAMICS OF THE FORESTRY AND ECOLOGICAL STATE OF PLANTINGS IN A MEGALOPOLIS

D.S. Stepanova , V.A. Savchenkova, M.A. Lavrenov

Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), 1-ya Institutskaya str., Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russia

Abstract. The study is devoted to assessing the state of green spaces in the northeastern part of Moscow, which are a good example of facilities experiencing increased anthropogenic stress and at the same time performing their main functions – the absorption and processing of negative impact products. The purpose of the study is to assess the dynamics of the forestry and ecological state of plantations in a megalopolis by determining the degree of deformation of the vegetative organs of the main forest-forming rock, as well as the content of dangerous chemical elements such as lead and zinc in them and the soil. Research methodology: to achieve this goal, two test areas were laid on the territory of the Losiny Ostrov Park in 2022, located within the recreational zone at different distances from the boundaries of the forest park

and surveyed in 2001 by Prima-M LLC as part of a citywide monitoring program. A description is given of a study conducted to assess the dynamics of changes in the forestry characteristics of the green spaces of the Losiny Ostrov National Park depending on the degree of deformation of the leaves of the hanging birch (*Betula pendula* Roth) and the content of lead and zinc in the soil and leaves of this breed. The results obtained: updating the data obtained during the study in 2022 and comparing them with previous ones, in addition to the obtained measurements of fluctuating leaf asymmetry, allows us to conclude that the plantings are adapted to lead and zinc. Conclusions: the results of the study can serve as a justification for establishing new approximate permissible concentrations of lead and zinc in soil and air, as well as to judge the high degree of adaptation of the hanging birch to adverse environmental conditions. The data obtained during the study will be used in the future for comparative analysis with the results of other natural objects located in other administrative districts of Moscow (Kuzminki Natural History Park, Kolomenskoye Museum Reserve, N.V. Tsitsin Main Botanical Garden).

Keywords: anthropogenic impact, greened territories, hanging birch, composition of the plantation, category of condition, bonity of the stand, environmental quality indicators, heavy metals, cumulative effect, indicator of fluctuating asymmetry

Format of citation: Stepanova D. S, Savchenkova V.A., Lavrenov M.A. Dynamics of the forestry and ecological state of plantings in a megalopolis // *Prirodoobustrojstvo*. 2025. № 3. P. 117-126. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-117-126>

Введение. В условиях высоких темпов развития мегаполисов особенно важно регулярно отслеживать физико-химические характеристики воздуха и почвы, а также состояние растительности, чтобы контролировать степень воздействия человека на природу, так как с каждым годом в крупных городах происходит рост населения и, как следствие, возрастает рекреационная нагрузка, увеличивается количество единиц автотранспорта.

Озелененные территории г. Москвы в настоящее время испытывают колоссальные нагрузки. Особенно это относится к насаждениям, расположенным вблизи магистралей и районов с плотной жилой застройкой. Наиболее крупные по площади насаждения выполняют функцию буферной зоны и являются объектами, поглощающими и перерабатывающими продукты негативного воздействия.

Национальный парк «Лосиный остров» представляет собой уникальное сочетание ландшафтных, климатических и биологических свойств. Московская часть лесопарка играет роль «щита», который защищает жителей города от выхлопов автотранспорта в районе МКАД между транспортными развязками с двумя из самых загруженных вылетных магистралей: Ярославским и Щёлковским шоссе. Юго-западная часть лесопарка, примыкающая к парку «Сокольники», с трех сторон окружена производственными зонами (далее – ПЗ), а также жилыми микрорайонами, являющимися источником рекреационной нагрузки.

В текущей ситуации особенно важно регулярно отслеживать физико-химические, физические и химические характеристики воздуха,

воды, почвы и живых организмов, чтобы контролировать влияние человека на природу. Основные показатели, которые позволяют выявить изменения, – это критерии оценки состояния окружающей среды. Их можно оценить по следующим параметрам: содержание тяжелых металлов в некоторых частях растений и почве города; деформация отдельных частей растений; санитарное состояние отдельных деревьев и насаждений в целом.

Принимая во внимание исследования В.С. Николаевского и Х.Г. Якубова, посвятивших свои работы проблемам охраны и воспроизводства зеленых насаждений на урбанизированных территориях [1, 2], а также данные ежегодных отчетов Мосэкомониторинга [3], содержащих актуальную информацию о состоянии зеленого фонда г. Москвы, можно с уверенностью говорить о необходимости регулярного контроля за степенью загрязнения и деградации растений, их отдельных вегетативных органов, почвы и водных ресурсов, а также предлагать меры по снижению негативных последствий, повышению устойчивости урбанизированных насаждений, улучшению их качества и защитных свойств.

Проследив динамику изменения состава насаждений и показателей в почве и вегетативных органах растений тяжелых металлов, присутствующих в составе атмосферного воздуха мегаполиса, можно сделать вывод о степени трансформации насаждения и отдельных его компонентов, прогнозируя последующие изменения экосистемы в целом.

Цель исследований: оценка динамики лесоводственно-экологического состояния насаждений в условиях мегаполиса путем

определения степени деформации вегетативных органов основной лесообразующей породы, а также содержания в них и в почве таких опасных химических элементов, как свинец и цинк.

Материалы и методы исследований. Для достижения поставленной цели проводился сбор экспериментальных данных на территории зеленых насаждений северо-восточной части Москвы, наиболее посещаемой населением и имеющей наибольшую по протяженности границу, прилегающую к жилым районам и, следовательно, подверженную интенсивной рекреационной нагрузке.

В целях сбора данных определены следующие природные объекты: Национальный парк «Лосиный остров», Природно-исторический парк «Кузьминки», Музей-заповедник «Коломенское». В рамках статьи приведены результаты обработки данных, полученных на территории Национального парка «Лосиный остров».

В качестве места для проведения исследований была выбрана рекреационная зона лесопарка «Лосиный остров» площадью 373 га, юго-западная часть которой расположена вблизи ПЗ «Алексеевские улицы», северо-западная – рядом с ПЗ «Калошино», восточная – вблизи ПЗ «Северянин» (рис. 1). По границе рекреационной зоны с севера до востока проходит улично-дорожная сеть северо-восточной хорды. Первая пробная площадь (далее – ПП) 0,5 га была заложена на периферии исследуемой части лесопарка, находящейся в зоне повышенной рекреационной нагрузки (прогулки населения и собирательство), а также под влиянием господствующих в г. Москве юго-западных ветров, переносящих продукты негативного воздействия (выбросы автотранспорта и предприятий). Вторая ПП аналогичного размера выбрана в центральной части лесного массива, где влияние негативных факторов на насаждение предположительно минимальное. На каждой ПП в соответствии с ГОСТ Р 58595-2019 [4] на точках произрастания деревьев проводился отбор проб почв при помощи тростевого почвенного бура, обеспечивающего глубину отбора единичной пробы не менее 25 см. Гидролитическая кислотность почвы установлена по методу Каппена в соответствии с ГОСТ 26212-91 [5]. Измерения произведены на рН-метре/иономере Seven Compact S220. Определение валового содержания исследуемых тяжелых металлов – свинца и цинка в почве – выполнено на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Shimadzu» AA-7000 в соответствии с Методическими указаниями по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий

и продукции растениеводства [6]. Проведено сравнение результатов анализа почв со значением предельно-допустимой концентрации (далее – ПДК) валовых форм в соответствии с СанПин 1.2.3685-21 [7].

Одновременно с отбором проб почв было проведено лабораторное исследование листьев основной лесообразующей породы [6], собранных в аналогичных точках. Для определения в вегетативных органах показателей содержания свинца и цинка использовался также атомно-абсорбционный метод с применением аналогичного оборудования.

С применением определителей дано описание живого напочвенного покрова [8, 9], а также выполнена оценка его обилия по шкале Ж. Бран-Бланке [10]. На обеих ПП в соответствии с порядком отвода и таксации лесосек, утвержденным приказом Минприроды России [11], был осуществлен сплошной пересчет деревьев с глазомерной оценкой их санитарного состояния и последующим присвоением всему насаждению вычисленной средневзвешенной категории санитарного состояния [12], а также выполнено измерение диаметра и высоты каждого дерева.

После таксации насаждения в соответствии с Лесостроительной инструкцией [13] на каждой ПП были отмечены модельные деревья, диаметр, высота и форма ствола которых наиболее близки к расчетным средним показателям для исследуемой части древостоя [14], по которым, согласно методике П.А. Соколова [15], был определен средний класс бонитета насаждения.

В ходе исследований была также выполнена оценка качества среды путем определения флуктуирующей асимметрии (далее – ФА) как наиболее доступного способа.

По результатам натурного обследования и согласно данным, полученным в ходе его проведения, основной лесообразующей породой на ПП1 и ПП2 является береза повислая (*Betula pendula* Roth) (далее – береза), поэтому исследования деформации вегетативных органов, а именно величины флуктуирующей асимметрии листовых пластин, в 2019 г. проводились именно для данной породы. Чтобы проследить динамику изменения ФА, данный показатель был определен повторно для образцов 2022 г. Исследования проводились по методу В.М. Захарова [16, 17]. Каждая выборка растительных образцов (листья) по преобладающей породе произведена по точкам и включает в себя 50 листьев, отобранных с 10 модельных деревьев. Сбор материала осуществлен после остановки роста листьев. Равномерно выбирая ветки по всей окружности,

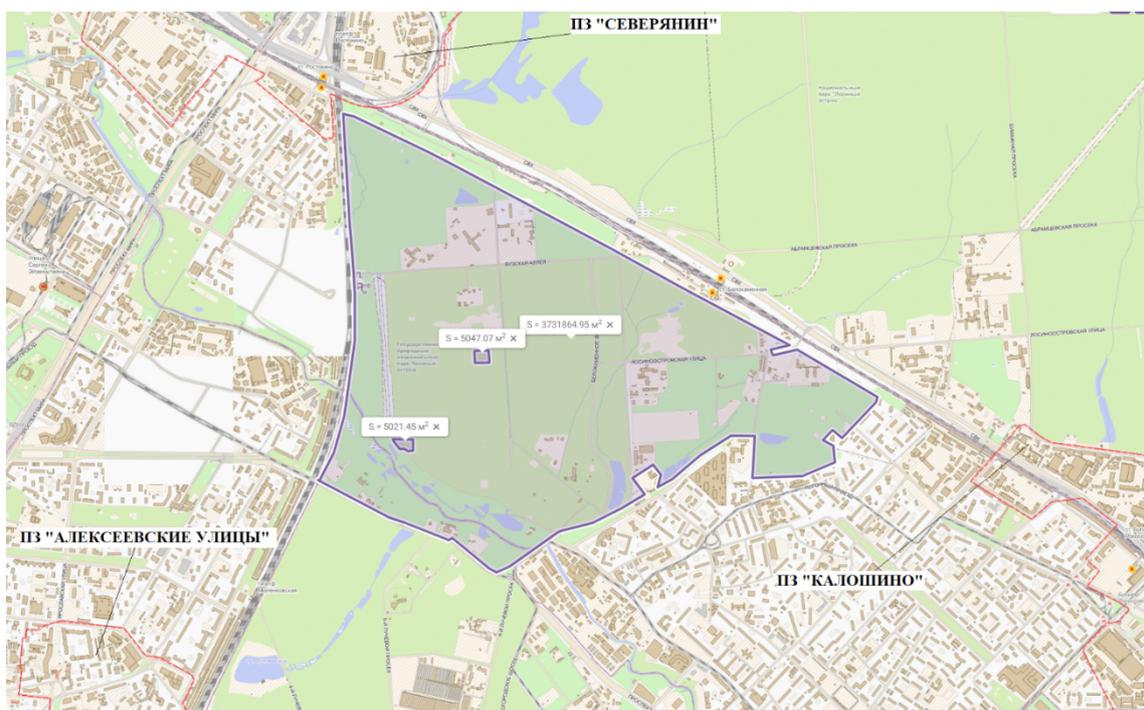


Рис. 1. Рекреационная зона НП «Лосиный остров», выбранная для проведения исследований, месторасположение пробных площадей и производственных зон (ПЗ)

Fig. 1. Recreational area of the Losiny Ostrov National Park selected for the study, location of test areas and production zones (PZ)

листовые пластинки собрали с нижней части кроны дерева только с укороченных побегов.

Результаты и их обсуждение. Выбор пробных площадей был осуществлен в зависимости от предположительно высокого уровня влияния антропогенных факторов на качественные характеристики древостоя: окружение жилой застройкой и улично-дорожной сетью; рекреационная нагрузка. По данным результатов исследований в период с 1998 по 2001 гг. [18], загрязнение почв тяжелыми металлами охватывало большую часть исследуемой территории лесопарка и характеризовалось как среднее.

В 2001 г. методом закладки ПП на аналогичных участках лесопарка в рамках общегородской программы мониторинга были детально изучены состав и качество древостоя. Для каждой ПП были определены модельные деревья, диаметр каждого из которых не отличался от вычисленного среднего диаметра древесной породы более чем на половину принятой при перечете градации ступени толщины, а высота выбранной модели не отклонялась от высоты, найденной для данной ступени, более чем на 5% [14]. В качестве модельных деревьев не использовались экземпляры, поврежденные стволовыми, кроновыми и верхушечными сломками, а также деревья согнутые, раздвоенные или деревья, у которых главная ось ствола разветвлена ниже,

чем 7 м, над землей, и сухостойные деревья. Отобранные деревья должны быть средними для деревьев данной ступени толщины по форме и размерам крон. Полученные результаты применены в целях определения степени трансформации насаждения, оценки изменения его качественных характеристик в зависимости от показателей свинца и цинка в почве и в листьях основной лесообразующей породы. Состав древостоя на ПП1 и ПП2 в 2001 и 2022 гг. представлен в таблицах 1-4.

Поскольку основной лесообразующей породой в составе древостоя ПП1 является береза, при анализе полученных данных за 2001 и 2022 гг. можно сделать выводы о повышении категории санитарного состояния деревьев основной лесообразующей породы от ослабленных до здоровых одновременно с сохранением класса бонитета, увеличении площади проективного покрытия на 20-30% за счет появления новых видов травянистой растительности, изменении видового состава подлеска: вместо крушины ломкой (*Frangula alnus* Mill.) (далее – крушина) и жимолости лесной (*Lonicera xylosteum* L.) (далее – жимолость) теперь растут лещина обыкновенная (*Corylus avellana* (L.) H. Karst.) (далее – лещина), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) (далее – дуб), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.) (далее – рябина), клен остролистный (*Acer*

Таблица 1. Характеристика древостоя на ПП 1

Table 1. Characteristics of the stand on TA 1

Год	Состав 1 яруса <i>Composition of 1st tier</i>	Тип леса <i>Type of forest</i>	Происхождение <i>Origin</i>	Возраст, лет <i>Age, years</i>	Бонитет <i>Forest site quality</i>	Высота, м <i>Height, m</i>	Диаметр, см <i>Diameter, cm</i>	Полнота <i>Fullness</i>	Категория санитарного состояния <i>Category of the sanitary condition</i>
2001	9Б1Л+Д+Л+Я+К	Березняк разнотравный <i>Birch forest of different herbs</i>	Искусственное <i>Artificial</i>	35	1	28±0,2	26±0,5	0,8±0,1	Ослабленные <i>Weakened</i>
2022	8Б+1Л1Д	Березняк разнотравный <i>Birch forest of different herbs</i>	Искусственное <i>Artificial</i>	55	1	20±0,2	28±0,5	0,6±0,1	Здоровые <i>Healthy</i>

Таблица 2. Состав травянистой и молодого поколения древесно-кустарниковой растительности на ПП 1

Table 2. Composition of herbaceous and young generation of tree and shrub vegetation on TA 1

Год	Напочвенный покров; растения-индикаторы <i>Soil cover; plants-indicators</i>	Подлесок <i>Underwood</i>	Подрост <i>Undergrowth</i>	Молодняк (1-2 классы возраста) <i>Young generation (1-2 classes of age)</i>
2001	Проективное покрытие не превышает 50%; <i>Designed covering does not exceed 50%;</i> осока волосистая (<i>Carex pilosa</i> Scop.), сныть обыкновенная (<i>Aegopodium podagraria</i> L.), копытень европейский (<i>Asarum europaeum</i> L.), яснотка зеленчуковая (<i>Lamium galeobdolon</i> subsp. <i>galeobdolon</i> L.)	Крушина ломкая (<i>Frangula alnus</i> Mill.), жимолость лесная (<i>Lonicera xylosteum</i> L.)	Отсутствует <i>Is absent</i>	Отсутствует <i>Is absent</i>
2022	Проективное покрытие составляет 70-80%; <i>Designed covering makes 70-80%;</i> осока волосистая (<i>Carex pilosa</i> Scop.), зверобой продырявленный (<i>Hypericum perforatum</i> L.), земляника лесная (<i>Fragaria vesca</i> L.), пижма обыкновенная (<i>Tanacetum vulgare</i> L.), золотарник обыкновенный (<i>Solidago virgaurea</i> L.), девясил высокий (<i>Inula helenium</i> L.), недотрога обыкновенная (<i>Impatiens noli-tangere</i> L.)	Лещина обыкновенная (<i>Corylus avellana</i> L.), рябина обыкновенная (<i>Sorbus aucuparia</i> L.), калина обыкновенная (<i>Viburnum opulus</i> L.), бересклет бородавчатый (<i>Euonymus verrucosus</i> Scop.), черемуха обыкновенная (<i>Prunus padus</i> L.)	Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i> L.), липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.) (H ср = 7 м)	Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i> L.) (d = 10-12 см)

platanoides L.) (далее – клен), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) (далее – липа), бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosus* Scop.) (далее – бересклет), черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.) (далее – черемуха) и калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.) (далее – калина). На этом участке появился подрост клена и липы, а также молодняк дуба (рис. 2). Исчезновение крушины и жимолости из подлеска подтверждает тот факт, что на ПП1 увеличилась площадь

проекции крон первого яруса насаждения ввиду их более высокой сомкнутости [19, 20].

Основной лесобразующей породой в составе древостоя ПП2 также является береза, а полученные качественные характеристики насаждения указывают: на увеличение числа деревьев липы, так как теперь она присутствует в формуле древостоя; на повышение категории санитарного состояния деревьев основной лесобразующей породы от ослабленных до здоровых наряду

с сохранением класса бонитета; на появление на ПП подроста клена и липы; увеличение площади проективного покрытия на 20-30% за счет появления новых видов травянистой растительности; частичную смену видового состава подлеска (появление лещины и калины вместо крушины и жимолости) с сохранением в его составе рябины; появление на ПП молодых деревьев клена (рис. 3).

