

ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

1' 2025

Москва, Издательство РГАУ-МСХА

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



ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

1' 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. ФилатоваАдрес редакции: 127434, Москва,
Прянишникова ул., 14, строение 7-7А
Тел.: 8 (499) 976-36-67
Email: prirodagrup@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 14.02.25 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.ppressa-rf.ru/cat/1/edition/t80746/>**Цена подписная**



ISSN 1997-6011

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

1' 2025

Founder and Publisher:

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

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

The journal is registered
by the Federal service for supervision
of communications, information technology
and mass media

Certificate of registration

PI No FS 77-58566 dated July 14, 2014

The journal is included in the list of publications
recommended by Higher Attestation Commission
of the Russian Federation for publishing papers
of those seeking PhD and DSc scientific degrees
**The issue is listed in the Russian Science
Citation Index, CrossRef,
AGRIS (Agricultural Research Information System),
Kiberleninka (Open Science)**

Full versions are posted on the site
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>

Editor *V.I. Markovskaya*

Computer typesetting and makeup –
A.S. Lavrova

Translation into English – *V.G. Ryabchikova*
Responsible for the issue of the journal –
N.Ya. Filatova

Address of the editorial office:
building 7-7A, Pryanishnikov str., 14,
Moscow, 127434, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 976-36-67
Email: prirodamgup@mail.ru
Website: environment.elpub.ru

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

Signed for print 14.02.25
Format 60 84/8, Circulation 500

When 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 (Novocherkassk, Russian Federation)

Nikolay N. Dubenok, DSci. (Agr), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Gabil Kh. Ismailylov, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Erzhan Zh. Kentbaev, DSci. (Agr), Professor, Academician of KazNAEN
NAO "Kazakh National Research University" (Almaty, Republic of Kazakhstan)

Lyudmila V. Kireycheva, DSci. (Eng), Professor
Federal Research Center VNIIGiM named after A.N. Kostyakov (Moscow, Russian Federation)

Yury M. Kosichenko, DSci. (Eng), Professor
FGBNU Russian Research Institute of Applied Mathematics (Novocherkassk, Russian Federation)

Sergey E. Lisichkin, DSci. (Eng), Senior Researcher
Branch of JSC "Institute Hydroproject – "NIIES" (Moscow, Russian Federation)

Anatoly P. Likhatchevich, DSci. (Eng),
Corresponding Member of the Academy of Sciences of Belarus
Republican scientific subsidiary unitary Enterprise "Institute of Land Reclamation"
(Minsk, Republic of Belarus)

Sergey M. Matveev, DSci. (Bio), Professor
Voronezh state forestry engineering university named after G.F. Morozov (Voronezh, Russian Federation)

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

В.А. Шевченко, Л.В. Кирейчева

Комплексная мелиорация – основа технологического обеспечения продовольственной безопасности и сохранения плодородия почв6

А.Е. Хаджиди, Е.В. Кузнецов, А.Е. Новиков

Утилизация дренажного стока осушительной системы13

Н.Б. Мартынова, Л.А. Журавлева

Особенности формирования контуров увлажнения при поверхностной и внутрипочвенной укладке капельной ленты при выращивании картофеля21

М.Е. Бельшккина

Трансформация климата Центрального района Нечерноземной зоны в условиях глобального потепления27

С.А. Агапова, А.Ю. Москвичев

Действие инокуляции семян сои на биологическую активность орошаемой светло-каштановой почвы Нижнего Поволжья33

А.В. Ильинский, К.Н. Евсенкин, А.А. Павлов

Экологическая оценка влияния седиментации на загрязнение мелиорированных земель пойменного агроландшафта тяжелыми металлами40

О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, А.С. Гузалов, Н.Н. Пуляев, А.В. Куриленко

Математическое моделирование самовозгорания торфяной почвы48

С.В. Чумакова, Д.Г. Горюнов, М.Г. Загоруйко

Математическая модель оптимизации формирования парка мелиоративных машин56

Гидротехническое строительство

О.Д. Рубин, Ю.А. Ильин, А.Л. Шевкин, И.В. Евдокимова

Анализ результатов исследований водопроявления в зоне конструкций шахт турбин Рыбинской и Угличской ГЭС63

О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко, Я.Ю. Бурлаченко

Оптимизация конструктивного оформления нижнего бьефа малопролетного водопропускного сооружения73

В.Л. Снежко, А.А. Гайсин, М.С. Палиивец

Инжекционные регуляторы расхода с плоскими диффузорами81

Гидравлика и инженерная гидрология

Н.П. Карпенко

Обеспечение качества подземных водных ресурсов на водозаборах Нарского месторождения90

М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов

Определение оптимального диаметра теплопровода путем решения оптимизационной задачи97

Д.Ю. Короткоручко, М.С. Али

Определение мощностных и энергетических характеристик насосов с регулируемой частотой вращения в системах водоподачи с гидравлическими мембранными баками 104

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

Р.Х. Гиниятуллин, О.В. Тагирова, А.Ю. Кулагин

Состояние насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth) и особенности накопления и транслокации металлов в системе «Почва-растение» в условиях техногенного загрязнения (Стерлитамакский промышленный центр, Республика Башкортостан) 111

А.В. Солонкин, С.Н. Крючков, А.С. Соломенцева, С.А. Егоров, Д.А. Горбушова

Технология выращивания сеянцев *Quercus robur* и *Juglans nigra* в засушливых условиях 120

Х.Г. Асадов, Е.Дж. Сулейманова, Н.Х. Мустафазаде

Методика обнаружения сезонных изменений в ландшафтных образованиях 129

Е.А. Савинич, Р.Н. Матвеева, О.Ф. Буторова

Сортовая и индивидуальная изменчивость трехлетних сеянцев абрикоса обыкновенного при интродукции в условиях пригородной зоны Красноярск 134

А.Б. Базаев

Уникальная тисовая роща в Алагирском лесничестве РСО-Алания 140

Contents

Land reclamation, water economy and agrophysics

V.A. Shevchenko, L.V. Kireicheva Integrated land reclamation is the basis for technological support of food security and preservation of soil fertility	6
A.E. Khadzhi, E.V. Kuznetsov, A.E. Novikov Utilization of drainage runoff from the drainage system	13
N.B. Martynova, L.A. Zhuravleva Features of formation of moisture contours during surface and intra-soil laying of drip tape when growing potatoes	21
M.E. Belyshkina Climate transformation of the central region of the non-chernozem zone in the context of global warming	27
S.A. Agapova, A.Yu. Moskvichev The effect of seed inoculation on the biological activity of irrigated light chestnut soil in the Lower Volga region	33
A.V. Ilyinsky, K.N. Evsenkin, A.A. Pavlov Environmental assessment of the effect of sedimentation on the pollution of reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape with heavy metals.....	40
O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, A.S. Guzalov, N.N. Pulyaev, A.V. Kurilenko Mathematical modeling of spontaneous combustion of peat soil.....	48
S.V. Chumakova, D.G. Goryunov, M.G. Zagoruiko Mathematical model for optimizing the formation of a fleet of reclamation machines.....	56

Hydraulic engineering construction

O.D. Rubin, Yu.A. Ilyin, A.L. Shevkin, I.V. Evdokimova Analysis of the results of studies of water manifestation in the zone of turbine shaft structures of the Rybinsk and Uglich HPPs.....	63
O.N. Chernykh, A.V. Burlachenko, Ya.Yu. Burlachenko Optimization of the design of the downstream of a low-span culvert structure	73
V.L. Snezhko, A.A. Gaisin, M.S. Paliivets Injection flow regulators with flat diffusers.....	81

Hydraulics and engineering hydrology

N.P. Karpenko Ensuring the quality of groundwater resources at the water intakes of the Narskoye deposit.....	90
M.V. Pavlov, D.F. Karpov Determination of the optimal diameter of the heat pipe by solving the optimization problem	97
D.Y. Korotkoruchko, M.S. Ali Determination of power and energy characteristics of variable speed pumps in water supply systems with hydraulic diaphragm tanks	104