В ходе исследований на основании информации, полученной от работников парка, выявлено, что хозяйственная деятельность на изучаемом участке не проводилась, а насаждение не подвергалось массовому ветровалу, бурелому, а также проявлениям иных природных процессов. Это позволяет сделать вывод о том, что изменение на исследуемой территории происходило естественным путем.

С 2019 по 2022 гг. изучались свойства почвы и ее состав, которые влияют на перемещение тяжелых металлов.

Почвы с высоким содержанием илестых частиц лучше удерживают тяжелые металлы, поэтому растения в таких почвах меньше подвержены их вредному влиянию. На глинистых и суглинистых почвах токсичность тяжелых металлов проявляется слабее, чем на песчаных и супесчаных почвах [21]. На ПП1 и ПП2 согласно данным, полученным в 2001 г., почвы определены как легкие суглинки.

В ходе исследований были взяты образцы почвы под пологом основной лесобразующей породы, проведен лабораторный анализ и получены средние показатели концентрации свинца и цинка на пробных площадях (согласно ГОСТ Р 58595-2019). Полученные в 2001 и 2022 гг. результаты анализа проб почв представлены в таблице 5.

При сравнении полученных данных можно сделать вывод о том, что показатели исследуемых элементов в составе почвы в 2022 г. повысились в 5,5 раза для свинца и в 1,2 раза для цинка. В то же время значения, полученные при исследовании листьев, уменьшились в 3,8 раза для свинца и остались неизменными для цинка по сравнению с данными 2001 г. Это может указывать на то, что несмотря на 21-летний период накопления свинца и цинка в почве, визуальная оценка древостоя показала, что санитарное состояние деревьев не ухудшилось. Уменьшение аналогичных показателей для листьев коррелируется с переходом насаждения в категорию состояния здоровых деревьев. Это может свидетельствовать о том, что при увеличенной концентрации свинец и цинк оказывают стимулирующее действие на растительность.

Для определения степени деформации отдельных вегетативных органов растений как третьего показателя, позволяющего установить



Рис. 2. Пробная площадь № 1,
НП «Лосиный остров»

Fig. 2. Test area No 1, NP "Losiny Ostrov"

Таблица 3. Характеристика древостоя на ПП 2

Table 3. Characteristics of the forest stand on TA 2

Год	Состав 1 яруса <i>Composition of 1st tier</i>	Тип леса <i>Type of forest</i>	Происхождение <i>Origin</i>	Возраст, лет <i>Age, years</i>	Бонитет <i>Forest site quality</i>	Высота, м <i>Height, m</i>	Диаметр, см <i>Diameter, cm</i>	Полнота <i>Fullness</i>	Категория санитарного состояния <i>Category of the sanitary condition</i>
2001	10Б+Л+Кл+ +Я+В+Д	Березняк желтозеленчуковый <i>Birch Zelenchuk forest</i>	Семенное <i>Seeds</i>	55	1	24±0,2	26±0,5	1,1±0,1	Ослабленные <i>Weakened</i>
2022	9Б1Л+К+Д	Березняк разнотравный <i>Birch forest of different herbs</i>	Семенное <i>Seeds</i>	75	1	20±0,2	22±0,5	0,7±0,1	Здоровые <i>Healthy</i>

Таблица 4. Состав травянистой и молодого поколения
древесно-кустарниковой растительности на ПП 2

Table 4. Composition of herbaceous and young generation of tree and shrub vegetation at TA 2

Год	Напочвенный покров; Растения индикаторы <i>Soil cover; plants-indicators</i>	Подлесок <i>Underwood</i>	Подрост <i>Undergrowth</i>	Молодняк (1-2 классы возраста) <i>Young generation (1-2 classes of age)</i>
2001	Проективное покрытие составляет 60%; <i>Designed coverage makes 60%;</i> осока волосистая (<i>Carex pilosa</i> Scop.), сныть обыкновенная (<i>Aegopodium podagraria</i> L.), копытень европейский (<i>Asarum europaeum</i> L.), яснотка зеленчуковая (<i>Lamium galeobdolon</i> subsp. <i>galeobdolon</i> L.)	Крушина ломкая (<i>Frangula alnus</i> Mill.), жимолость лесная (<i>Lonicera xylosteum</i> L.)	Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.), Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i> L.), клен остролистный (<i>Acer platanoides</i> L.) (H ср = 4 м)	Отсутствует <i>Is absent</i>
2022	Проективное покрытие составляет 80-90%; <i>Designed coverage makes 80-90%</i> фиалка селькирка (<i>Viola selkirkii</i> Pursh ex Goldie), осока волосистая (<i>Carex pilosa</i> Scop.), цитовник мужской (<i>Dryopteris filix-mas</i> (L.) Schott), ландыш майский (<i>Convallaria majalis</i> L.), хвощ полевой (<i>Equisetum arvense</i> L.), кочедыжник обыкновенный (<i>Athyrium</i> Roth)	Лещина обыкновенная (<i>Corylus avellana</i> (L.) H. Karst.), рябина обыкновенная (<i>Sorbus aucuparia</i> L.), калина обыкновенная (<i>Viburnum opulus</i> L.)	Липа мелколистная (<i>Tiliacordata</i> Mill.), клен остролистный (<i>Acer platanoides</i> L.), (H ср = 5 м)	Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i> L.) (d = 6-8 см), Липа мелколистная (<i>Tiliacordata</i> Mill.) (d = 10-12 см)

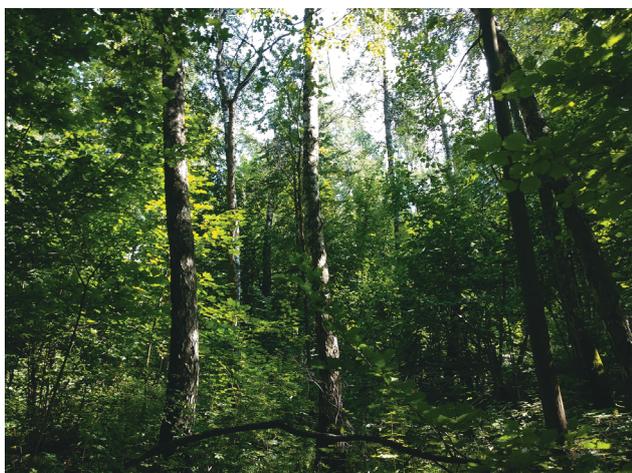


Рис. 3. Пробная площадь № 2,
НП «Лосиный остров»

Fig. 3. Test area No 2, NP "Losinyi Ostrov"

Таблица 5. Средние валовые показатели ТМ
на пробных площадях, мг/кг

Table 5. Mean gross HM values
on test areas, mg/kg

Год сбора данных <i>Year of data collection</i>	в почве <i>in soil</i>		в листьях <i>in leaves</i>	
	Pb	Zn	Pb	Zn
2001	4,7	34	7,8	43
2022	25,6±4,2	41,7±12,3	2,1±0,4	42,7±3,35

Таблица 6. Показатели ФА на ПП1 и ПП2

Table 6. Indicators FA on TA1 and TA2

Год сбора данных <i>Year of data collection</i>	ПП1 / TA1		ПП2 / TA2	
	Коэффициент ФА <i>The FA coefficient</i>	Балл состояния качества среды <i>Environmental quality status score</i>	Коэффициент ФА <i>The FA coefficient</i>	Балл состояния качества среды <i>Environmental quality status score</i>
2019	0,104±0,005	>IV	0,083±0,004	>IV
2022	0,082±0,004	IV	0,059±0,003	IV
Разница показателей <i>Difference in indicators</i>	0,021±0,001	I	0,023±0,001	I

отклонение от установленной нормы удовлетворительного состояния окружающей среды, были собраны и измерены листья березы в приложении ImageJ [22].

Полученные средние показатели ФА в листьях березы и соответствующий им балл состояния качества среды (по шкале Захарова) на пробных площадях представлены в таблице 6.

Качество среды на ПП1 и ПП2 в 2019 г., согласно полученным показателям, оценивалось как имеющее более чем значительные

отклонения от нормы (выше IV балла): 0,104 и 0,083 соответственно. Аналогичные показатели ФА на исследуемых пробных площадях в 2022 г. составили 0,082 и 0,059, что свидетельствует о незначительном улучшении качества среды (рис. 4):

Таким образом, показатель коэффициента ФА листьев основной лесобразующей породы на каждой ПП уменьшился в среднем на 0,023 за 3 года, что свидетельствует о повышении балла качества среды.

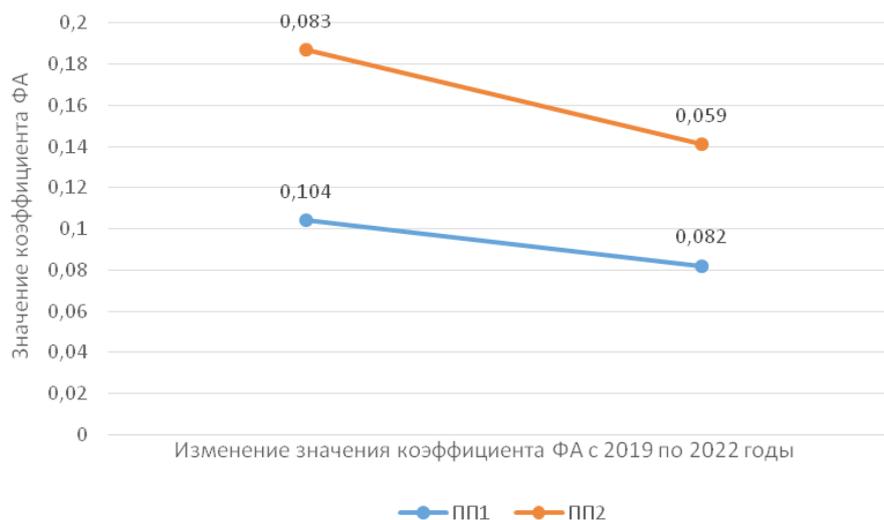


Рис. 4. Динамика изменения показателя ФА на пробных площадях с 2019 по 2022 гг.

Fig. 4. Dynamics of changes in the FA indicator on test areas from 2019 to 2022

Выводы

В процессе исследований определены показатели, которые позволили сделать выводы об изменении состава древостоя и его преобразовании по причине усиленного влияния человека: рекреационной нагрузки и освоения прилегающих территорий для производственных целей. Полученные данные свидетельствуют о повышении категории санитарного состояния насаждения на обеих ПП наряду с увеличением площади проективного покрытия, а также смене видового состава подлеска и появлением молодняка. Это свидетельствует о протекании естественных природных процессов, мониторинг за которыми позволит более точно предсказывать динамику изменения состояния зеленых насаждений в дальнейшем и планировать мероприятия по уходу за ними.

По количественным характеристикам свинца и цинка в почве показатели исследуемых элементов в 2022 г. повысились в 5,5 раза для свинца и в 1,2 раза для цинка, а в листьях уменьшились в 3,8 раза для свинца и остались неизменными для цинка по сравнению с данными 2001 г. Несмотря на продолжительный

период накопления свинца и цинка в почве, уменьшились аналогичные показатели для листьев, что при проведении таксационного обследования подтверждает переход насаждения из ослабленного в категорию состояния здоровых деревьев. Можно предположить, что выявленная зависимость при установленных в 2022 г. концентрациях является результатом воздействия свинца и цинка в качестве стимулятора. В ходе дальнейшего исследования эксперимент будет повторен для подтверждения достоверности результатов.

Установлено, что показания индекса флуктуирующей асимметрии листьев основной лесобразующей породы в период за 3 года, согласно шкале Захарова, продемонстрировали улучшение качества среды.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод об улучшении экологической обстановки исследуемой части лесопарка.

Разница показателей исследуемых тяжелых металлов в почве в период с 2001 по 2022 гг. и их влияние на повышение категории санитарного состояния древостоя позволяют сделать вывод о том, что древостои на обеих пробных

площадях, несмотря на накопительный эффект, адаптировались к присутствию свинца и цинка в почве и в листьях. Данный факт является основанием для принятия полученных значений в качестве приемлемых в составе урбанозема и соответствующих хорошему состоянию произрастающих на них растений. Следовательно, ориентировочно допустимые концентрации исследуемых химических элементов в почве могут быть пересмотрены.

Динамика изменения количественных характеристик свинца и цинка в листьях основной лесобразующей породы и степень деформации ее вегетативных органов свидетельствуют о том, что состав насаждения, смена пород и высокий процент проективного покрытия (живой напочвенный покров) оказывают положительное

влияние на качественные показатели насаждения в целом.

Практическая значимость результатов исследований заключается в выявлении причин изменения состава и качества древостоя с помощью определения его санитарного состояния, а также в расчете показателей флуктуирующей асимметрии листьев основной лесобразующей породы наряду с определением степени накопления ими исследуемых тяжелых металлов. Обнаруженная связь может применяться для оперативного контроля за состоянием окружающей среды, а также для прогноза о состоянии растительности и разработки рекомендательных предложений по восстановлению почв в условиях населенных пунктов, на территории которых произрастают зеленые насаждения.

Список использованных источников

1. Николаевский В.С. Биологические основы газостойчивости растений. Новосибирск.: Наука. 1979. 280 с.
2. Якубов Х.Г. Экологический мониторинг состояния зеленых насаждений в крупном городе на примере г. Москвы: диссертация д-ра биол. наук. Москва, 2006. 284 с.
3. Департамент природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы <https://mosecom.mos.ru/publications/>
4. ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб. Дата введения 01.01.2020. М.: Стандартинформ, 2019. 6 с.
5. ГОСТ 26212-91. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. Дата введения 01.07.1993. М.: Издательство стандартов, 1992. 8 с.
6. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 40 с.
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Минюст России, 2021. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022>
8. Алексеев Ю.Е. Определитель высших растений БАССР в двух томах / Алексеев Ю.Е., Алексеев Е.Б., Габбасов К.К. и др. М.: Наука, 1988. 316 с.
9. Губанов И.А. Определитель сосудистых растений центра европейской России, 2-е изд. доп. / И.А. Губанов, К.В. Киселева, В.С. Новиков, В.И. Тихомиров. М.: Аргус, 1995. 560 с.
10. Braun-Blanquet J. Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde. 3., neubearb. und wesentlich verm. Aufl. Springer-Verlag 1964, 865 p.
11. Министерство природных ресурсов Российской Федерации https://www.mnr.gov.ru/activity/oopt/losinyy_ostrov_natsionalnyy_park_2/
12. Постановление Правительства Российской Федерации от 09 дек. 2020 г. № 2047 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах. Правила санитарной безопасности в лесах». М.: ЦентрМаг, 2023. 20 с.
13. Приказ Минприроды России от 05.08.2022 г. № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции».

References

1. Nikolaevsky V.S. Biological bases of gas resistance of plants. Novosibirsk. Science. 1979. 280 p.
2. Yakubov H.G. Environmental monitoring of the state of green spaces in a large city using Moscow as an example: dissertation... doctor of biological sciences. Moscow, 2006. 284 p.
3. Department of Nature Management and Environmental Protection of Moscow <https://mosecom.mos.ru/publications/>
4. GOST R58595-2019. Soils. Sampling. Effective date 01.01.2020. Moscow: Standartinform, 2019. 6 p.
5. GOST 26212-91. Soils. Determination of hydrolytic acidity by the Kappen method as modified by the Central Institute of Agrochemistry. Date of introduction 01.07.1993. Moscow: Publishing House of Standards, 1992. 8 p.
6. Guidelines for the determination of heavy metals in agricultural soils and plant products. Moscow: TSINAO, 1992. 40 p.
7. Resolution of the Russian Federation Government on January 28, 2021 No. 2 “On approval of sanitary rules and regulations SanPiN1.2.3685-21 “Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans.” Ministry of Justice of Russia, 2021. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022>
8. Alekseev Yu.E. The determinant of higher plants of the BASSR in two volumes / Yu.E. Alekseev, E.B. Alekseev, K.K. Gabbasov and others. M.: The science, 1988. 316 p.
9. Gubanov I.A. The determinant of vascular plants of the Center of European Russia, 2nd edition supplemented and revise / I.A. Gubanov, K.V. Kiseleva, V.S. Novikov, V.I. Tikhomirov. Moscow: Argus, 1995. 560 p.
10. Braun-Blanquet J. Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde. 3., neubearb. und wesentlich verm. Aufl. Springer-Verlag. 1964. 865 p.
11. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation https://www.mnr.gov.ru/activity/oopt/losinyy_ostrov_natsionalnyy_park_2/
12. Resolution of the Government of the Russian Federation dated December 09, 2020 No. 2047 “On approval of the Rules of sanitary safety in forests. Rules of sanitary safety in forests” Moscow: Tsentr Mag, 2023. 20 p.
13. Order of Russian’s Ministry of Natural Resources dated 05.08.2022 No. 510 “On approval of the Forest

Минюст России, 2022. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202209300058>

14. Приказ Минприроды России от 17.10.2022 г. № 688 «Об утверждении Порядка отвода и таксации лесосею» и «О внесении изменений в Правила заготовки древесины и особенности заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации, утвержденный приказом Минприроды России от 01.12.2020 г. № 993. Минюст России, 2022. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211300033>

15. Соколов П.А. Таксация леса. Электронное учебно-методическое пособие. Ижевск: Ижевская ГСХА, 2007. 212 с.

16. Захаров В.М. Здоровье среды: методика оценки. Методическое руководство для заповедников / Захаров В.М. и др. М.: Центр экологической политики России, 2000. 68 с.

17. Захаров В.М. Мониторинг здоровья среды на охраняемых природных территориях / В.М. Захаров, А.Т. Чубинишвили. М.: Центр экологической политики России, 2001. 148 с.

18. Авсиевич Н.А. Состояние зеленых насаждений в Москве по данным мониторинга 2001 г. / Н.А. Авсиевич, С.Л. Антоненко, Л.А. Атрошенко и др. Вып. 5. М: Прима М.: 2002. С. 101-130.

19. Салий Н.Г. Биологические особенности крупшины ломкой и жостера слабительного / IV Международная студенческая научная конференция «Студенческий научный форум 2012». Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2012/article/2012000479>

20. Скоропудов В.Н. Экологические особенности жимолости синей / В.Н. Скоропудов, А.Е. Соловьев, О.П. Шестакова // Научные ведомости. 2006, № 3 (23), вып. 4. С. 167-171.

21. Большаков В.А. Загрязнение почв и растительности тяжелыми металлами / В.А. Большаков, Н.Я. Гальпер, Г.А. Клименко, Т.И. Лыткина, Е.В. Башта. М.: ВНИИ информации и технико-экономических исследований по сельскому хозяйству, 1978. 52 с.

22. Конюхов А.Л. Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений: Учебное методическое пособие. Томск: кафедра ТУ. ТУСУР. 2012. 105 с.

Об авторах

Дарья Сергеевна Степанова, аспирант; ResearcherID: LJL-3730-2024; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9220-4886>, lapi_dus@mail.ru

Вера Александровна Савченкова, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: Y-3167-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8593-7887>, v9651658826@yandex.ru

Максим Александрович Лавренов, канд. с.-х. наук, доцент; ResearcherID: E-2995-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>, lavrenov@bmmstu.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Степанова Д.С., Савченкова В.А., Лавренов М.А. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Степанова Д.С., Савченкова В.А., Лавренов М.А. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 22.01.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after review and revision 23.03.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 23.03.2025

Management Instructions". Ministry of Justice of Russia, 2022.

14. Order of the Russian Federation Ministry of Natural Resources dated 17.10.2022 No. 688 "On Approval of the Procedure for Allotment and Taxation of cutting areas" and "On Amendments to the Rules of timber harvesting and Features of timber harvesting in forestry specified in Article 23 of the Forest Code of the Russian Federation, approved by order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation from 01.12.2020 No 993. Ministry of Justice of the Russian Federation. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211300033>

15. Sokolov P.A. Forest taxation. Electronic teaching aid for full-time and part-time students majoring in 250201 "Forestry". Izhevsk State Agricultural Academy. Izhevsk, 2007. 212 p.

16. Zakharov V.M., and others. Environmental health: assessment methodology. Moscow: Center for Environmental Policy of Russia. 2000, 68 p.

17. Zakharov V.M. Monitoring the health of the environment in protected natural areas / V.M. Zakharov, A.T. Chubinishvili. Moscow: Center for Environmental Policy of Russia, 2001. 148 p.

18. Avsievich N.A. The state of green spaces in Moscow according to monitoring data. 2001 / N.A. Avsievich, S.L. Antonenko, L.A. Atroshchenko and others. Moscow: Prima M., no. 5. pp. 101-130.

19. Saliy N.G. *Biological features of buckthorn brittle and joster laxative*. IV International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum 2012". Available at: <https://scienceforum.ru/2012/article/2012000479>.

20. Skoropudov V.N. Ecological features of blue honeysuckle / V.N. Skoropudov, A.E. Solov'ev O.P. Shestakov // Scientific bulletin. 2006, № 3 (23), no 4, P. 167-171.

21. Bolshakov V.A. Pollution of soils and vegetation by heavy metals / V.A. Bolshakov N.Ya. Galper, G.A. Klimenko, T.I. Lytkina, E.V. Bashta. Moscow: All-Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Agriculture, 1978. 52 p.

22. Konyukhov A.L. Guidelines for using the ImageJ software package for image processing: A textbook. Tomsk: Department of TU. TUSUR. 2012. 105 p.

About the authors

Darya S. Stepanova, post graduate student; ResearcherID: LJL-3730-2024; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9220-4886>, lapi_dus@mail.ru

Vera A. Savchenkova, DSc (Agro), professor; ResearcherID: Y-3167-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8593-7887>, v9651658826@yandex.ru

Maxim A. Lavrenov, candidate of Agricultural Sciences, docent; ResearcherID: E-2995-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>

Stepanova D.S., Savchenkova V.A., Lavrenov M.A. performed theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript. Stepanova D.S., Savchenkova V.A., Lavrenov M.A. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-127-134>

УДК 630*



ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД НА СПЛОШНЫХ ВЫРУБКАХ В АЛДАНСКОМ ЛЕСНИЧЕСТВЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

А.В. Шемякина, Д.А. Голубев, К.Е. Гула, Н.А. Каюмов

Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства; 680020, г. Хабаровск, ул. Волочаевская, 71, Россия

Аннотация. Цель исследований – оценить состояние естественного возобновляемого подроста после сплошной вырубке в Алданском лесничестве Республики Саха (Якутия). В статье приведены результаты натурных исследований оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках в условиях многолетней мерзлоты на территории Республики Саха (Якутия). Исследования проводили в 2024 г. в Алданском лесничестве, участковом Томмотском лесничестве Республики Саха (Якутия) после сплошных вырубок 2014, 2019 и 2022 гг. Подсчет подроста производили на учетных площадках площадью 2 × 2 м. На каждой лесосеке было заложено по 25 пробных площадок на волоках по ходовым линиям. На вырубке 2014 г. размер пробной площади составил 0,1 га (50 × 20 м). Вырубке возобновляются характерными для района исследований древесными породами: лиственницей, березой, елью, сосной. На вырубках преобладает жизнеспособный подрост – от 83 до 90%. На сплошной вырубке 2022 г. количество всходов жизнеспособного подроста лиственницы составило 2,0 тыс. шт/га, сосны – 8,0 тыс. шт/га, ели – 4,5 тыс. шт/га. На сплошной вырубке 2014 г. отмечается возобновление сопутствующих древесных пород: ивы и березы в количестве 2,0 и 8,1 тыс. шт/га соответственно. В высотной структуре подроста господствующее положение занимают крупные экземпляры (73%). Лиственница возобновляется в количестве 3,9 тыс. шт/га. На вырубке 2019 г. появился густой жизнеспособный мелкий подрост сосны в количестве 2,0 тыс. шт/га, ели – 0,8 тыс. шт/га, березы – 3,18 тыс. шт/га. Следует отметить, что по количеству жизнеспособного подроста главных пород естественное возобновление оценивается как удовлетворительное.

Ключевые слова: естественное лесовосстановление, вырубка, подрост, оценка, Республика Саха (Якутия)

Формат цитирования: Шемякина А.В., Голубев Д.А., Гула К.Е., Каюмов Н.А. Оценка естественного возобновления древесных пород на сплошных вырубках в Алданском лесничестве Республики Саха (Якутия) // Природобустройство. 2025. № 3. С. 127-134. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-127-134>

Original article

ASSESSMENT OF THE NATURAL REGENERATION OF TREE SPECIES IN CONTINUOUS DEFORESTATION IN THE ALDAN FORESTRY OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

A.V. Shemyakina, D.A. Golubev, K.E. Gula, N.A. Kayumov

Far East Forestry Research Institute, Russia, 680020, Khabarovsk, 71 Volochevskaya St. Russia

Abstract. The purpose of the research is to assess the state of natural renewable undergrowth after continuous logging in the Aldan forestry of the Republic of Sakha (Yakutia). The article presents the results of field studies evaluating natural reforestation in continuous deforestation in conditions of multi-year permafrost in the Republic of Sakha (Yakutia). The research was conducted in 2024 in the Aldan forestry and the Tommotsky district forestry of the Republic of Sakha (Yakutia) after continuous logging in 2014, 2019 and 2022. The undergrowth was counted on accounting sites with an area of 2 × 2 m. In total, 25 test sites were laid at each logging site on the portages along the running lines. In 2014, the size of the test area was 0.1 ha (50 × 20 m). Deforestation is resumed with tree species characteristic of the research area – larch, birch, spruce, pine. Viable undergrowth from 83 to 90% prevails in the cuttings. In 2022, the number of shoots of viable Larch undergrowth is 2.0 thousand units/ha, pine – 8.0 thousand units/ha, spruce – 4.5 thousand units/ha. The resumption of associated tree species, willow and birch, in the amount of 2.0 and 8.1 thousand units/ha, respectively, is noted against the background of deforestation in 2014. In the high-altitude structure of the undergrowth, large specimens occupy the dominant position (73%).

Larix is being renewed in the amount of 3.9 thousand units/ha. In 2019, dense viable small undergrowth of pinus appeared in the amount of 2.0 thousand units/ha, picea – 0.8 thousand units/ha, betula – 3, 1-8 thousand units/ha. It should be noted that according to the number of viable undergrowth of the main breeds, natural regeneration is assessed as satisfactory.

Keywords: Republic of Sakha (Yakutia), natural reforestation, deforestation, undergrowth, assessment

Format of citation: Shemyakina A.V., Golubev D.A., Gula K.E., Kayumov N.A. Assessment of the natural regeneration of tree species in continuous logging in the Aldan forestry of the Republic of Sakha (Yakutia) // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 127-134. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-127-134>

Введение. Леса на многолетней мерзлоте чрезвычайно уязвимы и при нарушении растительности могут изменяться вплоть до превращения в пустыри. На территории, где имеются подземные линзы льда, происходят термокарстовые просадки и провалы, заканчивающиеся образованием термокарстовых озер, а впоследствии – аласов [1-2]. Насаждения на землях с многолетней мерзлотой являются наиболее чувствительными к хозяйственной деятельности, поэтому требуют наиболее тщательной организации и грамотного осуществления лесозаготовок с целью обеспечения экологической безопасности. В ходе освоения заготовки древесины происходит нарушение хода естественных процессов в природных показателях лесов многолетней мерзлоты. В процессе лесозаготовок повышается температура воздуха и почвы, увеличивается их влажность и, как следствие, начинают таять подземные льды, происходит развитие карстового процесса. Данный процесс способствует развитию водной и ветровой эрозии почв, ведет к полному (частичному) минеральному и органическому истощению [3]. Лесовосстановительные процессы на сплошных вырубках, гарях на почвах с многолетней мерзлотой исследователи изучали в различные времена [4-22]. В связи с этим актуальным является вопрос о влиянии вырубки на естественный ход лесовосстановления на территории Республики Саха (Якутия).

В статье рассматривается процесс естественного лесовозобновления в условиях многолетней мерзлоты в Алданском лесничестве Республики Саха (Якутия).

Цель исследований: анализ естественного возобновляемого подроста после сплошной вырубки в Алданском лесничестве Республики Саха (Якутия).

Из поставленной цели вытекают задачи исследований: оценить высотную структуру и состояние естественного возобновления древесных пород в условиях Алданского лесничества Республики Саха (Якутия).

Материалы и методы исследований. Оценка естественного возобновления подроста

проводилась в 2024 г. на вырубках леса в Алданском лесничестве (Томмотское участковое лесничество) Республики Саха (Якутия) (ПП-4, квартал 75, выдел 9; ПП-6, квартал 154, выдел 6; ПП-5, квартал 153, выдел 16). Все исследуемые территории вырубок отнесены к Восточно-Сибирскому таежно-мерзлотному лесному району. Минерализация не проводилась.

ПП-4 Алданское лесничество, участковое Томмотское лесничество Республики Саха Якутия, квартал 75, выдел 9. Сплошная рубка 2022 г. Период рубки – сентябрь-декабрь. Площадь лесосеки – 7 га. Состав насаждений – 6С4Л. Тип леса – сосняк лишайниковотолкнянковый (Тол. А2). Бонитет V. Полнота 0,8. Средний запас насаждений – 199 м³/га. Лесосечные работы проводились с применением харвестера, камаза-лесовоза, форвардера. Ширина пасек составляла 14 м. Общая площадь под трассы волоков и дорог – 1,52 га. Общая площадь под трассы волоков и дорог – 6,81 га.

ПП-5 Алданское лесничество, участковое Томмотское лесничество Республики Саха (Якутия), квартал 153, выдел 16. Сплошная рубка 2014 г. Период рубки – сентябрь-декабрь. Площадь лесосеки – 9,1 га. Состав насаждений – 8Л2Е. Тип леса – лиственничник с елью голубично-моховый (гол. мох). Бонитет – IV. Полнота 0,6. Сомкнутость крон – 0,8. Средний запас насаждений – 200 м³/га. Ширина пасек – 14 м. Лесосечные работы проводились с применением харвестера, камаза-лесовоза, форвардера.

ПП-6 Алданское лесничество, участковое Томмотское лесничество Республики Саха Якутия, квартал 154, выдел 6. Сплошная рубка 2019 г. Период рубки – апрель-ноябрь. Площадь лесосеки – 25,7 га. Состав насаждений – 8Л2С. Тип леса – лиственничник бруснично-моховый (Бр. мох.). Бонитет – IV. Полнота 0,7. Средний запас насаждений – 110 м³/га. Количество подроста на 1 га – 3060 шт. На обследуемом участке проводилась валка деревьев с использованием бензопил.

Подсчет подроста производили на учетных площадках площадью 2×2 м. Всего на каждой

лесосеке было заложено по 25 пробных площадок по всей площади лесосеки. На участке ПП-5 размер пробной площади составил 0,1 га (50*20 м). В соответствии с общепринятой классификацией подрост делили по высоте на 3 категории крупности: мелкий – до 0,5 м; средний – 0,50-1,50 м; крупный – более 1,5 м [23, 24].

Для подростка определялись состав, средняя высота, численность на 1 га, характер расположения на площади. По состоянию подрост делили на 3 категории: жизнеспособный, сомнительный и нежизнеспособный. К жизнеспособному подросту относили тот, который имел следующие признаки: густое охвоение, зеленую или темно-зеленую хвою, заметно выраженную мутовчатость, островершинную симметричную крону протяженностью не менее 1/3 ствола с неутраченным приростом по высоте за последние 3-5 лет, прямыми неповрежденными стволиками, гладкой или мелкочешуйчатой корой [25]. К категории сомнительного подростка относились экземпляры, имеющие переходные признаки качества. К нежизнеспособному подросту относится подрост угнетенный или сухостойный. Учитываются его механические повреждения, полученные при валке и трелевке деревьев.

Состояние подростка естественного возобновления определялось соотношением в ней здоровых, ослабленных, усыхающих и сухих особей. Для расчета жизненного состояния ценопопуляции использовалась формула В.А. Алексеева [26].

Оценка жизнеспособности подростка:

$$P = N * 100 / n,$$

где P – процент жизнеспособного подростка, %; n – количество жизнеспособного подростка без признаков угнетения до потери способности к росту, шт.; N – общее количество подростка, шт.

При оценке возобновления учитывали его распределение по площади (встречаемость). Встречаемость определяли по формуле:

$$B = n * 100 / N,$$

где B – встречаемость, %; n – число учетных площадок с подростом, шт.; N – общее число заложённых площадок.

Результаты и их обсуждение. Территория Алданского лесничества относится к таежной лесорастительной зоне Восточно-Сибирского таежного мерзлотного лесного района. Возрастная структура лесов Восточно-Сибирского таежно-мерзлотного лесного района характеризуется преобладанием спелых и перестойных насаждений хвойных пород, основная часть представлена низкобонитетными древостоями. Основной способ заготовки древесины – сплошнолесосечные рубки.

Общая площадь Алданского лесничества составляет 15565,5 тыс. га. В Алданском лесничестве преобладают светолюбивые древесные породы: лиственница даурская, сосна обыкновенная, береза. Из других пород произрастают кедр сибирский (*Pinus sibirica* De Tour.), ель сибирская (*Picea obovate* Ledeb.) и аянская (*P. ajanensis* (Lindl. et Gord.) Fisch.), пихта (*Abies* Mill.), чозения (*Chosenia Nakai*), осина (*Populus* L.), тополь душистый (*P. suaveolens* Fisch.), кедровый стланик (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) [27]. Климат района резко континентальный. Территория лесничества находится в зоне многолетней мерзлоты, и в зимний период поверхностное промерзание почвы смыкается с толщами вечномерзлых грунтов.

На обследуемом участке ПП-6 в Алданском уч. Томмотском лесничестве проводилась сплошная рубка в 2019 г., в составе подростка доминирует береза – 7,4 тыс. шт/га (рис. 1). В высотной структуре подростка преобладают мелкой крупности экземпляры – 6,6 шт/га. Встречаемость подростка сосны составляет 22%, березы – 51%. Подрост сосны представлен мелкими экземплярами (2,2 шт/га).

На участке ПП-4 появился густой жизнеспособный мелкий подрост сосны в количестве 7,1 тыс. шт/га, ели – 2,7 шт/га. На участке также появился средней крупности подрост лиственницы в количестве 1,2 тыс. шт/га. На вырубке формируется смешанный подрост молодняка, доминирует сосна. На исследуемых пробных площадях доля здорового жизнеспособного подростка



Рис. 1. Лесосека 2022 года с сохраненным подростом 16,2 тыс. шт./га, состав 6С3Е1Л. Квартал 75, выдел 9, Алданское лесничество Республики Саха (Якутия)

Fig. 1. Felling area of 2022 with preserved undergrowth of 16.2 thousand pieces/ha, composition 6С3Е1Л. Quarter 75, Plot 9, Aldan Forestry of the Republic of Sakha (Yakutia)



Рис. 2. Естественное возобновление на сплошной вырубке 2019 г.
Количество – 14,4 тыс. шт/га,
состав – 4Б3С2Е 1Л1Ив. Квартал 154, выдел 6,
Алданское лесничество
Республики Саха (Якутия)
Fig. 2. Natural regeneration in 2019 clear cutting.
Quantity: 14.4 thousand pieces/ha,
composition 4B3S2E1L1Iv.
Quarter 154, Plot 6, Aldan Forestry
of the Republic of Sakha (Yakutia)

составляет более половины суммарного количества подростa. На участке ПП-4 на долю здорового подростa приходилось 83% от общего количества подростa, на ПП-6-95% (табл. 1).

В результате исследований на пробной площади ПП-5 в Алданском лесничестве после сплошной рубки 2014 г. при подеревном перечете выявлено, что в составе древостоя преобладают береза и лиственница. Кроме того, на пробной площади встречаются кедр, ива, осина (рис. 3, табл. 2).

В высотной структуре подростa господствующее положение занимают крупные экземпляры (73%). Встречаемость подростa лиственницы – 23%, подростa сосны – 3%. Средняя высота подростa лиственницы – 3,0 м, сосны – 1 м. Подрост лиственницы представлен преимущественно крупными экземплярами (3,1 тыс. шт/га). Подрост сосны при естественном лесовосстановлении в распределении по категориям крупности (мелкий и средний) развивается относительно одинаково.