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

R.K. Giniyatullin, O.V. Tagirova, A.Y. Kulagin The condition of the hanging birch stands (<i>Betula pendula</i> Roth) and features of accumulation and translocation of metals in the soil-plant system under conditions of man-made pollution (Sterlitamak industrial center, Republic of Bashkortostan)	111
A.V. Solonkin, S.N. Kryuchkov, A.S. Solomentseva, S.A. Egorov, D.A. Gorbushova Technology of growing seedlings of <i>Quercus robur</i> and <i>Juglans nigra</i> in arid conditions.....	120
H.G. Asadov, E.J. Suleymanova, N.H. Mustafazade The method of detecting seasonal changes in landscape formations	129
E.A. Savinich, R.N. Matveeva, O.F. Butorova Varietal and individual variability of three-year common apricot seedlings at introduction in the suburban zone of Krasnoyarsk	134
A.B. Bazaev Unique yew grove in the Alagir forestry of the Republic of North Ossetia-Alania.....	140

Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-6-12>

УДК 631.6



КОМПЛЕКСНАЯ МЕЛИОРАЦИЯ – ОСНОВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И СОХРАНЕНИЯ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ

В.А. Шевченко, Л.В. Кирейчева

Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»); 127434, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44, корп. 2, Россия

Аннотация. Цель исследований: выявление узких мест и определение направлений как научных исследований, так и практических действий по технологическому обеспечению сельского хозяйства комплексными мелиорациями. В статье приведены основные достижения ученых и исследователей Федерального научного центра гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, выполненные за последние 5 лет по государственному заданию. Предложенные научные разработки носят как фундаментальный, так и приоритетно-прикладной характер. Комплексные исследования направлены на восстановление и повышение плодородия существующих мелиорированных земель, на ввод в оборот неиспользуемых площадей. Для этого предложены: перспективные агромелиоративные технологии и технические приемы окультуривания деградированных почв; природоподобные агротехнические и мелиоративные технологии устойчивого повышения плодородия почвы; агрофитомелиоративные приемы восстановления деградированных пастбищных экосистем и лиманных угодий; способы защиты посевов от засух и заморозков. Разработаны и внедрены комбинированные малообъемные системы орошения, интеллектуальная автоматизированная система управления водопользованием (ИАСУ «Водопользование»), биоинженерное сооружение для очистки и снижения минерализации дренажно-сбросных вод с рисовой оросительной системы. Созданы новые гибриды кукурузы и сои, а также технологии их возделывания.

Ключевые слова: комплексная мелиорация, мелиоративные системы, плодородие почвы, природоподобные технологии, фитомелиорация

Формат цитирования: Шевченко В.А., Кирейчева Л.В. Комплексная мелиорация – основа технологического обеспечения продовольственной безопасности и сохранения плодородия почв // Природообустройство. 2025. № 1. С. 6-12. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-6-12>

Scientific article

INTEGRATED LAND RECLAMATION IS THE BASIS FOR TECHNOLOGICAL SUPPORT OF FOOD SECURITY AND PRESERVATION OF SOIL FERTILITY

V.A. Shevchenko, L.V. Kireicheva

Federal State Budgetary Scientific Institution "FNC VNIIGiM named after A.N. Kostyakov"; 127434, Moscow, B. Akademicheskaya str., 44, building 2, Russia

Abstract. The purpose of the research is to identify bottlenecks and identify areas of both scientific research and practical actions for the technological provision of agriculture with integrated land reclamation. The main achievements of scientists and researchers of the Federal Scientific Centre for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, carried out over the past 5 years on the base of state assignment, are presented in the paper. The proposed scientific developments are both fundamental and applied in priority. Comprehensive research is aimed at soil fertility restoration and improvement within existing reclaimed lands, as well as unused areas return into cultivation. Prospect agro-reclamation technologies and techniques to provide degraded soils cultivation are proposed for these purposes, such as nature-approach agrotechnical and reclamation techniques to provide sustainable

improvement of soil fertility; agro-phytomeliorative techniques to restore degraded pasture ecosystems and estuarine lands; methods to protect crops from droughts and frosts. Combined low-volume irrigation systems and an intelligent automated water management system (IAWMS "Water Use") have been developed and implemented, Bioengineered structure for drainage flow and waste water purification and mineralization reducing in the rice irrigation system are suggested. New hybrids of corn and soybeans have been created, as well as technologies for their cultivation.

Keywords: integrated land reclamation, reclamation systems, soil fertility, nature-approach technologies, phytomelioration

Format of citation: Shevchenko V.A., Kireicheva L.V. Integrated land reclamation is the basis for technological support of food security and preservation of soil fertility // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 6-12. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-6-12>

Введение. Мелиорация земель – основа стабильности сельскохозяйственного производства. Она играет существенную роль в повышении продуктивности и устойчивости земледелия, и сегодня уже не требует доказательств тот факт, что пустынные, засушливые, переувлажненные, засоленные, эродированные земли, а также земли, утратившие плодородие, могут быть улучшены с помощью мелиорации. Общими проблемами мелиорации сельскохозяйственных земель для всех природных зон и регионов страны являются предотвращение процессов деградации почв, повышение их плодородия, улучшение эколого-мелиоративной обстановки и интенсификация сельскохозяйственного производства.

К сожалению, деградационные процессы за последние 30 лет снизили продуктивность на значительной площади сельскохозяйственных земель, содержание почвенного гумуса в разных регионах страны уменьшилось на 20% и выше. Процесс сработки запасов почвенного гумуса продолжается и в настоящее время с интенсивностью 1-2 т/га в год, что сопровождается ухудшением свойств и снижением плодородия почв [1].

Представляют серьезную проблему процессы изменения климата, характеризующиеся усилением проявлений экстремальных погодных условий, вызывающих подтопление и затопление больших территорий или повторение катастрофических засух, способствующих нестабильности сельскохозяйственного производства.

Снижение плодородия почв, развитие деградационных процессов, климатические риски, определяемые неустойчивым и неравномерным распределением осадков и тепловых ресурсов на территории страны, существенно влияют на продуктивность посевов и инвестиционную привлекательность сельскохозяйственного производства, что негативно сказывается на продовольственной безопасности нашей страны. Комплексная мелиорация в значительной мере позволяет нивелировать нарастающие негативные

тенденции за счет научного и технологического обеспечения сельского хозяйства.

На современном этапе развития определены и реализуются перспективные научные направления в области земледелия, мелиорации и водного хозяйства. Фундаментальные исследования, выполняемые научными организациями, направлены на повышение продуктивности сельскохозяйственных культур, восстановление деградированных и малопродуктивных земель, улучшение состояния агроландшафтов и повышение почвенного плодородия в условиях современных вызовов.

Приоритетными направлениями в области мелиорации и водного хозяйства следует считать: создание совершенных мелиоративно-водохозяйственных комплексов; авторегуляционных гидромелиоративных систем нового поколения, обеспечивающих автоматическое управление технологическим процессом; оптимизацию управления водопользованием на мелиорированных землях с применением искусственного интеллекта включая точное орошение; широкое применение природоподобных технологий для восстановления плодородия мелиорированных земель, борьбы с опустыниванием и переувлажнением почв. Все это позволит перевести мелиоративную отрасль на современный технологический уровень.

Цель исследований: выявление узких мест и определение направлений как научных исследований, так и практических действий по технологическому обеспечению сельского хозяйства комплексными мелиорациями.

Материалы и методы исследований. Объектом исследований являются технологии и технические приемы повышения эффективности мелиорированных земель средствами комплексной мелиорации.