На всех исследуемых участках в Алданском лесничестве Республики Саха (Якутия)

Таблица 1. Характеристика естественного лесовосстановления на вырубках пробных площадей ПП-4 (квартал 75, выдел 9) и ПП-6 (квартал 154, выдел 6) в Алданском лесничестве Республики Саха (Якутия)

Table 1. Characteristics of natural reforestation in the cuttings of trial areas PP-4 (quarter 75, plot 9) and PP-6 (quarter 154, plot 6) in the Aldan forestry of the Republic of Sakha (Yakutia)

П/П (год рубки) / Year of logging	Порода Breed	Состав, % / Composition, %		Встречаемость, % / Occurrence, %	Количество подростa Number of undergrowth	Распределение по состоянию, шт/га Distribution by condition, pcs/ha			Распределение по категориям крупности, шт/га Distribution by size category, units/ha								
		Жизнеспособный / Viable	Сомнительный Questionable			Нежизнеспособный Not viable	Жизнеспособный Viable			Сомнительный Questionable			Нежизнеспособный Not viable				
							Мелкий, менее 0,5 м Shallow, less than 0.5 m	Средний 0,6-1,5 м Average 0.6-1.5 m	Крупный, свыше 1,5 м Large, over 1.5 m	Мелкий, менее 0,5 м Shallow, less than 0.5 m	Средний 0,6-1,5 м Average 0.6-1.5 m	Крупный, свыше 1,5 м Large, over 1.5 m	Мелкий, менее 0,5 м Shallow, less than 0.5 m	Средний 0,6-1,5 м Average 0.6-1.5 m	Крупный, свыше 1,5 м Large, over 1.5 m		
ПП-4 (2022)	Ель / <i>Picea</i>	28	44	4500	3500	500	500	2700	400	400	300	200	0	100	200	200	
	Сосна / <i>Pinus</i>	60	56	9700	8000	1200	500	7100	700	200	500	400	300	300	200	0	
	Лиственница <i>Larix</i>	12	28	2000	2000	0	0	300	1200	500	0	0	0	0	0	0	
	Итого / Total	100	–	16200	13500	1700	1000	10100	2300	1100	800	600	300	400	400	200	
ПП-6 (2019)	Ель / <i>Picea</i>	14	36	2000	1500	400	100	800	600	100	0	400	0	0	100	0	
	Береза / <i>Betula</i>	51	84	7400	7400	0	0	3100	3300	1000	0	0	0	0	0	0	
	Сосна / <i>Pinus</i>	22	36	3100	2400	700	0	2000	200	200	200	400	100	0	0	0	
	Ива / <i>Salix</i>	9	35	1300	1300	0	0	700	200	400	0	0	0	0	0	0	
	Лиственница <i>Larix</i>	4	8	600	600	0	0	0	400	200	0	0	0	0	0	0	
Итого / Total	100	–	14400	13200	1100	100	6600	4700	1900	1000	1400	400	400	500	200		



Рис. 3. Молодняк, сформированный после сплошной вырубке 2014 г. 17,4 тыс. шт/га, состав – 4БЗЛ2Е1Ив, квартал 153, выдел 16, Алданское лесничество Республики Саха (Якутия)

Fig. 3. Young trees formed after continuous cutting in 2014. 17.4 thousand units/ha, composition 4B3L2E1Iv, block 153, allocation 16. Aldan forestry of the Republic of Sakha (Yakutia)

сформировался живой напочвенный покров, появился кустарниковый ярус.

Таким образом, на вырубках формируется полноценный смешанный молодняк, и его необходимо отнести к землям, на которых расположены леса.

При проведении анализа высотной структуры жизнеспособного подроста на исследуемых вырубках в Республике Саха (Якутия), за исключением ПП-11 и ПП-12, преобладает подрост мелкой крупности (рис. 4).

Исследуя возобновляющий подрост на пробных площадях вырубок, видим, что по составу подрост является неоднородным (рис. 5).

На всех объектах, кроме пробных площадей ПП-6 и ПП-5, доминируют хвойные породы (сосна и лиственница). Доминирование сосны и лиственницы связано с тем, что данные породы менее всего требовательны к условиям местопроизрастания. Подрост сосны имеет среднюю высотную структуру, лиственница восстанавливается неоднородно.

Таблица 2. Характеристика естественного лесовосстановления на участке ПП-5 в Алданском лесничестве, квартал 153, выдел 16

Table 2. Characteristics of natural reforestation at the PP-5 site in Aldan forestry district, block 153, allocation 16

Порода Breed	Распределение жизнеспособного подроста по категориям крупности, шт/га Distribution of viable undergrowth by size categories, pcs / ha				Состав, % Composition, %	Возраст, лет Age, years
	мелкий, менее 0,5 м shallow, less than 0.5 m	средний 0,6-1,5 м average 0.6-1.5 m	крупный, свыше 1,5 м large, over 1.5 m	Итого total		
Береза / Betula	100	2880	5180	8160	47	9
Ива / Salix	40	300	1720	2060	11	8
Осина / Populus	–	240	100	340	2	8
Лиственница / Larix	40	860	3080	3980	23	7
Ель / Picea	60	20	2320	2400	14	6
Сосна / Pinus	240	240	40	520	3	6
Итого / Total	480	4540	12440	17460	100	–



Рис. 4. Распределение жизнеспособного подроста по категориям крупности на исследуемых пробных площадях

Fig. 4. Distribution of viable undergrowth in cuttings by size category in the sample areas

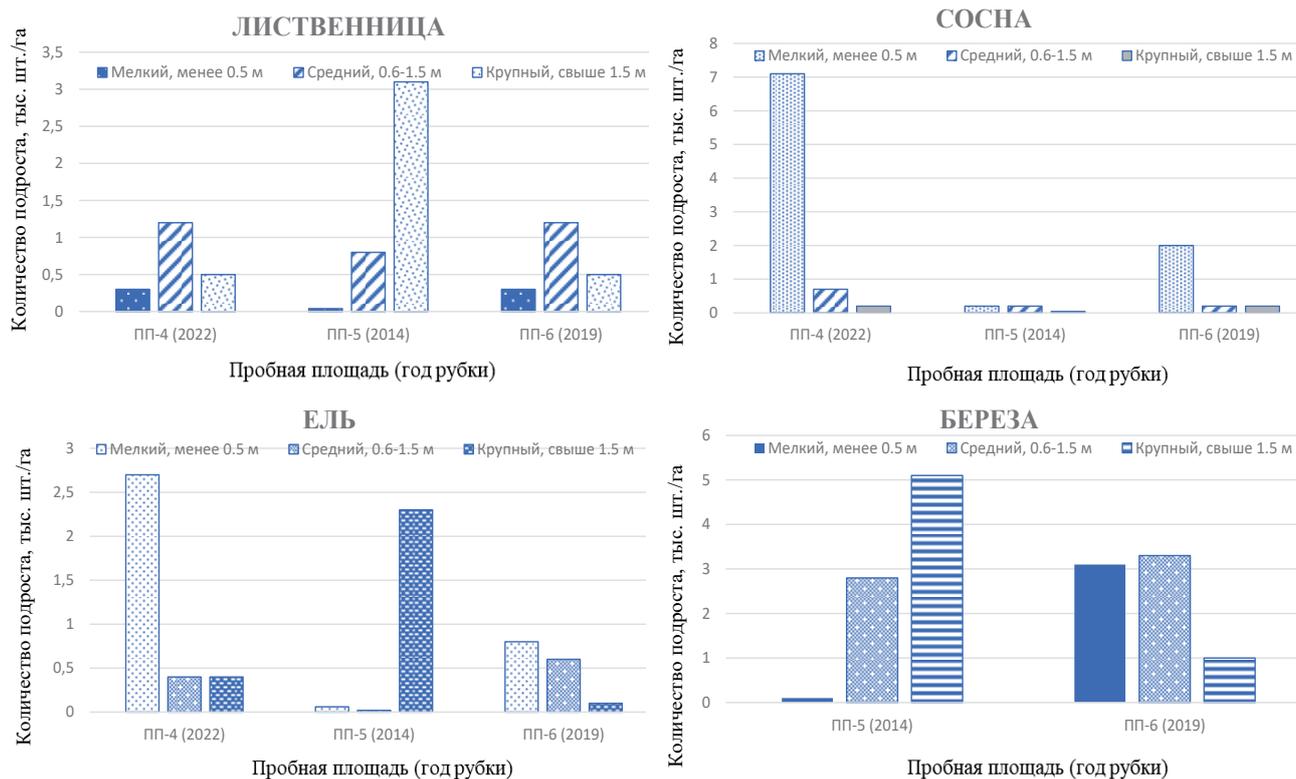


Рис. 5. Распределение жизнеспособного подроста на вырубках по категории крупности на пробных площадях

Fig. 5. Distribution of viable undergrowth in cuttings by size category in the sample areas

Выводы

В ходе исследований выполнена оценка естественного возобновления подроста после сплошной рубки в Алданском лесничестве Республики Саха (Якутия). В результате проведенных исследований выявлено, что на 10-летней сплошной вырубке (ПП-5) лиственница и береза восстанавливаются удовлетворительно. В высотной структуре преобладает жизнеспособный

подрост крупной категории (73%). На лесном участке ПП-4 (вырубка 2022 г.) доминирует подрост сосны и ели. На участке ПП-6 (вырубка 2019 г.) в составе подроста превалирует береза – 7,4 тыс. шт/га. В высотной структуре подроста доминируют мелкой крупности экземпляры – 6,6 шт/га. В целом на сплошных вырубках формируется подрост, который способен сформировать древостой исходного типа леса.

Список использованных источников

1. Тимофеев П.А. Современное состояние лесов окрестностей с. Хаптагай Мегино-Кангаласского улуса / П.А. Тимофеев, И.И. Чикидов, Н.И. Григорьев // Наука и образование. 1999. № 1(13). С. 65-71.
2. Мельниченко Т.Н. Криоморфоскульптура Енисейского Севера. География и геоэкология Красноярского края. Красноярск: 2012. 115 с.
3. Бойченко А.М. Произрастание сосны обыкновенной на севере ареала в Якутии // Эколого-биологические основы лесоводственных мер в Якутии: Сборник науч. тр. / Якутск. ЯФ СО РАН СССР. 1987. С. 75-990.
4. Щербаков И.П. Кедровые леса Якутии и основные направления их изучения / И.П. Щербаков, П.А. Тимофеев // Проблемы кедра: региональные программы / отв. ред. В.Н. Воробьев. Сборник. Томск: [б. и.]. 1990. Тип. ИОА СО РАН. Вып. 3. С. 49-54.
5. Никитина Н.В. Состав и структура кедровых лесов Олекминского улуса / Н.В. Никитина, А.П. Исаев // Флора и растительность Якутии: Сборник науч. ст. / РАН Сиб. отд-ние, Ин-т биол. пробл. криолитозоны; Рус. бот. о-во,

References

1. Timofeev P.A., Chikidov I.I., Grigoriev N.I. The current state of forests in the vicinity of the village of Khaptagai in Megino-Kangalassky ulus // Science and Education. 1999. No. 1(13). P. 65-71.
2. Melnichenko T.N. Cryomorphosculpture of the Yenisei North. Geography and geoecology of the Krasnoyarsk Territory. Krasnoyarsk. 2012. 115 p.
3. Boychenko A.M. The growth of Scots pine in the north of its range in Yakutia // Ecological and biological foundations of forestry measures in Yakutia / YAF SB RAS USSR. Yakutsk. 1987. P. 75-990.
4. Shcherbakov I.P., Timofeev P.A. Cedar forests of Yakutia and the main directions of their study // Cedar problems: regional programs / ed. by V.N. Vorobyov – Tomsk: [B. I.], 1990. Issue 3. P. 49-54.
5. Nikitina N.V., Isaev A.P. Composition and structure of cedar forests of the Olekminsky ulus // Flora and vegetation of Yakutia: collection of scientific articles / RAS Siberian Branch, Institute of Biology. probl. cryolithozones; Russian bot. island, Yakut. department; [edited by Candidate

Якут. отд-ние; [редкол.б.н. П.А. Тимофеев (отв. ред.) и др.]. М.: [б. и.]. 1999. С. 82-85.

6. Габышева Л.П. Лесовосстановление на гарях Юго-Западной Якутии (на примере Олекминского района) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 5-3(85). С. 335-340. EDN: ILNVYL

7. Габышева Л.П. Рост лиственных культур в условиях криолитозоны Якутии / Л.П. Габышева, А.П. Исаев // Сибирский лесной журнал. 2024. № 1. С. 21-30. DOI: 10.15372/SJFS20240103. EDN: GYWTJJ

8. Иванов А.А. Отдельные аспекты лесовосстановления в Республике Саха (Якутия) / А.А. Иванов, П.Н. Алексеев // Устойчивое развитие сельского хозяйства и агросистем будущего в Арктике: Сборник научных статей по материалам Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием, Якутск, 30 ноября 2023 года. Якутск: «Знание-М», 2023. С. 657-662. EDN: LTRNUD

9. Шемякина А.В. Состояние естественного лесовосстановления после проведения сплошных рубок в Якутском лесничестве Республики Саха (Якутия) / А.В. Шемякина, Д.А. Голубев, К.Е. Гула, Н.А. Каюмов // Интенсификация использования и воспроизводства лесов Сибири и Дальнего Востока: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Хабаровск, 10-11 октября 2024 года. Хабаровск: Федеральное бюджетное учреждение «Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», 2024. С. 301-305. EDN: DGWEGM

10. Оценка лесовосстановления в Республике Саха (Якутия) / О.Х. Блашкевич, Н.Е. Горохова, А.А. Назаров, И.С. Должников, О.И. Григорьева, И.В. Григорьев // Вестник АГАТУ. 2024. № 4(16). С. 67-137. EDN: CIBGJI

11. Григорьева О.И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4(40). С. 25-29. EDN: YSBYOT

12. Каюмов Н.А. Оценка естественного восстановления лесной растительности на отработанных карьерах Алданского лесничества / Н.А. Каюмов, Д.А. Голубев, К.Е. Гула, А.В. Шемякина // Технические и технологические системы: материалы XV Международной научной конференции, Краснодар, 20-22 ноября 2024 года. Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Дом – Юг», 2024. С. 326-330. EDN: KWYEFG

13. Григорьев И.В. Особенности эксплуатации лесных машин в сильные морозы // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилев, 25-26 октября 2018 г. / гл. ред. И.С. Сазонов. Могилев: Изд-во Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2018. С. 102.

14. Григорьев И.В. Перспективы модульных систем машин для лесозаготовительного производства в Якутии / И.В. Григорьев, М.Ф. Григорьев, Д.И. Степанов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 9(35). С. 74-77.

15. М.Е. Рудов. Экологические и лесоводственные аспекты работы лесных машин в лесах криолитозоны / М.Е. Рудов, О.А. Куницкая, М.Ф. Григорьев и др. // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 14-17.

16. С.Е. Рудов. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом / С.Е. Рудов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев и др. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 1(367). С. 106-119.

of Biological Sciences P.A. Timofeev (ed.) and others]. Moscow: [B.I.]. 1999. P. 82-85.

6. Gabysheva L.P. Reforestation in the burning areas of Southwestern Yakutia (on the example of the Olekminsky district) // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018. Vol. 20, No. 5-3(85). P. 335-340. EDN: ILNVYL

7. Gabysheva L.P., Isaev A.P. The growth of larch crops in the cryolithozone of Yakutia // Siberian Forest Journal. 2024. No 1. pp. 21-30. DOI: 10.15372/SJFS20240103. EDN: GYWTJJ

8. Ivanov A.A., Alekseev P.N. Selected aspects of reforestation in the Republic of Sakha (Yakutia) // Sustainable development of agriculture and agricultural systems of the future in the Arctic: A collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Student Scientific and Practical Conference with international participation, Yakutsk, November 30, 2023. Yakutsk: Znanie-M Publishing House, 2023. P. 657-662. EDN: LTRNUD

9. The state of natural reforestation after continuous logging in the Yakut forestry of the Republic of Sakha (Yakutia) / A.V. Shemyakina, D.A. Golubev, K.E. Gula, N.A. Kayumov // Intensification of the use and reproduction of forests in Siberia and the Far East: proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation, Khabarovsk, October 10-11, 2024. Khabarovsk: Federal Budgetary Institution "Far Eastern Scientific Research Institute of Forestry", 2024. P. 301-305. EDN: DGWEGM

10. Assessment of reforestation in the Republic of Sakha (Yakutia) / O.H. Blashkevich, N.E. Gorokhova, A.A. Nazarov, I.S. Dolzhnikov, O.I. Grigorieva, I.V. Grigoriev // Bulletin of AGATU. 2024. No. 4(16). P. 67-137. EDN: CIBGJI

11. Grigorieva O.I. Features of natural reforestation in cryolithozone conditions // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2018. Vol. 6, No. 4(40). P. 25-29. EDN: YSBYOT

12. Assessment of the natural restoration of forest vegetation in the spent quarries of the Aldan forestry / N.A. Kayumov, D.A. Golubev, K.E. Gula, A.V. Shemyakina // Technical and technological systems: proceedings of the XV International Scientific Conference, Krasnodar, November 20-22, 2024. Krasnodar: Limited Liability Company Publishing House – Yug, 2024. P. 326-330. EDN: KWYEFG

13. Grigoriev I.V. Features of operation of forest machinery in severe frosts // New materials, equipment and technologies in industry: proceedings of the international scientific and technical conference of young scientists, Mogilev, October 25-26, 2018 / Chief editor I.S. Sazonov. Mogilev: Publishing House of the Inter-state Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", 2018. 102 p.

14. Grigoriev I.V., Grigoriev M.F., Stepanov D.I. Prospects of modular systems of machines for logging production in Yakutia // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2017. Vol. 5, No. 9(35). P. 74-77.

15. Ecological and forestry aspects of forest machinery operation in cryolithozone forests / M.E. Rudova, O.A. Kunitskaya, M.F. Grigoriev, D.I. Stepanova, A.I. Grigorieva // Actual problems of the forest complex. 2020. No. 57. P. 14-17.

16. Features of the contact interaction of the skidding system with frozen soil / S.E. Trudov V.Ya. Shapiro, I.V. Grigoriev, O.A. Kunitskaya, O.I. Grigorieva // News of higher educational institutions. Forest magazine. 2019. No. 1(367). P. 106-119.

17. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads / S.E. Rudov, I.V. Grigorev, O.A. Kunitskaya, V.P. Druzyanova,

17. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads / S.E. Rudov, I.V. Grigorev, O.A. Kunitskaya, V.P. Druzyanova, A.S. Pekhutov, A.P. Ivanov, A.K. Ivanov, M.K. Okhlopko, V.Yu. Pankov R.G. Borovikov // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2019. V. 25. № S2. P. 191-205.

18. Григорьева О.И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2018. V. 6. № 4 (40). P. 25-29.