По данным Департамента мелиорации, в 2020 г. «...из 4,67 млн га орошаемых земель в сельскохозяйственном производстве фактически использовалось 3,86 млн га, а поливы

проведены за счет подачи воды государственными мелиоративными системами на площади 1,69 млн га...», что составляет не более 30% [2]. Текущая продуктивность орошаемых земель незначительно превышает урожайность на богаре: для зерновых культур – на 35%, для овощей – на 32,6%, продуктивность кормовых угодий – на 79,3%, что не соответствует потенциальным возможностям мелиорированных земель. На осушенных землях регулирование водного режима и отвод дренажных вод осуществляется на площади 916,86 тыс. га, то есть только на 19% [2]. В связи с этим современным направлением мелиоративной науки и практики становится повышение эффективности существующего мелиоративного клина и обоснование ввода в мелиоративное производство неиспользуемых земель, вышедших из севооборота.

Проблема сокращения посевных земель и вывода их из оборота затронула значительную территорию России, имеющую неблагоприятные демографические, экономические и агроклиматические условия. На осушаемых землях в хорошем состоянии находится 0,86 млн га, в нормативном (удовлетворительном) – 2,14 млн в неудовлетворительном – 1,78 млн га. Из находящихся в неудовлетворительном экологическом состоянии орошаемых земель на площади 1,78 млн га (37,0% к наличию) отмечаются недопустимо близкое (критическое) залегание грунтовых вод и недопустимые сроки отвода поверхностных вод [2]. Все это приводит к снижению валового сбора сельскохозяйственной продукции.

Для решения поставленных задач в первую очередь необходимо провести агроэкологическую оценку всех мелиорированных земель, в том числе выведенных из оборота, и технико-технологический аудит инженерных мелиоративных систем и сооружений с использованием современных цифровых технологий.

Результаты и их обсуждение. В ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова проводятся комплексные исследования, направленные на восстановление и повышение эффективности мелиоративного комплекса страны. Разработана и адаптирована методика агроэкологической оценки природно-ресурсного потенциала сельскохозяйственных земель, основанная на энергетическом балансе агроэкосистемы. Создана автоматизированная информационно-коммуникационная система для Нечерноземной зоны, которая позволяет пользователю системы получать фактические и оптимальные значения основных климатических, почвенных показателей

и агрохозяйственных условий в режиме реального времени, определять фактическую продуктивность земель и назначать мероприятия по повышению урожайности до потенциально возможной для данной природно-климатической зоны [3].

При введении в оборот неиспользуемых сельскохозяйственных земель в зоне избыточного увлажнения важными научными направлениями наряду с адаптивно-ландшафтным земледелием становятся разработка и внедрение перспективных агромелиоративных технологий и технических приемов окультуривания почв. В Федеральном научном центре гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова разработана и внедрена на объекте ООО «Ручьевское» Тверской области на площади 5297 га эффективная технология, обеспечивающая окультуривание в едином технологическом процессе: внесение мелиорантов по профилю почвы; обогащение органическим веществом в виде навозных стоков пахотного слоя; применение сидеральных культур с разноглубинной заделкой пожнивных остатков и соломы. Это значительно повышает эффективность дальнейшего использования залежных земель в сельскохозяйственном производстве [4, 5].

Для устойчивого земледелия обоснованы природоподобные агротехнические и мелиоративные технологии, в основе которых лежат механизмы, свойственные природным экосистемам:

- максимальное использование биоклиматического потенциала за счет точного регулирования потоков воды и минеральных веществ в агроэкосистеме;

- использование возобновляемых источников углерода, усиливающих биологический круговорот, включая специально разработанные удобрительно-мелиорирующие смеси;

- применение культур – фитомелиорантов, обладающих почвоулучшающим и средостабилизирующим потенциалом (способность давать большую фитомассу и концентрировать питательные вещества);

- направленное использование микробиологических препаратов с целью стимуляции ростовых процессов, азотфиксации (симбиотической и несимбиотической), мобилизации фосфора и калия, деструкции органического вещества и гумификации, защиты растений от патогенов.

Разработкой и исследованием природоподобных технологий для улучшения экологического состояния агроландшафта занимаются также Казанский ФИЦ, ФНЦ зернобобовых и крупяных культур для органического сельского хозяйства, ВНИИ защиты растений для создания новых

средств защиты растений и др. Новое направление требует тесной координации исследований при разработке общих принципов отнесения технологий к природоподобным независимо от того, в какой области знаний они разрабатываются. Это даст возможность разработать показатели и критерии и определить новые эффективные направления в агропроизводстве.

В Федеральном научном центре гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова на основе биосферного подхода дано теоретическое обоснование применения и совершенствования природоподобных технологий для повышения плодородия почвы. Показано, что информация о почвообразовательном процессе находится в почвенной матрице, определяющей тип почвы и ее основные свойства. На минеральной матрице в зависимости от ее размера – удельной поверхности – происходит образование и адсорбция до 70% гумуса. В результате образующаяся органоминеральная матрица является более высокой организационной структурой, определяющей такие параметры почвенного плодородия, как оструктуренность, емкость катионного обмена, порозность и прочность агрегатов. Почвенное плодородие можно увеличить, повышая развитость почвенной матрицы, формируя заданные свойства почвы дополнительным внесением органических и минеральных веществ и другими природоподобными приемами.

Сформулированы оптимальные условия агрономически ценных микроорганизмов для эффективного действия микробиологических препаратов и проведен лабораторный эксперимент по применению биопрепаратов для ускорения разложения пожнивных и корневых остатков, составлены научно-практические рекомендации по применению природоподобных технологий для сохранения и повышения почвенного плодородия. Среди последних важная роль отводится биологическим приемам [6]. Все это позволяет перейти на новый, экологически безопасный уровень управления почвенным плодородием.

К вызовам в сельском хозяйстве относится нарастающее проявление аридизации климата, способствующей опустыниванию земель и деградации пастбищных угодий. Для сдерживания указанных процессов и восстановления деградированных территорий самым эффективным средством является комплексная мелиорация, в первую очередь – обводнение территории, закрепление песков, лесомелиорация, фитомелиорация деградированных пастбищ.

Агролесомелиоративные комплексы следует считать действенной мерой защиты

от опустынивания агроландшафтов. Ученые Федерального научного центра гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова совместно с ФНЦ агроэкологии РАН и Прикаспийским аграрным федеральным центром разрабатывают агрофитомелиоративные приемы восстановления деградированных пастбищных экосистем и лиманных угодий, совершенствуют способы выращивания посадочного материала для закрепления песков аридных территорий. Использование информационных технологий для мониторинга состояния земель, подверженных опустыниванию, с применением ГИС-технологий и актуальной космической информации обеспечивает оперативный контроль и прогноз развития ситуации. Все это позволяет на высоком научном уровне подойти к решению проблемы борьбы с опустыниванием и деградацией пастбищных угодий. Аналогичные исследования проводят и другие научные и образовательные учреждения. Практическое применение научных разработок требует консолидации усилий ученых и практиков для предотвращения негативных последствий опустынивания в условиях изменения климата.

Изменение климата прямым образом влияет на сельское хозяйство и является одним из самых серьезных рисков для земледелия России. Разработанные в ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова карты природной тепло- и влагообеспеченности Европейской части Российской Федерации, представленные в виде интерактивного сетевого ресурса, доступного через глобальную сеть Интернет, позволили выявить значимые тренды увеличения температуры воздуха вегетационного периода южнее линии Брянск – Орел – Липецк – Саратов. Выявленное увеличение температуры воздуха позволяет сделать прогноз потенциального дефицита природного увлажнения. В зоне Саратов – Ростов-на-Дону – Ставрополь – Астрахань возможен рост природного дефицита увлажнения на 10-30%. Поэтому следует полагать, что увеличение дефицита отразится как на продуктивности сельскохозяйственных угодий, так и на состоянии водных объектов [7]. Уже сейчас следует принимать соответствующие меры по увеличению водообеспеченности сельскохозяйственных угодий.