19. Николаева А.П. Оценка устойчивости ландшафтов Якутии к техногенным воздействиям // *Вестник Северо-Восточного Научного Центра ДВО РАН*. 2008. № 3. С. 60-66.

20. Поздняков Л.К. Лес на вечной мерзлоте. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1983. 96 с.

21. Федоров А.Н. Роль вырубок в развитии мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии // *Региональные и инженерные геокриологические исследования / Институт мерзлотоведения СО АН СССР*. Якутск. 1985. С. 111-117.

22. Исаев А.П. Лиственный лес среднетаёжной подзоны Якутии и лесовозобновление на вырубках: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 1993. 21 с.

23. Побединский А.В. Изучение лесовосстановительных процессов. Методические указания. Красноярск: Кн. изд-во. 1962. 63 с.

24. Побединский А.В. Рубки главного пользования. 3-е изд., перераб. М.: Лесн. пром-сть. 1980. 192 с.

25. Савченкова В.А. Комплексная оценка лесовозобновления на вырубках и проектирование лесовосстановительных работ: учеб. пособие. М.: Издательский дом Академии Естествознания. 2014. 172 с.

26. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // *Лесоведение*. 1989. № 4. С. 51-57.

27. Лесохозяйственный регламент лесничеств Республики Саха (Якутия). [Электронный ресурс]. URL: hcvf.ru. (дата обращения: 23.01.2025)

A.S. Pekhutov, A.P. Ivanov, A.K. Ivanov, M.K. Okhlopko, V.Yu. Pankov R.G. Borovikov // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2019. V. 25. № S2. P. 191-205.

18. Grigorieva O.I. Features of natural reforestation in cryolithozone conditions // *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2018. V. 6. No. 4(40). P. 25-29.

19. Nikolaeva A.P. Assessment of the sustainability of Yakutia landscapes to man-made impacts // *Bulletin of the Northeastern Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2008, No. 3, P. 60-66.

20. Pozdnyakov L.K. Forest on permafrost. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch. 1983. 96 p.

21. Fedorov A.N. The role of logging in the development of permafrost landscapes in Central Yakutia // *Regional and engineering geocryological research / Institute of Permafrost Science SB Academy of Sciences of the USSR*. Yakutsk. 1985. pp. 111-117.

22. Isaev A.P. Larch forests of the Middle Taiga subzone of Yakutia and reforestation in deforestation: abstract. Dissertation of the Candidate of Agricultural Sciences. Krasnoyarsk, 1993. 21 p.

23. Pobedinsky A.V. Study of reforestation processes. Methodological guidelines. Krasnoyarsk: Publishing house. 1962. 63 p.

24. Pobedinsky A.V. Cabins of main use. 3rd ed., revised by M.: Lesn. prom-st. 1980. 192 p.

25. Savchenkova V.A. Comprehensive assessment of reforestation in deforestation and design of reforestation works: textbook. the manual. Moscow: Publishing House of the Academy of Natural Sciences. 2014. 172 p.

26. Alekseev V.A. Diagnostics of the vital condition of trees and stands // *Forestry science*. 1989. No. 4. P. 51-57.

27. Forestry regulations of the forestry departments of the Republic of Sakha (Yakutia). [electronic resource]. URL: hcvf.ru. (date of access: 01.23.2025).

Об авторах

Анна Викторовна Шемякина, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник; orcid: 0009-0001-9776-3842; Author ID: 751035; SPIN-код: 1993-4077; Ashem777@mail.ru

Дмитрий Андреевич Голубев, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, доцент; ORCID: 0000-0001-9416-2913; Scopus AuthorID56039568200; РИНЦ Author ID792537; SPIN-код 1928-8070.

Константин Евгеньевич Гула, канд. хим. наук, старший научный сотрудник; Scopus AuthorID56491172400; РИНЦ Author ID617075; SPIN-код 5496-1228

Никита Алексеевич Каюмов, техник; Author ID: 1265829, SPIN-код: 1119-0977

About the authors

Anna V. Shemyakina, candidate of biological sciences, leading researcher, orcid: 0009-0001-9776-3842; Author ID: 751035; SPIN-код: 1993-4077; Ashem777@mail.ru

Dmitry A. Golubev, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Associate Professor ORCID: 0000-0001-9416-2913; Scopus Author ID56039568200; RSCI Author ID792537; SPIN code 1928-8070;

Konstantin Ev. Gula, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher Scopus Author ID56491172400; RSCI Author ID617075; SPIN code 5496-1228

Nikita A. Kayumov, technician, AuthorID: 1265829, SPIN-код: 1119-0977

Критерии авторства / Criteria of authorship

Шемякина А.В., Голубев Д.А., Гула К.Е., Каюмов Н.А. выполнили теоретические и аналитические исследования, на основании которых провели обобщение. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов

Все авторы участвовали в полевых работах. Статья написана А.В. Шемякиной

The contribution of the authors

All the authors participated in the field work. The article was written by A.V. Shemyakina.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 31.01.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review 26.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 26.05.2025

Shemyakina A.V., Golubev D.A., Gula K.E., Kayumov N.A. carried out theoretical and analytical studies, on the basis of which a generalization was carried out. They have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-135-141>

УДК 630*.90:343.3/.7:347.426.62(571.62/571.63)



ОЦЕНКА НЕЛЕГАЛЬНОГО ОБОРОТА ЛЕСОПРОДУКЦИИ НА ЮГЕ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

А.М. Орлов^{1,2✉}, О.С. Громыко¹, А.П. Ковалев¹, Ю.А. Грищенко¹

¹ Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства; 680020, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Волочаевская, 71, Россия

² Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВЭП ДВО РАН); 680000, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Дикопольцева, 56, Россия

Аннотация. Нелегальное лесопользование приводит к негативным последствиям в сфере экологии, лесной экономики и государственного лесопользования, повышает коррупционные риски, что является свидетельством актуальности представленных исследований. Основной целью исследований является оценка уровня нелегального оборота лесопродукции на юге Дальнего Востока на примере Хабаровского и Приморского краев на основе авторской методики расчета баланса объемов заготовки и потребления в эквиваленте ликвидной древесины. Применялись общепринятые методы сравнительного анализа, оценки и графоаналитический метод. Результаты исследований показали, что начиная с 2019 г. происходит существенное снижение общих объемов заготовки и экспорта древесины. В 2023 г. зафиксированы самые низкие показатели за последнее десятилетие. Уровень незаконного оборота лесопродукции в отдельные годы достигал 800 тыс. м³. В дальнейшем, начиная с 2019 г., незаконные рубки древесины в значительном объеме зафиксированы не были. Связано это с большим количеством принимаемых в Российской Федерации законодательных актов и профилактических мер. В частности, наиболее важные из них – введение электронно-сопроводительных документов на вывозку древесины и составление отчета о балансе прихода-расхода лесопродукции в местах складирования, что оказало положительное влияние на снижение уровня незаконных рубок. Особенно это заметно на российском Дальнем Востоке.

Ключевые слова: незаконные рубки, потребление древесины, объемы экспорта, Дальний Восток, ликвидная древесина

Формат цитирования: Орлов А.М., Громыко О.С., Ковалев А.П., Грищенко Ю.А. Оценка нелегального оборота лесопродукции на юге Дальнего Востока // Природообустройство. 2025. № 3. С. 135-141. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-135-141>

Scientific article

ASSESSMENT OF ILLEGAL TURNOVER OF TIMBER PRODUCTS IN THE SOUTH OF THE FAR EAST

A.M. Orlov^{1,2✉}, O.S. Gromyko¹, A.P. Kovalev¹, Yu.A. Grishchenova¹

¹ Far East Forestry Research Institute, 680020 Khabarovsk Territory, Khabarovsk, Volochaevskaya str., 71, Russia

² Institute of Water and Environmental Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IVEP FEB RAS), 680000, Khabarovsk Territory, Khabarovsk, 56 Dikopoltseva str., Russia

Abstract. Illegal forest use leads to negative consequences in the field of ecology, forest economics and state forest management, and increases corruption risks, which is evidence of the relevance of research. Their main goal is to assess the level of illegal trade in timber products in the south of the Far East, using the example of the Khabarovsk and Primorsky territories, which was carried out on the basis of the author's methodology for calculating the balance of harvesting and consumption volumes in the equivalent of liquid wood. Conventional methods were also used – comparative analysis, evaluation and graphic-analytical. First of all, the research results showed that starting from 2019, there has been a significant decrease in the total volumes of procurement and exports. 2023 will see the lowest rates in the last decade. The level of illegal turnover of forest products, in some years, reached 800 thousand m³, but subsequently, starting from 2019, illegal logging of forest plantations was not recorded in a significant volume. This is due to the large number of legislative measures taken in the Russian Federation. In particular, the most important ones are the introduction of electronic accompanying documents for the removal of wood and the preparation of a report on the balance of income and consumption of forest products at storage sites,

which make it possible to note their positive impact on reducing the level of illegal logging. This is especially noticeable in the Russian Far East.

Keywords: illegal logging, wood consumption, export volumes, the Far East, liquid wood

Format of citation: Orlov A.M., Gromyko O.S., Kovalev A.P., Grishchenova Yu.A. Assessment of illegal turnover of timber products in the south of the Far East // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 135-141. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-135-141>

Введение. Проблема нелегального оборота лесоматериалов постоянно находится в сфере внимания многих стран, в том числе развитых. Например, в США в «Закон Лейси» внесены поправки, запрещающие реализацию из лесов продукции, полученной незаконным путем; в Европейском союзе принят Регламент ЕС № 995/2010 «Об обязанностях операторов, размещающих лесоматериалы и продукцию из древесины на рынке»; в Австралии действует закон «О запрете незаконной рубки леса» с целью поддержки законной реализации лесопродукции [1-3]. Многие зарубежные исследователи в своих публикациях поднимают вопросы, связанные с незаконным оборотом лесопродукции, считая их приоритетными, вызывающими серьезную озабоченность в международном сообществе, имеющими негативные экологические последствия, в том числе сокращающими запасы углерода в лесах и даже влияющими на политическую ситуацию некоторых стран [4-10]. В мире продолжает нарастать активность по противодействию незаконным рубкам. Сегодня можно говорить о введении международного «режима законности» в лесном секторе [11]. Исследователи отмечают, что открытость всей цепочки передвижения лесопродукции становится все более важной темой, поскольку правительства, производители и потребители стремятся иметь подробную информацию о происхождении продуктов, которые они покупают [12].

В Российской Федерации нелегальное использование лесов также представляет серьезную угрозу экономическим и экологическим интересам страны, незаконные рубки ведут к обезлесению территорий и их деградации. Следует отметить, что значительная часть нелегальной древесины заготавливается на легальных лесах путем рубок сверхразрешенных объемов. Наличие преступности в лесной сфере обусловлено сверхдоходностью противозаконных внешнеэкономических операций [13-17].

Проблемы незаконного экспорта особенно характерны для приграничных регионов. Регулярно в средствах массовой информации появляются публикации о предотвращении либо раскрытии постфактум таких преступлений, что свидетельствует о самой фактической возможности

контрабанды. Однако оценка объемов этих рубок различными специалистами и организациями сильно различается.

Что касается официальных источников, то по данным Рослесхоза, объем незаконных рубок за прошедшие 5 лет снизился на 61% и имеет дальнейшую тенденцию снижения [18]. Тем не менее проблема незаконного оборота древесины как в нашей стране, так и в мире, по-прежнему является актуальной и требует постоянного внимания.

Цель исследований: оценка уровня нелегального оборота лесопродукции на юге Дальнего Востока на примере Хабаровского и Приморского краев на основе авторской методики расчета баланса объемов заготовки и потребления в эквиваленте ликвидной древесины.

Материалы и методы исследований. В исследованиях применялись общепринятые методы сравнительного анализа и оценки [19], а также графоаналитический метод на основе статистических данных [20]. Итоговые значения отражены в таблицах. Исходными данными исследований являлись материалы государственного лесного реестра (ГЛР), федеральная и отраслевая статистическая отчетность, таможенная статистика (итоговые расчетные данные по объему экспорта пересчитаны через переводные коэффициенты в ликвидную древесину, данные таможенной статистики взяты из формы 1-ТС «Важнейшие товары» [21]), Единая государственная автоматизированная информационная система учета древесины и сделок с ней (ЛесЕГАИС), научно-методические публикации, собственные исследования авторов. Оценка возможных объемов незаконных рубок на юге Дальнего Востока проводилась на основе авторской методики расчета баланса объемов заготовки и потребления в эквиваленте ликвидной древесины на примере Хабаровского и Приморского краев [22].

Расчетное значение баланса объемов заготовки и потребления древесины в ликвидном эквиваленте нами определено начиная с 2013 г., который выбран в качестве точки отсчета как год принятия Федерального закона от 28 декабря 2013 г. № 415-ФЗ [23]), по 2021 г., отдельно для Хабаровского и Приморского краев. Затем эти данные суммируются, чтобы

избежать погрешностей, связанных с тем, что древесина, заготовленная в Хабаровском крае, может быть отправлена на экспорт через таможенные посты в Приморском крае, и наоборот. Таким образом, в наших исследованиях эти два края рассматриваются как региональная лесопромышленная агломерация южной части Дальнего Востока.

В исследованиях не учтены данные за 2022 и 2023 гг., так как с января 2022 г. по настоящее время предоставление к публикации сведений о внешней торговле РФ временно приостановлено. Кроме того, возможно, следовало бы учесть древесину, заготовленную в Амурской области и отгруженную через пограничные переходы Хабаровского или Приморского краев, но этих данных нет. Однако если проанализировать сведения об экспорте лесопродукции по Дальневосточной железной дороге, сопоставив их с общим объемом экспорта через погранпереходы Дальневосточного таможенного управления (ДВТУ) за 2018-2020 гг., то можно констатировать, что такой возможный «переток» происходил по коду ТН ВЭД 4403 не в очень существенных объемах – не более 1%. Что касается объема внешнего ввоза-вывоза древесины других субъектов Дальневосточного федерального округа (ДФО), то он весьма небольшой. Связано это с тем, что, например, в Сахалинской области, в Республике Саха (Якутия), Еврейской АО, в субъектах Восточной Сибири – свои рынки сбыта, своя логистика движения лесопродукции, маршруты которой не проходят через Хабаровский и Приморский края. Такие субъекты, как Чукотский АО, Магаданская область, Камчатский край, производят весьма небольшой объем лесопродукции и не вывозят ее за пределы своего субъекта. Следовательно, можно сделать вывод о том, что через Хабаровский и Приморский края экспортируются весьма незначительные объемы древесины, завезенной из других субъектов ДФО.

По нашим оценкам, доля прочих субъектов РФ в экспорте через ДВТУ также невелика вследствие нерентабельной логистики. Но после осложнения торгово-экономических отношений со странами Европейского союза объемы лесопродукции Европейской части России, направленные в Азиатско-Тихоокеанский регион, возможно, будут возрастать, и в расчетах их нужно будет учитывать, но за исследуемый период 2013-2021 гг. эта величина пока незначительна.

Результаты и их обсуждение. Данные о заготовке ликвидной древесины в Хабаровском и Приморском краях, как в региональной агломерации южной части Дальнего Востока, за период

с 2013 по 2023 гг. приведены на основании сведений из отраслевой отчетности [24] (табл. 1).

С 2013 г. отмечается постоянный рост объемов заготовки древесины в обоих субъектах до 2018 г., в том числе в твердолиственном хозяйстве. Однако в дальнейшем происходит существенное снижение этого значения при умеренном росте в твердолиственном хозяйстве. В 2023 г. зафиксирован самый низкий показатель заготовки древесины за последнее десятилетие – 8332,8 тыс. м³. Использование расчетной лесосеки в Приморском крае составляет 57,6%, в Хабаровском крае – 14,6%.

Основными причинами спада производства можно считать:

- снижение спроса на лесопродукцию на основных для регионов ДФО рынках в Азиатско-Тихоокеанском регионе (КНР, Ю. Корея и Япония);

- санкционную политику стран производителей оборудования для лесной промышленности, что привело к серьезным проблемам по снабжению запасными частями и обновлению лесозаготовительной и лесоперерабатывающей техники;

- фактический запрет на экспорт необработанных лесоматериалов и сырья для производства фанеры, что привело к затовариванию внутреннего рынка лесопродукции;

- закрытие европейского рынка для европейских и сибирских предприятий ЛПК (следовательно, произошла их переориентация на рынки Азиатско-Тихоокеанского региона, и как следствие – повышение конкуренции среди поставщиков лесопродукции);

- истощение лесосырьевых баз предприятий ЛПК, увеличение среднего расстояния вывозки древесины, связанной с необходимостью разрабатывать лесосеки на более отдаленных территориях;

- ограничение количества железнодорожных и автомобильных пунктов пропуска для экспорта лесопродукции.

Для оценки возможных объемов незаконного оборота древесины сопоставлялись данные величины заготовки ликвидной древесины с объемами потребления (экспорт и внутреннее потребление), эквивалентного ликвидной древесине за период 2013-2021 гг. в Хабаровском и Приморском краях (табл. 2). Расчет объемов внутреннего потребления древесины в Хабаровском и Приморском краях произведен на основании данных о численности населения и душевого потребления лесопродукции по ранее опубликованной методике [25].