По мере аридизации климата наблюдается снижение устойчивости экосистем к деградации, о чем свидетельствует современное состояние земель на территории Европейской части аридного пояса РФ. В настоящее время, по данным обследования сельхозугодий на площади 1996,43 тыс. га, выполненного в 2020 г. на территории Российской Федерации, наибольшая доля негативных

процессов приходилась на водную (15,5% к общей обследованной площади) и ветровую (8,8%) эрозии. Другие виды негативных процессов также получили распространение, но на значительно меньших площадях: переувлажнение почвы выявлено на 830,73 тыс. га (или 6,4%), засоление почв – на 235 тыс. га (или 1,8%). Наиболее значительные площади со всеми видами рассматриваемых негативных процессов выявлены в Северо-Кавказском, Сибирском, Южном и Приволжском федеральных округах [2].

Причинами развития деградации на мелиорированных землях следует считать устаревшие гидромелиоративные системы, приводящие к непроизводительным потерям воды из межхозяйственной сети, повышенному инфильтрационному питанию на поле ввиду несоответствия оросительных норм водопотреблению сельскохозяйственных культур, нарушению технологического регламента проведения агромелиоративных технологий и пр., что вызывает необходимость решения проблемы разработки высокоэффективных технологий и технических средств гидромелиорации.

В Федеральном научном центре гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова научно обосновано и практически реализовано использование гидромелиоративной системы комбинированного орошения с функцией защиты сельскохозяйственных посевов от климатических рисков. Предложена технология термокомпенсационных поливов, эффективность которой нашла экспериментальное подтверждение при закладке плантаций земляники садовой в Волгоградской области. Полученные данные подтверждают эффективность снижения температуры за счет агротехнических и оросительных мероприятий [8].

Водные мелиорации являются самыми эффективными приемами повышения продуктивности сельскохозяйственных земель и стабильности сельского хозяйства за счет прецизионного регулирования водного, питательного, кислотно-щелочного, теплового и солевого режимов почвы. Осушение переувлажненных земель гарантированно повышает урожайность в 3-5 раза, орошение – в 5-7 раз. ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова является лидером в этом направлении. Учеными Центра разработана и внедрена интеллектуальная автоматизированная система управления водопользованием (ИАСУ «Водопользование») для повышения эффективности использования оросительной воды на государственных мелиоративных системах, обеспечивающая поиск оптимального решения в условиях дефицита. ИАСУ «Водопользование» применяет

методы многокритериального экономико-математического моделирования, искусственного интеллекта, модели-двойников организаций.

Использование искусственного интеллекта дает возможность обрабатывать большой объем пространственной информации с высоким разрешением для разработки рекомендаций по водораспределению с учетом прогнозирования погодных изменений, энергетических затрат и заявок потребителей [9]. Внедрение осуществлено в ФГБУ «Волгоградмелиоводхоз» и его Городищенском филиале с целью оптимизации распределения поливной воды и средств на ремонтно-восстановительные работы в 2023-2024 гг. Экономия ресурсов составила 10% по сравнению с традиционным планированием. В 2023 г. из фактически орошаемой системой площади сельхозугодий, равной 17,94 тыс. га, было полито 13,56 тыс. га, что составляет 75,6%. Для правильного понимания направления дальнейших исследований с применением искусственного интеллекта необходима тесная кооперация в смежных отраслях знаний.

В качестве одного из современных вызовов выступает снижение объема и качества водных ресурсов в зоне интенсивного земледелия на фоне потепления климата. В южных регионах уже сейчас наблюдается дефицит воды, при котором поливается только 40% от используемых орошаемых земель. С целью эффективного использования оросительной воды разработаны научно обоснованные дифференцированные режимы орошения основных культур, позволяющие на 20...25% уменьшить оросительную норму при сохранении урожайности на уровне 5-6 т кор. ед/га. А для улучшения качества оросительной воды разрабатываются малоэнергоёмкие технологии очистки и водоподготовки, представляющие собой биоинженерные сооружения, обеспечивающие комбинированную очистку и снижение минерализации за счет использования высшей водной растительности и природных сорбентов. Биосорбционное сооружение было апробировано в Республике Калмыкия на Сарпинской рисовой оросительной системе. Результаты исследований показали снижение минерализации с 4,30 до 0,49 г/л, ион хлора с 78,2 до 28,1 мг/л, что позволило очищенную воду повторно использовать на орошение риса [10].

Эффективное использование водных ресурсов и интегрированное их управление включены в программу приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова и других мелиоративных и водохозяйственных организаций.

В настоящее время накоплен значительный опыт по разработке способов и технических решений очистки и водоподготовки, который представлен в разработанной Центром базе данных. Считаем необходимым с помощью экспертов обосновать для сферы мелиорации наилучшие доступные технологии и включить их в нормативные документы по проектированию новых гидромелиоративных систем.

Важнейшее направление земледелия, в том числе на мелиорированных землях, связано с обоснованием структуры землепользования и подбором культур, отзывчивых на проведение осушительных и оросительных мелиораций. В Институте орошаемого земледелия (ВНИИОЗ) – филиале ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова – определена структура посевных площадей на орошаемых землях, предложены севообороты разной специализации и ротации культур, системы обработки почв разного гранулометрического состава, установлены нормы и сроки применения удобрений, средства защиты растений. Рекомендованы технологии и технические средства орошения, обеспечивающие высокий уровень продуктивности орошаемых земель при сохранении их плодородия. Разработана и апробирована водосберегающая технология возделывания риса периодическими

поливами на оросительных системах общего назначения. Созданы новые гибриды кукурузы и сои, а также технологии их возделывания. Вопросы селекции, семеноводства и оптимизации посевных площадей в богарных условиях занимается множество научных организаций, однако особенность исследований научного Центра гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова заключается в том, что выполняемые работы ориентированы на орошаемое земледелие.

Выводы

Комплексная мелиорация является основой технологического обеспечения продовольственной безопасности за счет повышения урожайности и сохранения плодородия почв как национального богатства. Она обеспечивает стабильность сельскохозяйственного производства в условиях глобального потепления и развития непредсказуемых климатических и техногенных рисков посредством их нивелирования. Приведенные в статье научные разработки готовы к внедрению во всех природно-климатических зонах. Сдерживающим фактором является готовность сельхозпроизводителя к использованию научных достижений. Для внедрения НТД необходимы привлечение инвестиций и субсидирование товаропроизводителей.

Список использованных источников

1. Шевченко В.А. Современное состояние выбывших из оборота мелиорированных земель и перспективы их освоения: Монография. Москва: Изд-во ВНИИГиМ, 2021. 409 с.
2. Мелиоративный комплекс Российской Федерации: Информационное издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 304 с.
3. Кирейчева Л.В. Информационно-коммуникационная система регулирования параметров мелиоративного состояния агроэкосистемы / Л.В. Кирейчева, А.Д. Тимошкин, А.Л. Аветисян // Природообустройство. 2022. № 3. С. 13-18. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-13-18.
4. Новиков С.А. Эффективные приемы окультуривания залежных земель в Нечерноземной зоне России: Научные рекомендации / С.А. Новиков, В.А. Шевченко, А.М. Соловьев, И.П. Фирсов, И.Н. Гаспарян. Москва, 2014. 43 с.
5. Шевченко В.А. Регулирование кислотного и гумусового состояния деградированных мелиорированных земель Нечерноземной зоны при их вовлечении в сельскохозяйственный оборот / В.А. Шевченко, А.М. Соловьев, Г.И. Бондарева, Н.П. Попова // Научно-методическое обеспечение развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса: Сборник научных трудов. Москва, 2020. С. 197-206. ISBN: 978-5-6042438-4-8.
6. Кирейчева Л.В. Природоподобные технологии повышения плодородия почвы / Л.В. Кирейчева, Т.Ю. Пуховская // Плодородие. 2024. № 3 (138). С. 10-14.
7. Кирейчева Л.В. Оценка тенденций изменения климата в зоне недостаточного увлажнения юга Европейской

References

1. Shevchenko V.A. The current state of reclaimed lands and prospects for their development: monograph. Moscow: VNIIGiM Publishing House, 2021. 409 p.
2. Land reclamation complex of the Russian Federation: inform. edition. Moscow: FSBI "Rosinformagrotech", 2020. 304 p.
3. Kireicheva L.V., Timoshkin A.D., Avetisyan A.L. Information and communication system for regulating the parameters of the reclamation state of the agroecosystem // Prirodoobustrojstvo. 2022. No. 3. P. 13-18. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-13-18.
4. Novikov S.A., Shevchenko V.A., Solovyov A.M., Firsov I.P., Gasparyan I.N. Effective methods of cultivating fallow lands in the Non-Chernozem zone of Russia: scientific recommendations. Moscow, 2014. 43 p.
5. Shevchenko V.A., Solov'ev A.M., Bondareva G.I., Popova N.P. Regulation of acid and humus state of degraded reclaimed lands of the Non-Chernozem zone at their involvement in agricultural turnover. In collection: Scientific and methodological support of development of melioration and water management complex. Collection of scientific works. Moscow, 2020. C. 197-206. ISBN 978-5-6042438-4-8.
6. Kireicheva L.V., Pukhovskaya T.Yu. Nature-like technologies for improving soil fertility // Plodorodniye. 2024. No 3 (138). P. 10-14.
7. Kireicheva L.V., Korneev I.V. Assessment of climate change trends in the zone of insufficient moisture in the south of the European part of Russia and their consideration when

части России и их учет при обосновании орошения / Л.В. Кирейчева, И.В. Корнеев // Орошаемое земледелие. 2023. № 2 (41). С. 19-26.

8. Лытов М.Н. Технология термокомпенсационных поливов при закладке и эксплуатации плантаций земляники на Нижней Волге // Известия НВ АУК. 2024. № 1 (73). С. 98-107. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-10.

9. Рогачев Д.А. Технология управления системным водопользованием с применением методов искусственного интеллекта и моделей-двойников организаций / Д.А. Рогачев, Л.В. Кирейчева, И.Ф. Юрченко, А.Ф. Рогачев // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 4 (400). С. 404-411.

10. Кирейчева Л.В. Агроинженерная технология улучшения качества дренажно-сбросных вод с рисовых оросительных систем / Л.В. Кирейчева, В.А. Супрун // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 6. С. 4-8.

justifying irrigation // Irrigated agriculture. 2023. № 2 (41). P. 19-26.

8. Lytov M.N. Technology of thermocompensation irrigations in the establishment and operation of strawberry plantations on the Lower Volga. Izvestiya NV AUC. 2024. 1(73). 98-107. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-10

9. Rogachev D.A., Kireicheva L.V., Yurchenko I.F. Rogachev, A.F. Technology of system water use management with the use of artificial intelligence methods and models – twin organizations // International Agricultural Journal. 2024 № 4 (400). P. 404-411

10. Kireicheva L.V., Suprun V.A. Agroengineering technology for improving the quality of drainage-discharge water from rice irrigation systems // Melioration and Water Management. 2021. № 6. P. 4-8.

Об авторах

Виктор Александрович Шевченко, академик РАН, д-р с.-х. наук, профессор, директор ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», SPIN-код: 8028-2743; ORCID: 0000-0002-5444-9693; ID РИНЦ 479685; Scopus Author ID 57209792752; WOS Research ID A-8909-2016; shevchenko.v.a@yandex.ru

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

About the authors

Victor A. Shevchenko, DSc (Agro), RAS academician, professor, director of FSBSI FNC “VNIIGiM named after A.N. Kostyakov”; SPIN-code: 8028-2743; ORCID: 0000-0002-5444-9693; ID РИНЦ 479685; Scopus Author ID 57209792752; WOS Research ID A-8909-2016; shevchenko.v.a@yandex.ru

Lyudmila V. Kireicheva, DSc (Eng), professor, head of the scientific direction of the Federal scientific center of hydraulic engineering and land reclamation named after A.N. Kostyakov; ORCID: 0000-0002-7114-2706; kireychevalw@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Шевченко В.А., Кирейчева Л.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 02.12.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 10.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 10.01.2025

Shevchenko V.A., Kireicheva L.V. carried out theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript. They have a copyright to the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-13-20>

УДК 626.86: 631.62:631.11



УТИЛИЗАЦИЯ ДРЕНАЖНОГО СТОКА ОСУШИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

А.Е. Хаджиди^{1✉}, Е.В. Кузнецов¹, А.Е. Новиков^{2,3}¹ Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия² ВНИИОЗ – филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»; 400002, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, 9, Россия³ Волгоградский государственный технический университет; 400005, г. Волгоград, пр-кт им. Ленина, 28, Россия

Аннотация. Цель исследований заключалась в разработке технологии утилизации дренажного стока осушительной системы для сохранения агроресурсного потенциала сельскохозяйственных угодий на примере Темрюкского района Краснодарского края. Оценку природно-климатических и гидрогеологических особенностей территории исследования проводили по агрометеорологическим параметрам с выходом на коэффициент увлажнения Д.И. Шашко, геоморфологическому строению рельефа и геологическому строению подстилающей породы. Осушительная система конструктивно содержит регулируемую открытую сеть протяженностью 17 км для сбора поверхностных вод и отведения дренажного стока, 3-ступенчатый пруд-испаритель, в котором последовательно протекают процессы механической и биологической очистки стока, утилизации естественным испарением, насосную станцию с водосбросом в природный водоток. Рассмотрены основные конструктивные особенности пруда-испарителя и протекающие в нем процессы очистки дренажного стока. По результатам гидрохимического исследования качества дренажного стока после очистки установлено, что воды соответствуют II классу качества с индексом загрязнения 0,86 и могут быть экологически безопасно сброшены в естественный водоток. Таким образом, запроектированный для осушительной системы пруд-испаритель со ступенчатой очисткой дренажного стока механическим и биологическим способами обеспечивает экологически безопасную его утилизацию путем испарения и сброса в р. Казачий Ерик, способствует предотвращению подтопления и переувлажнения сельскохозяйственных земель, сохранению их продуктивности и эффективному использованию.

Ключевые слова: сельскохозяйственные земли, подтопление, переувлажнение, осушительная система, пруд-испаритель, очистка стока, утилизация стока, испарение

Формат цитирования: Хаджиди А.Е., Кузнецов Е.В., Новиков А.Е. Утилизация дренажного стока осушительной системы // Природообустройство. 2025. № 1. С. 13-20. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-13-20>

Original article

UTILIZATION OF DRAINAGE RUNOFF FROM THE DRAINAGE SYSTEM

А.Е. Khadzhidi^{1✉}, E.V. Kuznetsov¹, A.E. Novikov^{2,3}¹ KUBAN State Agrarian University named after I.T. Trubilin; Kalinina St., 13, Krasnodar, 350044, Russia² VNIIOZ – branch of the Federal State Budgetary Institution “FNTS VNIIGiM named after A.N. Kostyakov”, 400002, Volgograd, ul. named after Timiryazev, 9, Russia³ Volgograd State Technical University; 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russia

Abstract. The purpose of the study: to develop a technology for the utilization of drainage runoff of the drainage system to preserve the agro-resource potential of agricultural land on the example of the Temryuk district of the Krasnodar Territory. **Materials and methods.** The assessment of the natural, climatic and hydrogeological features of the study area was carried out according to agrometeorological parameters with access to the moisture coefficient of D.I. Shashko, the geomorphological structure of the relief and the geological structure of the underlying rock. The drainage system structurally contains a 17 km long regulating open network for the collection of surface water and drainage runoff, a 3-stage evaporation pond, in which the processes of mechanical and biological wastewater treatment, utilization by natural evaporation, a pumping station with a spillway into a natural watercourse are sequentially carried out. **Results.** The paper considers the main design features of the evaporation pond and the processes of drainage treatment taking place in it. According to the results of the hydrochemical study of the quality of drainage runoff after treatment, it was found that the water corresponds to quality class II with a pollution index of 0.86 and can be environmentally safely discharged into a natural watercourse. Conclusion: the evaporation pond designed for the drainage system with stage-by-stage treatment of drainage flow by mechanical

and biological methods ensures its environmentally safe disposal by evaporation and discharge into the Kazachy Erik River, contributes to the prevention of flooding and waterlogging of agricultural lands, preservation of their productivity and effective use.