Таблица 1. Объемы заготовки древесины региональной агломерации южной части Дальнего Востока за период 2013-2023 годов, тыс. м³Table 1. Volumes of timber harvesting in the regional agglomeration of the southern part of the Far East for the period 2013-2023, thousand m³

Год Year	Объем ликвидной древесины по хозяйствам Volume of marketable timber by farms			Итого ликвидной древесины Total marketable timber	
	Хвойное Conifer	Твердоли- ственное Hardwood	Мягколи- ственное Soft-leaved	по агломерации by agglomeration	в т.ч. на арендуемых лесных участках including on leased forest plots
Допустимый объем изъятия древесины (расчетная лесосека на 01.01.2024) Permissible volume of timber withdrawal (estimated logging area per 01.01.2024)					
Приморский край Primorsk territory	3658,7	1704,4	1072,0	6435,1	4823,0
Хабаровский край Khabarovsk territory	25543,8	867,4	5228,4	31639,6	10732,0
Агломерация Agglomeration	29202,5	2571,8	6300,4	38074,7	15555,0
Объем заготовки древесины / Volume of timber harvesting					
2013	8048,6	818,0	784,2	9650,8	8590,6
2014	9099,2	957,1	828,9	10885,3	9740,8
2015	9636,1	961,5	882,9	11480,5	10299,8
2016	9763,0	1087,8	1095,8	11946,7	10709,2
2017	10004,7	1157,9	1005,3	12167,9	11240,9
2018	10609,4	1266,6	941,1	12823,0	11830,5
2019	9624,6	1341,3	781,9	11747,8	10580,4
2020	8662,9	1285,1	1046,6	10994,6	10161,4
2021	8096,0	1326,2	960,4	10382,6	9677,3
2022	7034,2	1270,2	736,7	9041,1	8393,9
2023	6371,4	1270,5	690,9	8332,8	7857,7

Таблица 2. Сравнение объемов заготовки и потребления ликвидной древесины региональной агломерации южной части Дальнего Востока за 2013-2021 годы, тыс. м³Table 2. Comparison of the volumes of harvesting and consumption of marketable timber in the regional agglomeration of the southern part of the Far East for 2013-2021, thousand m³

Наименование Name	Год / Year								
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Объем заготовки древесины Volume of timber harvesting	9651	10885	11481	11947	12168	12823	11748	10994	10382
Объем экспорта лесоматериалов Volume of timber exports	8881	9460	9339	10753	11654	11919	10586	8936	8636
Объем внутреннего потребления (оценочное значение) Volume of domestic consumption (estimated)	1414	1410	1407	1403	1400	1394	1386	1381	1367
Разность между объемами заготовки и экспорта (объем незаконных рубок) Difference between harvesting and export volumes (volume of illegal logging)	-644	15	735	-209	-886	-490	-224	677	379
Процентное соотношение величины разности по отношению к заготовке, % Percentage ratio of the difference value in relation to the logging, %	-6,70	0,14	6,40	-1,75	-7,28	-3,82	-1,91	6,16	3,65

Примечание. В таблице не учтены баланс ввоза-вывоза лесопродукции из других субъектов и некоторые позиции ТНВЭД, объемы которых незначительны. Объем внутреннего потребления рассчитан исходя из численности населения и среднедушевого потребления древесины

Note. The table does not take into account the balance of import-export of timber products from other subjects and some items of the Commodity Nomenclature of Foreign Economic Activity, the volumes of which are insignificant. The volume of domestic consumption is calculated based on the population and the average per capita consumption of wood.

Полученные данные показали, что в 2013 г. объем потребления (экспорт и внутреннее потребление) был больше, чем объем фактической заготовки древесины, на 6,67% (разница отрицательная), следовательно, возможный объем незаконных рубок оценивался приблизительно в 640 тыс. м³. В 2014-2015 гг. заготовка превысила потребление. Явно прослеживается влияние Федерального закона (№ 415-ФЗ) на снижение уровня незаконного оборота лесопродукции. Однако в 2016 г. этот показатель вновь стал отрицательным – 1,75%. В 2017 г. отмечено увеличение отрицательной разницы до 7,28%, что даже больше, чем в 2013 г. (год, предшествующий началу действия указанного выше Федерального закона), и вновь уменьшение в 2018 и 2019 гг. до 1,91%.0

Среднегодовое значение незаконных рубок за период 2013-2019 гг. оценивается приблизительно в 250 тыс. м³. В 2020-2021 гг. объем заготовок превысил объем потребления, что свидетельствует о наличии неотгруженной древесины на складах лесозаготовителей и позволяет сделать вывод о почти полном отсутствии незаконной деятельности.

Выводы

Результаты исследований показали, что в региональной лесопромышленной агломерации юга Дальнего Востока начиная с 2019 г. последовательно снижаются объемы заготовки древесины, и в 2023 г. зафиксирован самый низкий показатель за последнее десятилетие – 8332,8 тыс. м³. Процент использования расчетной лесосеки также снижается: в Приморском крае – 57,6%, в Хабаровском крае – 14,6%. При этом само значение расчетной лесосеки на протяжении последних 10 лет изменилось незначительно. Следовательно, истощение лесных ресурсов почти

не связано с расчетами лесоустроительных предприятий, и возникает необходимость изменения порядка определения расчетной лесосеки по хозяйствам, лесничествам и субъектам.

До 2020 г. объемы потребления систематически превышали объемы заготовок. В среднем ежегодное значение незаконных рубок за период 2013-2019 гг. оценивается приблизительно в 250 тыс. м³. В 2020-2021 гг. объем заготовок превысил объем потребления.

Можно сделать вывод о наличии неотгруженной древесины на складах лесозаготовителей и отсутствии незаконных рубок древесины в значительном объеме. Это связано с принятием за последние несколько лет большого количества нормативных правовых актов, направленных на декриминализацию лесного комплекса, особенно двух важнейших федеральных законов: от 28 декабря 2013 г. № 415-ФЗ и от 4 февраля 2021 г. № 3-ФЗ. Прежде всего была создана единая государственная информационная система ЛесЕГАИС для обеспечения прослеживаемости древесины от ее заготовки до переработки и реализации. Введение в правовое поле обязательств по формированию электронно-сопроводительного документа (ЭСД) на вывозку древесины максимально затруднило легализацию незаконно срубленной древесины, а следовательно, стало практически невозможно реализовать такую лесопродукцию на экспорт. Появился интерфейс балансовой модели учета в местах складирования древесины (МСД) и на объектах лесной инфраструктуры (ОЛИ). Происходит дальнейшая трансформация нормативной правовой базы, связанной с изменением законодательства в сфере оборота лесопродукции: в частности, усилена административная ответственность за правонарушения в сфере оборота древесины.

Список использованных источников

1. Lacey Act – United States Department of Agriculture Animal and Plant Health Inspection Service. 2008. URL: <https://www.regulations.gov/document/APHIS-2008-0119-0297>.
2. Регламент (ЕС) № 995/2010 Европейского парламента и совета от 20 октября 2010 г. об обязанностях операторов, размещающих лесоматериалы и продукцию из древесины на рынке. URL: https://e-ecolog.ru/docs/UPm4lcntPTKepM7_IgOyq?ysclid=lymcc491zq83557821&utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F.
3. Illegal Logging Prohibition Act. 2012. № . 166. URL: <https://www.legislation.gov.au/C2012A00166/latest/text>.
4. Legal Timber: Verification and Governance in the Forest Sector / D. Brown [end others] // London: Overseas Development Institute. 2008. 331 p. URL: <https://odi.org/en/publications/legal-timber-verification-and-governance-in-the-forest-sector/>.
5. Michael G. Faure. Environmental Crimes (November 2, 2009) / Michael G. Faure // Criminal law and economics, n. Garoupa, ed., Cheltenham, 2009. Pp. 320-345.

References

1. Lacey Act – United States Department of Agriculture Animal and Plant Health Inspection Service. 2008. URL: <https://www.regulations.gov/document/APHIS-2008-0119-0297>.
2. Regulation (EU) No 995/2010 of the European Parliament and of the Council of 20 October 2010 on the obligations of operators placing timber and wood products on the market. URL: https://eecolog.ru/docs/UPm4lcntPTKepM7_IgOyq?ysclid=lymcc491zq83557821&utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F.
3. Illegal Logging Prohibition Act. 2012. № . 166. URL: <https://www.legislation.gov.au/C2012A00166/latest/text>.
4. Legal Timber: Verification and Governance in the Forest Sector / D. Brown [end others] // London: Overseas Development Institute. 2008. 331 p. URL: <https://odi.org/en/publications/legal-timber-verification-and-governance-in-the-forest-sector/>.
5. Michael G. Faure. Environmental Crimes (November 2, 2009) / Michael G. Faure // Criminal law and economics,

Available at SSRN. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1498471.

6. Justice for Forests: Improving Criminal Justice Efforts to Combat Illegal Logging / M.P. Goncalves, M. Panjer, T.S. Greenberg, W.B. Magrath. World Bank, Washington D.C. 2012.

7. Cashore B. Can legality verification rescue global forest governance? Analyzing the potential of public and private policy intersection to ameliorate forest challenges in Southeast Asia / B. Cashore, M. Stone // *Forest Policy Econ.* 2012. Vol. 18. Pp. 13-22.

8. Fake legal logging in the Brazilian Amazon / H.S. Pedro Brancalion [end others] // *Science Advances.* 2018. Pp. 1-7.

9. Profit Sharing as a Management Strategy for a State-owned Teak Plantation at High Risk for Illegal Logging / J.H. Lee [end others] // *Ecological Economics.* 2018. Vol. 149. Pp. 140-148. URL: https://www.researchgate.net/publication/326100105_Profit_Sharing_as_a_Management_Strategy_for_a_Stateowned_Teak_Plantation_at_High_Risk_for_Illegal_Logging.

10. Condé T.M. Illegal selective logging and forest fires in the northern Brazilian Amazon / T.M. Condé, A.J.N. Higuchi N. Lima // *Forests.* 2019. Vol. 10 (1). Pp. 1-22. URL: https://www.researchgate.net/publication/330374961_Illegal_Selective_Logging_and_Forest_Fires_in_the_Northern_Brazilian_Amazon.

11. Мартынюк А.А. Нелегальные рубки: международный политический контекст / А.А. Мартынюк, Е.П. Кузьмичев И.Г. // *Лесохозяйственная информация.* 2018. № 1. С. 50-62. EDN: YRZGPW eISSN: 2304-3083

12. B. J.M. Arts. Tracing timber legality in practice: The case of Ghana and the EU / B. J.M. Arts, Bas Heukels, Esther Turnhout // *Forest Policy and Economics.* 2021. Pp. 1-9. URL: https://www.researchgate.net/publication/352384572_Tracing_timber_legality_in_practice_The_case_of_Ghana_and_the_EU.

13. Кузьмичев Е.П. Объемы незаконных рубок лесных насаждений в Российской Федерации / Е.П. Кузьмичев, И.Г. Трушина, Е.В. Лопатин // *Лесохозяйственная информация: Электронный сетевой журн.* 2018. № 1. С. 63-77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32596166&ysclid=lymlwm9ant297094207>.

14. Косых В.А. К вопросу о преступлениях, связанных с незаконной заготовкой древесины (криминологический аспект) // *Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России.* 2016. № 3 (71). С. 113-117.

15. Гаевская Е.Ю. Обзор изменений законодательства в сфере борьбы с незаконной заготовкой древесины // *Судья.* 2015. № 9. С. 16-20.

16. Сухаренко А. Под властью топора // *ЭЖ-Юрист.* 2014. № 27. С. 1-3.

17. Петрова Т.Г. Современное состояние экологической проблемы, связанной с незаконной рубкой, нелегальной заготовкой и оборотом древесины в России и за рубежом // *Вестник Восточно-Сибирского института МВД России.* 2016. № 2 (77). С. 31-35.

18. Официальный портал Федерального агентства лесного хозяйства: официальный сайт. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/news/2024-05-02/n10971>.

19. Гудков П.А. Методы сравнительного анализа: Учебное пособие. Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2008. 81 с.

20. Чеботовский Э.В. Графический анализ статистических данных в Microsoft Excel 2000. М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. 464 с.

n. Garoupa, ed., Cheltenham, 2009. P. 320-345. Available at SSRN. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1498471.

6. Justice for Forests: Improving Criminal Justice Efforts to Combat Illegal Logging. / Goncalves M.P., Panjer M., Greenberg T.S., Magrath W.B. World Bank, Washington D.C. 2012.

7. Cashore B. Can legality verification rescue global forest governance? Analyzing the potential of public and private policy intersection to ameliorate forest challenges in Southeast Asia / B. Cashore, M. Stone // *Forest Policy Econ.* 2012. Vol. 18. P. 13-22.

8. Fake legal logging in the Brazilian Amazon / Pedro H.S. Brancalion [end others] // *Science Advances.* 2018. P. 1-7.

9. Profit Sharing as a Management Strategy for a State-owned Teak Plantation at High Risk for Illegal Logging / J.H. Lee [end others] // *Ecological Economics.* 2018. Vol. 149. P. 140-148. URL: https://www.researchgate.net/publication/326100105_Profit_Sharing_as_a_Management_Strategy_for_a_Stateowned_Teak_Plantation_at_High_Risk_for_Illegal_Logging

10. Condé T.M. Illegal selective logging and forest fires in the northern Brazilian Amazon / T.M. Condé, A.J.N. Higuchi N. Lima // *Forests.* 2019. Vol. 10(1). P. 1-22. URL: https://www.researchgate.net/publication/330374961_Illegal_Selective_Logging_and_Forest_Fires_in_the_Northern_Brazilian_Amazon.

11. Martynyuk A.A. Illegal logging: an international political context / A.A. Martynyuk, E.P. Kuzmichev, I.G. Trushina // *Forestry information.* 2018. No. 1. P. 50-62. EDN: YRZGPW eISSN: 2304-3083

12. B. J.M. Arts. Tracing timber legality in practice: The case of Ghana and the EU / B. J.M. Arts, Bas Heukels, Esther Turnhout // *Forest Policy and Economics.* 2021. P. 1-9. URL: https://www.researchgate.net/publication/352384572_Tracing_timber_legality_in_practice_The_case_of_Ghana_and_the_EU.

13. Kuzmichev E.P. The volume of illegal logging of forest plantations in the Russian Federation / E.P. Kuzmichev, I.G. Trushina, E.V. Lopatin // *Forestry. inform.: electron. network journal.* 2018. No. 1. P. 63-77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32596166&ysclid=lymlwm9ant297094207>

14. Kosykh V.A. On the issue of crimes related to illegal logging (criminological aspect) / V.A. Kosykh // *Bulletin of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia.* 2016. No. 3(71). P. 113-117.

15. Gayevskaya E.Y. Review of legislative changes in the field of combating illegal logging / E.Y. Gayevskaya // *Judge.* 2015. No. 9. P. 16-20.

16. Sukharenko A. Under the power of the axe / A. Sukharenko // *EJ-Lawyer.* 2014. No. 27. P. 1-3.

17. Petrova T.G. The current state of the environmental problem associated with illegal logging, illegal harvesting and trafficking of timber in Russia and abroad / T.G. Petrova // *Bulletin of the East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia.* 2016. No. 2 (77). P. 31-35.

18. The official portal of the Federal Forestry Agency: the official website. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/news/2024-05-02/n10971>.

19. Gudkov P.A. Methods of comparative analysis: manual / P.A. Gudkov. Penza: Publishing House of Penza State University, 2008. 81 p.

20. Chekotovsky E.V. Graphical analysis of statistical data in Microsoft Excel 2000 / E.V. Chekotovsky. Moscow: Williams Publishing House, 2002. 464 p.

21. Внешняя торговля субъектов РФ ДФО. URL: <https://dvtu.customs.gov.ru/folder/143395>

22. Исследование и оценка организационно-экономических особенностей исполнения требований законодательства Российской Федерации на территории ДФО об учете древесины и сделках с ней, в том числе при экспорте древесины: Отчет о НИР (промежуточ.) / Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства; Рук. А.М. Орлов; Исполн. А.М. Орлов и др. Хабаровск, 2022. 183 с. Рег. № НИОКТР АААА-А18-118051590003-9.

23. О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях: Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. № 415-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156534/?ysclid=la6d1q2q1c863910090.

24. Об установлении форм, содержания и порядка представления отчетности об осуществлении органами государственной власти субъектов Российской Федерации переданных в соответствии с частью 1 статьи 83 Лесного Кодекса Российской Федерации полномочий Российской Федерации в области лесных отношений: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 1 марта 2022 г. № 144 (зарегистрировано в Минюсте России 21 апреля 2022 г. № 68285). URL: <https://online.consultant.ru/riv/cgi/online.cgi?req=doc&ts=04pAdETOfCZqc31B1cacheid=6C33CB8AB5512D506E7D33A6E7734541&mode=splus&rnd=V0Jvng&base=LAW&n=415430#yWUDdETNn2sWxqZI>.

25. Орлов А.М. Оценка объемов внутреннего потребления древесины в Хабаровском и Приморском краях / А.М. Орлов, О.С. Громыко, Ю.А. Грищенко // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2023. № 63. С. 377-381.

21. Foreign trade of the subjects of the Russian Far Eastern Federal District. URL: <https://dvtu.customs.gov.ru/folder/143395>.

22. Research and evaluation of the organizational and economic features of the fulfillment of the requirements of the legislation of the Russian Federation on the territory of the Far Eastern Federal District on accounting for timber and transactions with it, including when exporting timber: Research Report (interim) / Far Eastern Scientific Research Institute of Forestry; Directed by A.M. Orlov; Performed by A.M. Orlov and others – Khabarovsk: 2022. 183 p. R&D Reg. No. ААААА-А18-118051590003-9.

23. On Amendments to the Forest Code of the Russian Federation and the Code of Administrative Offences of the Russian Federation: Federal Law No. 415-FZ of December 28, 2013. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156534/?ysclid=la6d1q2q1c863910090.

24. On establishing the forms, Content and procedure for reporting on the Exercise by state authorities of the Subjects of the Russian Federation of the powers of the Russian Federation transferred in accordance with Part 1 of Article 83 of the Forest Code of the Russian Federation in the field of forest relations: Order No. 144 of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated March 1, 2022 (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation 21 April 2022, No. 68285). URL: <https://online.consultant.ru/riv/cgi/online.cgi?req=doc&ts=04pAdETOfCZqc31B1&cacheid=6C33CB8AB5512D506E7D33A6E7734541&mode=splus&rnd=V0Jvng&base=LAW&n=415430#yWUDdETNn2sWxqZI>.

25. Orlov A.M. Assessment of the volume of domestic wood consumption in Khabarovsk and Primorsky Territories / A.M. Orlov, O.S. Gromyko, Yu.A. Grishchenova // Actual problems of the forest complex. 2023. No. 63. P. 377-381.