Keywords: agricultural land, flooding, waterlogging, drainage system, evaporation pond, wastewater treatment, wastewater disposal, evaporation

Format of citation: Khadjidi A.E., Kuznetsov E.V., Novikov A.E. Utilization of drainage runoff from the drainage system // Prirodoobustroistvo. 2025. No. 1. P. 13-20. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-13-20>

Введение. В России в последние десятилетия наметилась тенденция роста урожайности сельскохозяйственных культур за счет реализации новых агротехнологий и использования современных селекционных достижений. При этом резервы дальнейшего роста урожайности не исчерпаны, особенно на мелиорированных землях. В условиях Краснодарского края особо остро проявляется проблема подтопления и переувлажнения земель, что обусловлено изменением температурного режима и смещением годовой нормы осадков в сторону осенне-зимнего периода. Проявление этого феномена было отмечено еще в 1987-1988 гг. на площади 280 тыс. га пахотных земель, а затем – более масштабно в 1998-1999 гг. на площади около 550 тыс. га. В Краснодарском крае в 2007 г. было выведено из севооборота по причине переувлажнения почти 19% пашни. В 2023 г. количество выпавших осадков в осенне-зимний период на территории некоторых районов значительно превысило месячные нормы. Особо следует отметить подтопление степных агроландшафтов западной части Кубани на Таманском полуострове.

Для своевременного отвода поверхностных вод из понижений полей, дренажного стока с орошаемых земель в целях предотвращения их переувлажнения и развития ирригационно-эрозийных процессов, сопровождающихся потерей почвенного плодородия, традиционно используют обустройство осушительных каналов по периметру сельхозугодий, создание уклонов от центра к периферии участков пашни, водосборные сооружения, в том числе локальные дренажные колодцы [1, 2]. Такой комплекс агромелиоративных и гидротехнических работ позволяет более эффективно использовать земли сельскохозяйственного назначения [3-5]. Однако при этом возникает проблема утилизации образуемого дренажного стока при сохранении экологической безопасности агроэкосистем [6, 7].

В процессе обследования сельскохозяйственных земель Темрюкского района Краснодарского края были выявлены начальные стадии их деградации ввиду подтопления и переувлажнения почв. Это и предопределило **цель настоящей работы** – разработать технологию

утилизации дренажного стока осушительной системы для сохранения агроресурсного потенциала сельскохозяйственных угодий на локальном уровне.

Материалы и методы исследований. При разработке технологии утилизации дренажного стока на осушительной системе были изучены природно-климатические и гидрогеологические особенности территории.

Климат рассматриваемого региона – умеренно континентальный с недостаточным увлажнением. Лето – сухое и жаркое со средней температурой плюс 24°C, зима – умеренно мягкая и влажная, с октября по март выпадает около 60% осадков. Градиенты атмосферного давления обуславливают слабоустойчивые по направлению ветры в теплый период года и устойчивые по направлению и наибольшие по скорости в холодный период года.

Коэффициент увлажнения территории оценивали по методике Д.И. Шашко^{1,2}:

$$КУ = \frac{\sum P}{\sum d},$$

где $\sum P$ – количество осадков за рассматриваемый период, мм; $\sum d$ – сумма среднесуточных дефицитов влажности за рассматриваемый период (показатель испаряемости), мм.

Анализ среднегодовых значений агрометеопараметров в год 75% обеспеченности осадками подтверждает переувлажнение территории исследования в непродуктивные для вегетации растений месяцы: максимальное увлажнение приходится на ноябрь, декабрь и январь с КУ 3,0; 2,0; 2,68 соответственно. В поздневесенний, летний и раннеосенний периоды осадки преимущественно носят избыточный характер, исключением является май и август, КУ = 0,34 (табл. 1).

Рельеф территории представлен аккумулятивным типом и характеризуется плоской, слегка волнистой поверхностью с общим незначительным уклоном к Темрюкскому заливу.

¹ Шашко Д.И. Агроклиматическое районирование СССР. М.: Колос, 1967. 336 с.

² Шашко Д.И. Агроклиматические ресурсы СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 247 с.

В геологическом строении до разведанной глубины 8,0 м принимают участие четвертичные озерно-речные отложения и делювиальные отложения, перекрытые с поверхности элювиальными и современными техногенными отложениями.

Грунтовые воды вскрыты наблюдательными скважинами на глубине от 3,4 до 4,3 м от устья, что соответствует абсолютным отметкам от «Минус 5,0 м» до «Минус 3,6 м». Уровень моря в отдельных местах – выше отметок поверхности земли. Воды обладают напором 2,4-3,3 м. По условиям залегания грунтовые воды приурочены к четвертичным озерно-речным отложениям. Водовмещающими грунтами являются суглинки мягкопластичные. Основное питание водонесный горизонт получает за счет инфильтрации в грунты атмосферных осадков. По подтопляемости территория исследования относится к подтопляемым. Во влажные периоды года с затяжными осадками и интенсивным снеготаянием происходит временное водонасыщение верхней части грунтовой толщи. В понижениях рельефа

формируются локальные горизонты длительного и временного содержания грунтовых вод.

Схема осушительной системы с учетом проведенной оценки агрометеорологических параметров, геоморфологического строения рельефа и геологического строения подстилающей породы показана на рисунке 1. Система включает в себя регулируемую открытую сеть для сбора и отведения с полей дренажного стока протяженностью почти 17 км, которая устроена с учетом степени расчлененности и других особенностей рельефа, распределения условий питания, а также с возможностью отсечения стока от возвышений и отвода скоплений воды от понижений.

Для очистки и утилизации дренажного стока был запроектирован биологический пруд-испаритель с насосной станцией для водосброса в природный водоток [8, 9]. Его трехступенчатая компоновка с естественной аэрацией обеспечивает последовательное механическое улавливание крупных частиц, биологическую очистку от биогенных элементов и осветление воды.

Таблица 1. Агрометеорологическая характеристика Темрюкского района Краснодарского края

Table 1. Agrometeorological characteristics of the Temryuksky district of the Krasnodar territory

Месяц / Month	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
$\sum P$, мм	81,8	24,4	57,8	32,6	10,3	42,7	10,9	27,1	45,0	41,0	89,0	60,0
$\sum d$, мм	30,5	40	32,3	33,6	30,2	31,2	30,0	27,0	32,3	35,1	34,8	40,5
КУ	2,68	0,61	1,80	0,90	0,34	1,40	0,34	1,0	1,4	1,2	3,0	2,0

Примечание: КУ > 0,60 – избыточное; 0,6-0,45 – хорошее; 0,45-0,35 – умеренное; 0,35-0,25 – полусухое; 0,25-0,15 – засушливое; КУ < 0,15 – сухое.

Note: KY > 0.60 – excessive; 0.6-0.45 – good; 0.45-0.35 – moderate; 0.35-0.25 – semi-arid; 0.25-0.15 – dry; KY < 0.15 – dry.

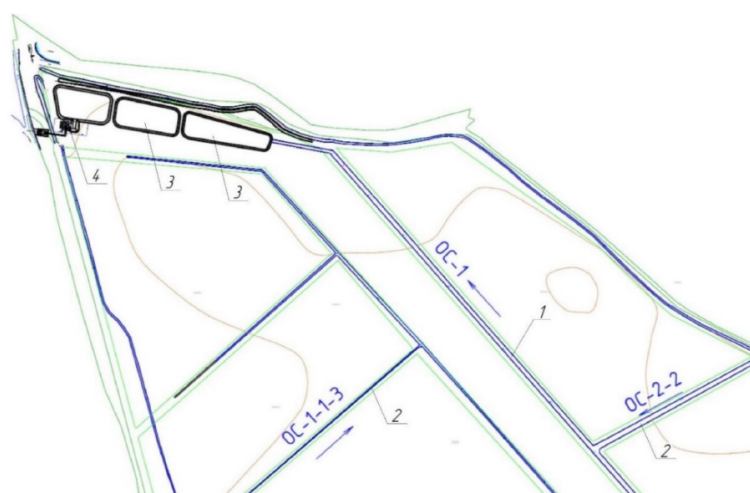


Рис. 1. Фрагмент осушительной системы на подтопляемых и переувлажняемых сельскохозяйственных землях Темрюкского района Краснодарского края:

- 1 – головной сбросной канал-собирающий; 2 – сбросные каналы младшего порядка;
3 – пруд-испаритель; 4 – сбросная насосная станция

Fig. 1. Fragment of a drainage system on flooded and waterlogged agricultural lands of the Temryuksky district of the Krasnodar Territory

- 1 – head discharge canal-collector, 2 – discharge channels of junior order,
3 – evaporation pond, 4 – discharge pumping station

Для определения технологических и размерных параметров пруда-испарителя использовали методику расчета биологических прудов с естественной аэрацией³.

Исследования гидрохимических показателей воды выполняли в сертифицированной аналитической лаборатории в соответствии с природно-нормативными документами.

Комплексную оценку качества очистки дренажного стока проводили по гидрохимическому индексу загрязнения воды (ИЗВ) в соответствии с рекомендованными методическими указаниями⁴:

$$\text{ИЗВ} = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \right) \right] / 6,$$

где i – порядковый номер загрязнителя; n – количество загрязнителей (принято: БПК_5 , O_2 , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Cl^- ; C_i – концентрация загрязнителя i ; ПДК_i – предельно допустимая концентрация загрязнителя i .

Результаты и их обсуждение. По результатам расчета параметров пруда-испарителя (табл. 2), на основании исходных данных модуля стока рассматриваемой территории, фактической концентрации органических загрязнений и предельно допустимой концентрации этих загрязнений в стоке перед сбросом в объекты рыбохозяйственного значения⁵, а также рекомендаций по корректировке глубины накопителя в соответствии со значением $\text{БПК}_{\text{полн}}$ воды, поступающей на очистку (при $\text{БПК}_{\text{полн}} \leq 20$ мг/л, глубина пруда с учетом промерзания в холодный период года – 3,5 м) [10], в разработку принят пруд общей площадью 35200 м².

Пруд (рис. 2) выполнен в выемке с заложением откосов 1,0:1,5; каждая ступень покрыта

гидроизоляционной полиэтиленовой мембраной, по иглопробивному геотекстилю на подготовленном основании, что интенсифицирует процессы прогрева и утилизации воды с испарением [8], а также предотвращает вторичное засоление почвы в процессе инфильтрации. Последняя ступень относительно течения стока используется для аккумуляции и конечного испарения воды.

Ступени пруда гидравлически связаны между собой железобетонным трубопроводом диаметром 600 мм и подводящим каналом. Пропуск воды осуществляется регулятором через плоский щитовой затвор размером 600×600 мм, который крепится на оголовок и оборудуется сороудерживающей решеткой с ячейкой 50×50 мм. Все ступени снабжают струенаправляющими шпорами, выполненными из 10 фильтрующих элементов (рис. 3), установленных в ряд и состоящих из габионных сеток двух размеров: нижняя часть – 2,0×1,0×0,5 м; верхняя часть – 2,0×2,0×0,5 м. Нижняя часть выполняет роль основания и заполняется твердым сыпучим наполнителем для устойчивости конструкции, а верхняя часть – растительными остатками из камыша и фашины, что позволяет образовать благоприятную среду для развития микроорганизмов. При поступлении в пруд-испаритель дренажного стока статическая нагрузка на фильтрующие элементы с обеих сторон уравнивается, а давление при динамической нагрузке не превышает допустимых величин для их опрокидывания.

В процессе утилизации дренажного стока осушительной системы на первой ступени пруда вода очищается от механических примесей.

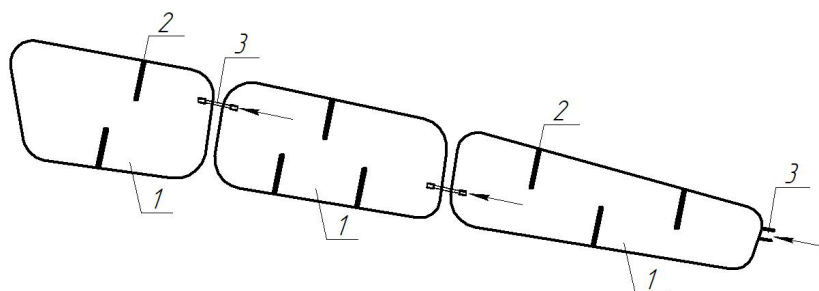


Рис. 2. Схема пруда-испарителя дренажного стока:

1 – ступени пруда; 2 – струенаправляющие шпоры; 3 – регулятор пропускания воды

Fig. 2. Diagram of the drainage evaporator pond

1 – stages of the pond; 2 – directional spurs; 3 – water flow regulator

³ СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. М.: ФГУП ЦПП, 2006. 87 с.

⁴ Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям; введ. Госкомгидрометом 22 сентября 1986 г.

⁵ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Минсельхоза России от 13 декабря 2016 г. № 552.

Таблица 2. Расчёт технологических и размерных параметров пруда-испарителя
Table 2. Calculation of technological and dimensional parameters of the evaporation pond