Об авторах

Алексей Михайлович Орлов, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник отдела охраны, защиты леса и лесной экологии; ORCID: 0000-0003-4143-3075; SCOPUS AUTHOR ID: 57221674686; РИНЦ ID: 206024; dvniilh@inbox.ru

Оксана Сергеевна Громыко, канд. биол. наук, старший научный сотрудник отдела охраны, защиты леса и лесной экологии; ORCID: 0000-0001-9086-7959; РИНЦ ID: 1018456; estraid@yandex.ru

Александр Петрович Ковалев, д-р с.-х. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела лесоводства и лесосечных работ; ORCID: 0000-0003-2179-6725; РИНЦ ID: 345007; a.p.kovalev51@mail.ru

Юлия Александровна Грищенко, младший научный сотрудник отдела охраны, защиты леса и лесной экологии; ORCID: 0000-0002-1808-6215; РИНЦ ID: 1171231

About the authors

Alexey M. Orlov, CSc (Biology), leading researcher of the department of forest security, protection and forest ecologist; ORCID: 0000-0003-4143-3075; SCOPUS AUTHOR ID: 57221674686; RSCI ID: 206024; 8-914-544-41-47; dvniilh@inbox.ru

Oksana S. Gromyko, CSc (Biology), senior researcher of the department of forest security, protection and forest ecology; ORCID: 0000-0001-9086-7959; RSCI ID: 1018456; 8-924-202-95-34, estraid@yandex.ru

Alexander P. Kovalev, DSc (Agro), professor, chief researcher of the department of forestry and logging operations; ORCID: 0000-0003-2179-6725; RSCI ID: 345007; 8-914-544-41-48, a.p.kovalev51@mail.ru

Julia A. Grishchenova, junior researcher of the department of forest security, protection and forest ecology; ORCID: 0000-0002-1808-6215; RSCI ID: 1171231

Критерии авторства / Authorship criteria

Орлов А.М., Громыко О.С., Ковалев А.П., Грищенко Ю.А. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Орлов А.М., Громыко О.С., Ковалев А.П., Грищенко Ю.А. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 15.07.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review 22.02.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 22.02.2025

Orlov A.M., Gromyko O.S., Kovalev A.P., Grishchenova Yu.A. performed theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript. Orlov A.M., Gromyko O.S., Kovalev A.P., Grishchenova Yu.A. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-142-149>

УДК 630*181.5:712.2:504.5



КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ДЕКОРАТИВНОСТИ ИЛЬМОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

И.С. Богущ¹✉, О.Б. Сокольская¹, В.В. Кругляк³, А.А. Вергунова², Т.А. Андрушко¹

¹ФГБОУ ВО Вавиловский университет, ул. Советская, 60, Саратов, Россия

²ГАПОУ СО «Саратовский архитектурно-строительный колледж»:410028, г. Саратов, ул. Чернышевского, д. 139, Саратов, Россия

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I»: ул. Мичурина, 1, Воронеж, Россия

Аннотация. Цель исследования: разработка методик оценки декоративности ильмовых насаждений, учитывающей комплексное влияние факторов городской среды. Проанализированы ключевые факторы декоративности с указанием, что на декоративные качества вязов наиболее существенно влияют: количество зеленых насаждений, уровень запыленности воздуха, однородность видов и степень заболеваемости, а также таких аспектов, как аспекты, как биология (B), экология (E), ландшафт (L), уход (C), социальные факторы (S) и культурная инновационность (H). Эти параметры стали основой для создания математической модели декоративности (D). Показаны и оценены апробированные результаты на территориях исследования двух городов (Саратова и Энгельса) с разной интенсивностью движения транспортных средств. Для повышения декоративности предложены: улучшить уход за деревьями на улицах с высокой интенсивностью движения; заменить поврежденные деревья на устойчивые виды *Ulmus*; проводить регулярный мониторинг состояния почвы и уровня загрязнения воздуха. Результаты были подвергнуты статистической обработке.

Ключевые слова: ильмовые культуры, декоративность, зеленые насаждения, математическая модель, городская среда, озеленение, улицы с высокой интенсивностью движения транспорта, улицы с min движением транспорта, рекреационные зоны

Формат цитирования: Богущ И.С., Сокольская О.Б., Кругляк В.В., Вергунова А.А., Андрушко Т.А. Комплексная оценка декоративности ильмовых насаждений в городской среде // Природообустройство. 2025. № 3. С. 142-149. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-142-149>

Original article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE DECORATIVE EFFECT OF ELM TREES IN AN URBAN ENVIRONMENT

I.S. Bogush¹✉, O.B. Sokolskaya¹, V.V. Kruglyak³, A.A. Vergunova², T.A. Andrushko¹

¹Vavilovsky University, Sovetskaya str., 60, Saratov, Russia

²GAPOU SB "Saratov College of Architecture and Civil Engineering":410028, Saratov, Chernyshevsky

³The Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I: 1 Michurina St., Voronezh, Russia

Abstract. This article provides the development of a methodology for assessing the decorative effect of elm trees, taking into account the complex influence of urban environmental factors. The key factors of decorativeness are analyzed, indicating that the decorative qualities of elms are most significantly influenced by: the number of green spaces, the level of dust in the air, the uniformity of species and the degree of morbidity, as well as aspects such as biology (B), ecology (E), landscape (L), care (C), social factors (S) and cultural innovation (H). These parameters became the basis for the creation of a mathematical model of decorativeness (D). The tested results are shown and evaluated in the study areas of two cities (Saratov and Engels) with different traffic intensity. To enhance the decorative effect, it is proposed to improve the care of trees on streets with high traffic intensity; replace damaged trees with resistant *Ulmus* species; regularly monitor soil conditions and pollution levels.

Keywords: elm trees, decorative features, green spaces, urban environment, landscaping, streets with high traffic intensity, streets with min traffic, recreational areas

Format of citation: Bogush I.S., Sokolskaya O.B., Kruglyak V.V., Vergunova A.A., Andrushko T.A. Comprehensive assessment of the decorative effect of elm trees in an urban environment // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 142-149. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-142-149>

Введение. Городские зелёные насаждения, включая ильмовые (вязовые) деревья, играют ключевую роль в формировании экологического благополучия и эстетики урбанизированных территорий. Они выполняют функции фильтрации воздуха, снижения температуры, защиты от шума и создания комфортной среды для жителей. Однако в условиях интенсивного антропогенного воздействия, загрязнения и климатических стрессов декоративность этих растений часто снижается, что ставит под вопрос их эффективность как элемента городского дизайна. Особую актуальность проблема приобретает в регионах с континентальным климатом, таких как Поволжье, где экстремальные температуры и засуха усугубляют состояние насаждений.

Ильмовые деревья (*Ulmus spp.*) широко используются в озеленении благодаря своей устойчивости к неблагоприятным условиям. Например, в Саратове и Энгельсе вязы высаживались исторически как символ долговечности, однако их современное состояние варьируется от критического на улицах с интенсивным движением до удовлетворительного в парковых зонах. Несмотря на обилие исследований, посвящённых выживаемости городских деревьев (например, оценка устойчивости к голландской болезни вязов), комплексный анализ их декоративности остаётся недостаточно изученным. Традиционные подходы, такие как индекс NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс) по спутниковым снимкам Sentinel-2 или визуальный осмотр, фокусируются на отдельных аспектах (например, затенённости кроны), игнорируя, скажем такие, как культурные факторы, которые критически важны для восприятия городской среды.

Существующие методики оценки декоративности часто субъективны или ограничены узкими параметрами. Например, стандартный визуальный анализ по шкале от 1 до 5 баллов (форма кроны, окраска листьев) не учитывает влияние экологии или исторической ценности. В то же время, инструментальные методы, такие как измерение концентрации тяжёлых металлов в листьях, слишком трудоёмки для массовых исследований. Это создаёт пробел в научной литературе: нет универсального инструмента, который объединял бы биологические, экологические, ландшафтные и культурные аспекты в единую систему.

Цель исследования: разработка методики оценки декоративности ильмовых насаждений, которая учитывает комплексное влияние факторов городской среды. Для её достижения нами решались следующие задачи:

1. Выявление ключевых параметров декоративности: биологическое состояние деревьев, экологические условия, ландшафтный контекст и культурная значимость.

2. Создание математической модели, сочетающей количественные и качественные показатели.

3. Апробация методики на 16 локациях городов Саратова и Энгельса: набережных, улицах, парках.

4. Формулировка рекомендаций для улучшения ухода и планирования зелёных зон.

Научная новизна работы заключается в интеграции разнородных данных в единую формулу, что позволяет избежать субъективности традиционных подходов. Например, впервые учтён корректирующий коэффициент K , связывающий возраст насаждений с их устойчивостью к стрессу. Практическая значимость подтверждается возможностью применения методики для оптимизации ухода за деревьями: расчёты показывают, что даже на улицах с высоким уровнем загрязнения (например, улица Рабочая в Саратове, $D = 50\%$) декоративность можно повысить за счёт регулярной обрезки и полива.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись древесные и кустарниковые виды рода *Ulmus*, на опытных участках в городах Саратов и Энгельс, расположенных на территории Саратовской области, разделенная на три типа (рис. 1).

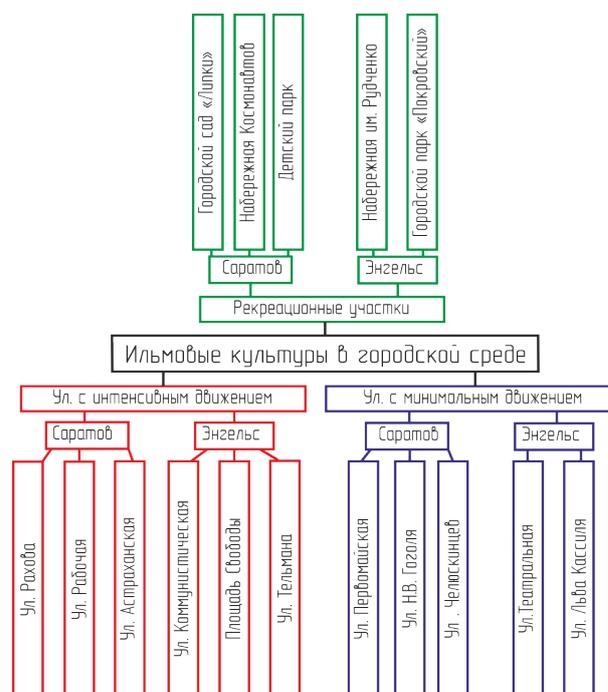


Рис. 1. Объекты исследования в зависимости от интенсивности движения
Fig. 1. Research objects depending on traffic intensity

А. Участки с интенсивным движением

Эти участки характеризуются высокой транспортной нагрузкой и, как следствие, повышенным уровнем загрязнения воздуха пылью и выхлопными газами. В данных зонах ильмы выполняют функции пыле- и шумозащиты, а также создают тень.

Б. Участки с минимальным движением

Эти зоны имеют умеренную транспортную нагрузку и используются преимущественно для жилой застройки и местного трафика. Здесь ильмы создают комфортную среду и улучшают микроклимат.

В. Рекреационные участки

Эти зоны полностью свободны от транспортного движения и предназначены для отдыха и рекреации. Здесь ильмы играют важную роль в создании эстетически привлекательных ландшафтов и укреплении склонов.

Озеленение с применением ильмовых культур проводилось в соответствии с городскими проектами благоустройства.

Исследования проводились в двух городах Поволжья:

- Саратов: 9 локаций (улицы Рахова, Гоголя, Челюскинцев, Рабочая, Астраханская, Первомайская, Коммунистическая, площадь Свободы, парк «Липки»).

- Энгельс: 7 локаций (набережные Космонавтов и им. Рудченко, улицы Тельмана, Театральная, Льва Касиля, парк «Покровский», площадь Свободы).

Исследования проводились в вегетационный период с 2021 по 2024 гг., когда листва полностью развита. В ходе работы было обследовано 1362 вязовых дерева видов рода *Ulmus*, из которых 896 деревьев исследовано в Саратове и 466 деревьев – в Энгельсе.

В нашем исследовании мы применяли следующие инструменты: фотокамера для визуальной фиксации состояния деревьев; портативный рН-метр для анализа почвы; анкеты для опроса жителей (Google Forms); данные Росгидромета и OpenStreetMap.

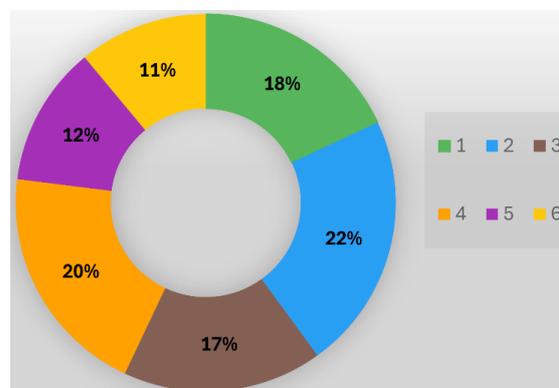
Методы исследования. Для оценки биологических параметров (форма кроны, окраска листвы) и оценка состояния городских зеленых насаждений использована методика В.Н. Алексеева [1]; ландшафтная оценка городских зеленых зон с оценкой гармонии насаждений с окружающей средой А.И. Шубина [2]; биоэкологические аспекты с анализом влияния загрязнения на здоровье деревьев в урбанизированной среде И.В. Савенковой и С.В. Пашкова [3]; методика оценки плодородия и кислотности почвы

по исследованиям ГНУ ВНИИА [4]; анализ культурной значимости парков и набережных по И.П. Захарову [5]; аттрактивность исторических садово-парковых территорий по О.Б. Сокольской [6]; источник данных по PM_{2.5} и NO₂ по Росгидромет 2023. Отчёт о загрязнении воздуха в Саратовской области [7]; обоснование корреляции между NDVI и декоративностью по Smith, J. H. [8], а также повреждения от болезней и вредителей, влияющие на декоративность [9]. Использовались некоторые сведения о посадках зеленых насаждений, в исследуемом регионе (Богуш И.С., [10].)

Результаты и обсуждение. Нами были оценены несколько параметров влияния городской среды на декоративные характеристики ильмовых насаждений (рис. 2).

Из рисунка 2 определено, что на декоративно-эстетические качества видов рода *Ulmus* наибольшее влияние оказывают экологические факторы (22%), а также качество ухода за зелёными насаждениями (20%). Регулярное обслуживания флоры подчеркивает устойчивость экосистемы.

Существенную роль играют биологические параметры (18%) и ландшафтные



- 1 – Биологические параметры
Biological parameters;
- 2 – Экологические факторы
Environmental factors;
- 3 – Ландшафтные характеристики
Landscape characteristics;
- 4 – Качество ухода
Quality of care;
- 5 – Социальный фактор
Social factor
- 6 – Культурная инновационность
Cultural innovation

Рис. 2. Оценка влияния городской среды на декоративные характеристики ильмовых насаждений

Fig. 2. Assessment of the impact of the urban environment on the decorative characteristics of elm trees

характеристики (17%). Менее выражено, но значимо воздействие социальных (12%) и культурных факторов (11%).

В связи с этим установлено, что на декоративные качества влияют следующие основные параметры: биология, экология, ландшафт, уход, социум, культура, т.е. те показатели, которые можно оценить визуально или при помощи IT-технологий: 1. Биологические параметры (В): *форма кроны*: визуальный осмотр по шкале от 0 до 5 (густота, симметричность) согласно стандартам дендрологического мониторинга; *окраска листвы*: Оценка яркости и равномерности цвета (шкала 0-5) с использованием эталонных фотографий; *здоровье растений*: фиксация повреждений (трещины, болезни ЗН (зеленые насаждения) и их площади (например, 20% повреждённых ветвей → 3 балла из 5); 2. Экологические факторы (Е): *загрязнение воздуха*: Данные по PM_{2.5} и NO₂ из отчётов Росгидромета за 2022-2023 гг.; *Качество почвы*: Анализ проб на кислотность (рН) и плодородие (содержание гумуса) по методикам ГНУ ВНИИА (Всероссийский научно-исследовательский институт агролесомелиорации); 3. Ландшафтные характеристики (L): *гармония с окружением*: фото-съёмка и сравнение с архитектурными доминантами (например, высота деревьев относительно зданий); *наличие водоёмов / склонов*: Учёт географических особенностей через картографические данные (Яндекс. Карты, OpenStreetMap), микроклимат и пр.; 4. Культурная инновационность (Н): *историческая ценность*: анализ архивных документов и статуса объектов (например,

городской сад «Липки» – памятник садово-паркового искусства); *мнение жителей*: анкетирование 30+ респондентов на каждой локации (вопросы: «Оцените эстетику насаждений по шкале от 1 до 10», «Знаете ли вы историю этих деревьев?»); 5. Качество ухода (У): *качество ухода*: полив, обрезка, защита от болезней и вредителей ЗН; 6. Социальный фактор (S): рекреационная нагрузка, отношение со стороны жителей к деревьям и кустарникам.

Введен корректирующий коэффициент (К), который рассчитывался по формуле:

$$K = 1 + 0,1 \cdot (\text{возраст насаждений}) - 0,05 \cdot (\text{уровень стресса}), \quad (1)$$

где: возраст определялся по архивным данным о посадке, уровень стресса – через индекс загрязнения воздуха и количество механических повреждений.

Так, например, если возраст насаждений = 30 лет → 0,1 · 30 = 3,0, а

уровень стресса: низкий (например, 20%) → 0,05 · 20 = 1,0, то K = 1 + 3,0 - 1,0 = 3,0

Создана математическая модель комплексной оценки декоративности зеленых насаждений, в том числе и вязовых культур:

$$D = K \cdot \sum_{i=1}^6 w_i \cdot x_i, \quad (2)$$

где K – корректирующий коэффициент, w_i – весовой коэффициент фактора, x_i – значение параметра.

Каждый параметр x_i оценивается по шкале от 0 до 100. Ниже приведено подробное описание критериев для каждого параметра и их градации (табл. 1).

Таблица 1. Градация параметров x_i
Table 1. Gradation of parameters x_i

Признаки <i>Signs</i>	Градация <i>Gradation</i>	Баллы (x_i) <i>Points (x_i)</i>	Описание <i>Description</i>
1	2	3	4
Биологические параметры (x_1) <i>Biological parameters (x_1)</i>	Отличное <i>Excellent</i>	86-100	Идеальная форма кроны, яркая окраска листвы, отсутствие болезней ЗН и повреждений от насекомых-вредителей <i>Ideal crown shape, foliage bright color, absence of ZN diseases and damages from insect-pests</i>
	Очень хорошее <i>Very good</i>	76-85	Почти идеальное состояние, но есть незначительные признаки стресса <i>Almost perfect condition, but there are minor signs of stress</i>
	Хорошее <i>Good</i>	66-75	Умеренные повреждения или блеклая окраска листвы <i>Moderate damage or faded coloration of foliage</i>
	Удовлетворительное <i>Satisfactory</i>	46-65	Деформированная крона, заметные повреждения листвы или ствола <i>Deformed crown, noticeable damage to foliage or trunk</i>
	Плохое <i>Bad</i>	≤45	Сильно повреждённые деревья, отсутствие листвы, деформированные стволы <i>Severely damaged trees, lack of foliage, deformed trunks</i>

1	2	3	4
Ландшафтные характеристики (x_2) <i>Landscape characteristics (x_2)</i>	Отличное <i>Excellent</i>	86-100	Полная гармония с окружающей средой, наличие доминантных элементов (водоёмы, склоны) <i>Complete harmony with the environment, presence of dominant elements (reservoirs, slopes)</i>
	Очень хорошее <i>Very good</i>	76-85	Гармония с окружением, но без выдающихся особенностей <i>Harmony with the surroundings, but without outstanding features</i>
	Хорошее <i>Good</i>	66-75	Нейтральная гармония, деревья не нарушают общий вид <i>Neutral harmony, trees do not disturb the overall appearance</i>
	Удовлетворительное <i>Satisfactory</i>	46-65	Частичное нарушение гармонии, деревья закрывают вид или плохо сочетаются с окружением <i>Partial disruption of harmony, trees block the view or do not fit well with the surroundings.</i>
	Плохое <i>Bad</i>	≤45	Полное несоответствие ландшафту, деревья мешают движению или обзору <i>Completely out of keeping with the landscape, trees obstruct movement or visibility</i>
Качество ухода (x_3) <i>Quality of care (x_3)</i>	Отличный <i>Excellent</i>	86-100	Регулярный полив, ежегодная обрезка, защита от болезней и от насекомых-вредителей <i>Regular watering, annual pruning, protection from diseases and insect pests</i>
	Очень хороший <i>Very good</i>	76-85	Умеренный уход: редкий полив, периодическая обрезка <i>Moderate care: rare watering, periodic pruning</i>
	Хороший <i>Good</i>	66-75	Минимальный уход: только обрезка, полив отсутствует <i>Minimal care: only pruning, no watering</i>
	Удовлетворительный <i>Satisfactory</i>	46-65	Редкий уход, деревья зарастают, накапливают мусор <i>Rare care, trees become overgrown and accumulate debris.</i>
	Плохой <i>Bad</i>	≤45	Полное отсутствие ухода, деревья зарастают, накапливают мусор <i>There is a complete lack of care, the trees become overgrown and accumulate garbage</i>
Социальные факторы (x_4) <i>Social factors (x_4)</i>	Отличное <i>Excellent</i>	86-100	Низкая рекреационная нагрузка, бережное отношение со стороны жителей <i>Low recreational load, respectful attitude on the part of residents</i>
	Очень хорошее <i>Very good</i>	76-85	Умеренная нагрузка, люди относятся к деревьям аккуратно <i>Moderate load, people treat trees with care</i>
	Хорошее <i>Good</i>	66-75	Высокая нагрузка или частый вандализм <i>High traffic or frequent vandalism</i>
	Удовлетворительное <i>Satisfactory</i>	46-65	Экстремальная нагрузка, сильный вандализм по отношению к ЗН <i>Extreme load, severe vandalism towards the ZN</i>
	Плохое <i>Bad</i>	≤45	Деревья полностью разрушены или повреждены <i>Trees are completely destroyed or damaged</i>
Экологические факторы (x_5) <i>Environmental factors (x_5)</i>	Отличное <i>Excellent</i>	86-100	Чистый воздух, плодородная почва, отсутствие пыли <i>Clean air, fertile soil, no dust</i>
	Очень хорошее <i>Very good</i>	76-85	Умеренное загрязнение воздуха, среднее качество почвы <i>Moderate air pollution, average soil quality</i>
	Хорошее <i>Good</i>	66-75	Высокое загрязнение воздуха, бедная почва, min пыль <i>High air pollution, poor soil, min dust</i>
	Удовлетворительное <i>Satisfactory</i>	46-65	Крайне неблагоприятные условия: сильное загрязнение, токсичная почва, max пыль <i>Extremely unfavorable conditions: heavy pollution, toxic soil, max dust</i>
	Плохое <i>Bad</i>	≤45	Деревья находятся в условиях экологической катастрофы, max пыль <i>Trees are in the conditions of ecological catastrophe, max dust</i>

1	2	3	4
Культурная инновационность (x_6) Cultural Innovation (x_6)	Отличное <i>Excellent</i>	86-100	Высокая историческая и культурная ценность, положительное мнение жителей <i>Extremely unfavorable conditions: heavy pollution, toxic soil, max dust</i>
	Очень хорошее <i>Very good</i>	76-85	Умеренная значимость, деревья связаны с местной культурой <i>Moderate importance, trees associated with local culture.</i>
	Хорошее <i>Good</i>	66-75	Низкая значимость, деревья не имеют особой культурной ценности <i>Low significance, trees have no particular cultural value.</i>
	Удовлетворительное <i>Satisfactory</i>	46-65	Отсутствие культурной ценности, негативное мнение жителей <i>Lack of cultural value, negative opinion of residents</i>
	Плохое <i>Bad</i>	≤ 45	Деревья вызывают недовольство из-за загрязнения или помехи движению <i>Trees cause discontent because they pollute or obstruct traffic</i>

Таблица 2. Параметры весового коэффициента w_i
Table 2. W_i weighting coefficient parameters

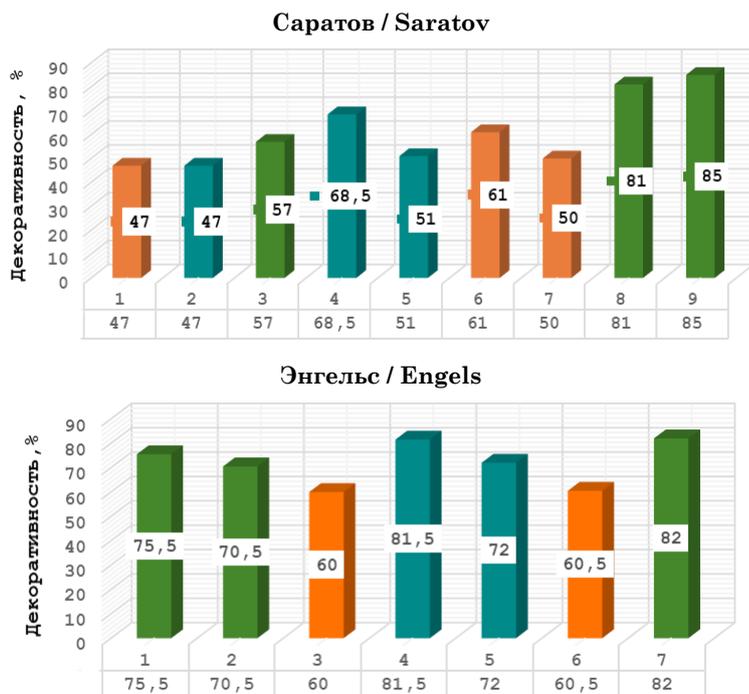
Признаки <i>Signs</i>	Весовой коэффициент (w_i) <i>Weighting factor (w_i)</i>	Краткое описание критерия <i>Brief description of the criterion</i>
$B(x_1)$	0.20	Состояние кроны, листвы, наличие болезней и повреждений ЗН <i>Condition of the crown, foliage, presence of diseases and damage to the ZN</i>
$L(x_2)$	0.15	Гармония с окружающей средой, наличие доминантных элементов ЗН <i>Harmony with the environment, presence of dominant elements of the ZN environment</i>
$U(x_3)$	0.20	Регулярность полива, обрезки, защита от вредителей-насекомых и болезней ЗН <i>Regular watering, pruning, protection from pests and diseases</i>
$S(x_4)$	0.15	Рекреационная нагрузка, отношение жителей, проявление вандализма <i>Recreational load, attitude of residents, vandalism</i>
$E(x_5)$	0.20	Уровень загрязнения воздуха, уровень оседания пыли на листьях ЗН, качество почвы <i>Air pollution level, dust deposition level on ZN leaves, soil quality</i>
$H(x_6)$	0.10	Историко-культурная ценность, возраст ЗН, мнение жителей <i>Historical and cultural value, age of the property, opinion of residents</i>

Были также определены значения w_i

Далее, нами по созданной математической модели была рассчитана декоративность каждой исследованной территории с разными по интенсивности движением транспорта и проведено их сравнение в Саратове и Энгельсе (рис. 3, а, б).

Из рисунка 3 оценка декоративности ильмовых насаждений в Саратове и Энгельсе показал, что их состояние варьируется от 47% (ул. им. В.Г. Рахова и ул. им. Н.В. Гоголя, Саратов) до 85% (городской сад «Липки», Саратов). В среднем декоративность в Энгельсе (71,9%) на 10,3 процентных пункта выше, чем

в Саратове (61,6%), что связано с меньшим уровнем загрязнения и более благоприятными условиями произрастания. Наиболее благоприятные показатели достигаются в парках и на набережных (например, городской сад «Липки» – 85%, набережная Космонавтов – 81%), где деревья защищены от стрессовых факторов, тогда как на улицах с интенсивным движением (например, ул. Рабочая в Саратове – 50%) декоративность снижается на 35-40%. Это подчеркивает необходимость усиления мер по защите и восстановлению городских насаждений для повышения качества городской среды.



Объекты исследования:
а) 1 – ул. им. В.Г. Рахова; 2 – ул. им. Н.В. Гоголя;
3 – Детский парк; 4 – ул. Челюскинцев;
5 – ул. Первомайская; 6 – Астраханская ул.;
7 – ул. Рабочая; 8 – Набережная Космонавтов;
9 – городской сад «Липки»

Objects of research
1 – street named after V.G. Rakhov;
2 – street named after N.V. Gogol; 3 – Children park;
4 – street named after Chelyuskintsev;
5 – Pervomayskaya street; 6 – Astrakhanskaya street;
7 – Rabochaya street; 8 – Embankment of Spacemen;
9 – urban garden “Lipki”

Объекты исследования:
б) 1 – Набережная имени Генерал-лейтенанта
М.М. Рудченко;
2 – «Покровский» парк; 3 – ул. Тельмана;
4 – ул. Театральная; 5 – ул. Льва Кассиля;
6 – ул. Коммунистическая; 7 – площадь Свободы

Objects of research
b) 1 – Embankment named after Lieutenant –
General M.M. Rudchenko;
2 – “Pokrovsky park”; 3 – Telman street;
4 – Teatralnaya street; 5 – Lev Kassil street;
6 – Kommunisticheskaya street;
7 – Square of Freedom

Рис. 3. Оценка декоративности территорий с ильмовыми культурами в двух городах: Саратове (а) и Энгельсе (б)

Fig. 3. Assessment of the decorative value of territories with elm crops in two cities: Saratov and Engels

Заключение (выводы)

В ходе исследования была достигнута поставленная цель – разработана методика оценки декоративности ильмовых насаждений, учитывающая комплексное влияние факторов городской среды. По результатам выполнения задач можно сделать следующие *выводы*:

– Выявление ключевых параметров декоративности, установлено, что на декоративность вязов наибольшее влияние оказывают: содержание зеленых насаждений (20%), запыленность воздуха (15%), однородность видового состава (13%) и уровень заболеваемости (12%). Эти параметры легли в основу формулы для расчета декоративности (D) (общего показателя результативности в баллах от 0 до 100), где учтены биологические параметры (B), экологические факторы (E), ландшафтные характеристики (L), качество ухода (U), социальный фактор (S), культурная инновационность (H).

– Создана математическая модель: разработанная математическая модель позволила количественно оценить декоративность с учетом весовых коэффициентов (например, 0,4 для биологии; 0,3 для экологии; 0,2 для ландшафта; 0,1 для культуры). Корректирующий коэффициент К

учитывает возраст насаждений и уровень стресса, что повысило точность расчетов. Например, для набережной Космонавтов (Саратов) $K=3,0$, а для улицы Рабочей (Саратов) $K=1,5$.

– Данная методика прошла испытания на 16-и локациях: 9 локаций в Саратове и 7 – в Энгельсе, где было обследовано 1362 дерева. Декоративность варьировалась от 47% (ул. им. В.Г. Рахова и ул. им. Н.В. Гоголя в Саратове) до 85% (городской сад «Липки», Саратов). В среднем показатели декоративности в Энгельсе (71,9%) превышают аналогичные в Саратове (61,6%) на 10,3 процентных пункта, что связано с более благоприятными экологическими условиями.

– Для повышения декоративности предложено: 1) усилить уход за деревьями на улицах с интенсивным движением (например, ул. Рабочая, $D=50\%$); 2) заменить поврежденные деревья на устойчивые виды *Ulmus*; 3) проводить регулярный мониторинг состояния почвы и уровня загрязнения воздуха.

Таким образом, данная методика универсальна, она позволяет проводить унифицированную оценку декоративности разнообразных зеленых насаждений, в том числе ильмовых, независимо от региона их произрастания.

Список использованных источников

1. Алексеев В.Н. Методика оценки состояния древесных насаждений в городских условиях // Журнал лесоведения. 2003. № 4(22). С. 45-52.

Reference

1. Alexeev V.N. Methodology for assessing the condition of tree plantations in urban environments / V.N. Alexeev // Journal of Forestry. 2003 No. 4(22). P. 45-52.

2. Шубин А.И. Ландшафтный анализ городских зелёных зон // Вестник архитектуры и строительства. 2009. № 3(14). С. 78-85.

3. Савенкова И.В., Пашков С.В. Биоэкологический мониторинг деревьев в условиях городской среды // Вестник МГПУ. Серия: Естественные науки. 2019. № 4 (36). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bioekologicheskii-monitoring-dereviev-v-usloviyah-gorodskoy-sredy>

4. ГНУ ВНИИА. Стандарты анализа почвы для городских насаждений / ГНУ ВНИИА. М.: Издательство ВНИИА, 2019. 128 с.

5. Захаров И.П. История озеленения Саратова и Энгельса // Региональные исследования 2017. № 7(25). С. 88-95.

6. Сокольская О.Б. Обоснование восстановления садово-паркового наследия России: Монография. СПб.: Лань, 2021. 368 с. ISBN 978-5-8114-7132-4.

7. Росгидромет. Отчёт о загрязнении воздуха в Саратовской области / Росгидромет. М.: Изд-во Росгидромета, 2023. 96 с.

8. Смит Дж.Х. NDVI как инструмент мониторинга городской растительности // Приложения дистанционного зондирования. 2015. Т. 12. № 4. С. 45-53.

9. Джонсон К. Управление голландской болезнью ялов в городских ландшафтах / К. Джонсон, Р. Смит // Городское лесное хозяйство и озеленение. 2018. Т. 32. С. 110-118.

10. Богущ И.С., Сокольская О.Б. Мониторинг рода *Ulmus L.* в городском озеленении // Агрофорсайт. 2021. № 6(37). С. 101-108. Учредители: ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ». eISSN: 2415-8666. DOI: 10.54697/24158666_2021_06_101. URL: http://agroforsait.ru/wp-content/uploads/2021/11/6_2021%D0%BD_101-108.pdf

2. Shubin A.I. Landscape analysis of urban green zones / A.I. Shubin // Bulletin of Architecture and Construction. 2009. No. 3(14). P. 78-85.

3. Savenkova I.V., Pashkov S.V. Bioecological Monitoring of Trees in Urban Environment // Bulletin of MGPU. Series: Natural Sciences. 2019. No. 4 (36). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bioekologicheskii-monitoring-dereviev-v-usloviyah-gorodskoy-sredy>

4. GNU VNIIA. Standards for soil analysis of urban plantations / GNU VNIIA. Moscow: VNIIA Publishing, 2019. 128 p.

5. Zakharov I.P. The history of landscaping in Saratov and Engels / I.P. Zakharov // Regional Studies. 2017. No. 7(25). P. 88-95.

6. Sokolskaya O.B. Justification for the restoration of Russia's garden and park heritage: monograph / O.B. Sokolskaya. St. Petersburg: Lan, 2021. 368 p. ISBN 978-5-8114-7132-4.

7. Roshydromet. Report on air pollution in the Saratov region / Roshydromet. – Moscow: Roshydromet Publishing, 2023. 96 p.

8. Smith J.H. NDVI as a Tool for Urban Vegetation Monitoring / J.H. Smith // Remote Sensing Applications. 2015. Vol. 12. No. 4. P. 45-53.

9. Johnson K. Dutch Elm Disease Management in Urban Landscapes / K. Johnson, R. Smith // Urban Forestry & Urban Greening. 2018. Vol. 32. P. 110-118.

10. Bogush I.S., Sokolskaya O.B. Monitoring of the *Ulmus L.* genus in urban landscaping // AgroForsait. 2021. No. 6(37). P. 101-108. ISSN 2415-8666. DOI: 10.54697/24158666_2021_06_101. URL: http://agroforsait.ru/wp-content/uploads/2021/11/6_2021_101-108.pdf

Об авторах

Иван Сергеевич Богущ, аспирант кафедры «Лесное хозяйство и ландшафтное строительство», магистр ландшафтной архитектуры, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4911-4941>; vanbogush@gmail.com

Ольга Борисовна Сокольская, д-р. с.-х. наук., профессор кафедры «Лесное хозяйство и ландшафтное строительство», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1723-1289>; sokolskaya.olg@yandex.ru

Владимир Викторович Кругльак, профессор кафедры землеустройства и ландшафтного проектирования, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-2384-5489>; BitneBit@gmail.com

Анастасия Аркадьевна Вергунова, канд. с.-х. наук, ландшафтной архитектуры, преподаватель: ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0200-4721>; aelestel@mail.ru,

Татьяна Александровна Андрушко, канд. с.-х. наук., доцент кафедры «Лесное хозяйство и ландшафтное строительство», ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2718-3428>; t.andruschko@yandex.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Богущ И.С., Сокольская О.Б., Кругльак В.В., Вергунова А.А., Андрушко Т.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / The authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 28.08.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review 22.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 22.05.2025

About the authors

Ivan S. Bogush, postgraduate student of the Department of Forestry and Landscape Construction, Master of Landscape Architecture; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4911-4941>; vanbogush@gmail.com

Olga B. Sokolskaya, DSs (Agro), professor of the Department of Forestry and Landscape Construction; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1723-1289>; sokolskaya.olg@yandex.ru

Vladimir V. Kruglyak, professor at the Department of Land Management and Landscape Design, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-2384-5489>; BitneBit@gmail.com

Anastasia A. Vergunova, CSs (Agro), lecturer at Saratov College of Architecture and Civil Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0200-4721>; aelestel@mail.ru

Tatyana A. Andrushko, CSs (Agro), associate professor of the Department of Forestry and Landscape Construction, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2718-3428>; t.andruschko@yandex.ru

Bogush I.S., Sokolskaya O.B., Kruglyak V.V., Vergunova A.A., Andrushko T.A. carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript. They have a copyright on the article and are responsible 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>