Наименование параметра Parameter name	Обозначение Designation	Размерность Dimension	Величина Value
Исходные данные / Source data			
Расход стока / Runoff discharge	Q_w	$\frac{м^3}{сут}$ $\frac{m^3}{day}$	13900
БПК _{полн} стока на входе в пруд BOD_{full} of runoff at the entrance to the pond	L_{en}	$\frac{мг}{л}$ $\frac{mg}{l}$	5,12
БПК _{полн} стока на выходе из пруда BOD_{full} of runoff at the exit from the pond	L_{ex}	$\frac{мг}{л}$ $\frac{mg}{l}$	3,0
Средняя температура стока Average temperature of the runoff	T	$^{\circ}C$	16
Справочные данные / Reference data			
Число ступеней / Number of stages	N	–	3
Коэффициент объёмного использования ступеней пруда Coefficient of volumetric use of pond stages	K_{lag}	–	0,35
Константа скорости потребления кислорода на: Oxygen consumption rate constant at: - 1-й и 2-й ступенях / 1st and 2nd stages - 3-й ступени / 3rd stage	$k_{1,2}$ k_3	$\frac{сут^{-1}}{day^{-1}}$	0,08 0,07
Концентрация кислорода в воде, выходящей из пруда Concentration of oxygen in the water flowing out from the pond	C_{ex}	$\frac{мг}{л}$ $\frac{mg}{l}$	2,0
Атмосферная аэрация при дефиците воздуха, равном единице Atmospheric aeration at the air deficit equal to one	r_a	$\frac{г}{(м^2 \cdot сут)}$ $\frac{g}{(mg^2 \cdot day)}$	3,5
Расчётные параметры / Calculated parameters			
Растворимость кислорода воздуха в воде (при давлении 0,1 МПа) Solubility of air oxygen in water (at pressure 0.1 MPa)	C_a	$\frac{мг}{л}$ $\frac{mg}{l}$	9,8
Степень очистки по БПК _{полн} на: / Degree of treatment according to BOD_{full} at: - 1-й ступени (принято 25%) / 1 st stage (accepted 25%) - 2-й ступени (принято 35%) / 2 nd stage (accepted 35%) - 3-й ступени (принято 40%) / 3 rd stage (accepted 40%)	L_{en1} L_{en2} L_{en3}	$\frac{мг}{л}$ $\frac{mg}{l}$	4,59 3,85 3,00
Время пребывания стока в пруде на / Runoff time in the pond at: - 1-й ступени / 1 st stage - 2-й ступени / 2 ^d stage - 3-й ступени / 3 rd stage	t_{lag1} t_{lag2} t_{lag3}	$\frac{сут}{day}$	1,7 2,7 10,9
Объём пруда на / Volume of the pond at: - 1-й ступени / 1 st stage - 2-й ступени / 2 nd stage - 3-й ступени / 3 rd stage	W_{lag1} W_{lag2} W_{lag3}	$м^3$	23559 37903 61466
Площадь пруда на / Square of the pond at: - 1-й ступени / 1 st stage - 2-й ступени / 2 nd stage - 3-й ступени / 3 rd stage	F_{lag1} F_{lag2} F_{lag3}	$\frac{м^2}{m^2}$	8815 10550 12118
Глубина пруда на / Depth of the pond at: - 1-й ступени / the 1 st stage - 2-й ступен / the 2 nd stage - 3-й ступени / the 3 rd stage	H_{lag1} H_{lag2} H_{lag3}	$М$	2,7 3,6 5,1
Принятые параметры / Accepted parameters			
Глубина пруда / Depth of the pond	H_{lag}	$М$	3,5
Площадь пруда на / Square of the pond at: - 1-й ступени / 1 st stage - 2-й ступени / 2 nd stage - 3-й ступени / 3 rd stage	F_{lag1} F_{lag2} F_{lag3}	$\frac{м^2}{m^2}$	6750 10850 17600

В собранных дренажных водах, транспортируемых открытым способом, накапливается различный мусор, в том числе мелкие камни и остатки растений. Крупный мусор на входе в пруд задерживается на сороудерживающих решетках, далее более мелкая дисперсная фаза отделяется от жидкой под действием гравитационной силы и осаждается на дно накопителя. Для снижения скорости воды в пруде и увеличения длины пути потока в накопителе устроены поперечные струенаправляющие шпоры.

На следующей ступени протекают процессы биологической очистки воды от биогенных элементов. Продуцируемый микробиоценоз на растительных наполнителях в фильтрующих элементах в процессе своей жизнедеятельности поглощает продукты загрязнения и осветляет дренажный сток. Такие биофильтры устраняют из очищаемой воды фосфор, азот и другие органические примеси [11-13]. Проведенные мероприятия уменьшают нагрузку на естественный водоток, куда в дальнейшем происходит сброс очищенной воды.

На третьей ступени происходит уменьшение количества собранных и очищенных вод перед сбросом в естественный водоток – в р. Казачий Ерик (левый рукав дельты р. Кубань), впадающий в Ахтанизовский лиман, за счет испарения с водной поверхности пруда.

Натурные исследования гидрохимических показателей воды дренажного стока до и после

очистки, осредненные за сезон, а также фоновое значение загрязнений в естественном водотоке приведены в таблице 3.

Воды р. Казачий Ерик по гидрохимическому индексу загрязнения воды относятся ко II классу качества ($0,3 < \text{ИЗВ} \leq 1,0$) и характеризуются как $\text{ИЗВ} = 0,42$. В дренажном стоке, поступающем в пруд из сбросных каналов, концентрация нитратов, нитритов и хлоридов

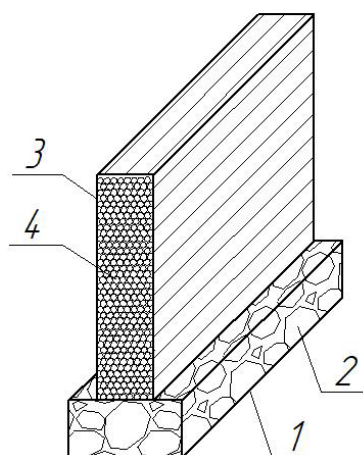


Рис. 3. Схема фильтрующего элемента:

- 1 – нижняя часть;
2 – твердый сыпучий наполнитель;
3 – верхняя часть;
4 – растительный наполнитель

Fig. 3. Diagram of the filter element

- 1 – lower part; 2 – solid bulk filler;
3 – upper part; 4 – vegetable filler

Таблица 3. Результаты качественного анализа изучаемых вод, мг/л

Table 3. Results of qualitative analysis of the studied waters, mg/l

Параметр Parameter	Естественный водоток (фон) Natural water flow (background)	Норма, ПДК ^{px} $\frac{\text{ПДК}^{\text{ИЗВ}}}{\text{МРС}^{\text{рыб}}}$ Norm, $\frac{\text{MPC}^{\text{fishery3}}}{\text{MPC}^{\text{agri4}}}$	C _i		C _i к ПДК	
			до очистки before treatment	после очистки after treatment	до очистки before treatment	после очистки after treatment
Взвешенные вещества Suspended substances	30,2	фон + 0,75	101,2	14,2	3,27	0,46
pH, ед. / pH, units	7,7	6,5-8,5	8,2	7,8	–	–
БПК ₅ / BOD ₅	1,6	$\frac{2,1}{*}$	3,58	1,88	1,79	0,63
Растворённый кислород Dissolved oxygen	7,57	$\frac{> 6,0}{**}$	6,23	7,17	0,96	0,84
Нитрат-анион / Nitrate-anion	2,0	40	45	39	1,13	0,98
Нитрит-анион / Nitrite-anion	0,04	0,08	0,10	0,07	1,25	0,88
Сульфат-анион / Sulfate-anion	56	100	196	137	1,96	1,37
Хлорид-анион / Chloride-anion	17	300	177	143	0,59	0,48
ИЗВ / WPI (Water pollution index)	0,42	–	–	–	1,28	0,86

* БПК₅ ≤ 3 мг/л, норма – 3; 3 < БПК₅ ≤ 15 мг/л, норма – 2;

**6 < O₂ мг/л, норма – 6.

* BOD₅ ≤ 3 mg/l, norm – 3; 3 < BOD₅ ≤ 15 mg/l, norm – 2;

**6 < O₂ mg/l, norm – 6.

несколько превышает ПДК, но имеет более существенную разницу по сравнению с их содержанием в естественном водотоке. Растворенный кислород и водородный показатель находятся в диапазоне допустимых пределов, а количество взвешенных веществ выше фонового значения более чем в 3 раза. С учетом рассчитанного индекса загрязнения дренажного стока (ИЗВ = 1,28) его воды характеризуются как умеренно загрязненные (III класс качества).

Результаты исследования дренажного стока после его комплексной очистки в пруде-испарителе свидетельствуют о значимом повышении качества воды. В частности, содержание взвешенных веществ снижено более чем в 7 раз за счет очистки на сороудерживающих решетках и осаждения частиц на каждой из ступеней. При этом индекс загрязнения воды, равный 0,86, хотя и несколько выше значения показателя естественного водотока, тем не менее соответствует II классу качества воды и требованиям для сброса в поверхностные водоисточники рыбохозяйственного значения.

Список использованных источников

1. Гулюк Г.Г. Некоторые технические приемы по отводу поверхностных вод / Г.Г. Гулюк, В.И. Глухарев // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 3. С. 3-5.
2. Дрововозова Т.И. Совершенствование технического подхода к управлению процессом локальной очистки дренажного стока с орошаемых земель / Т.И. Дрововозова, А.А. Кириленко // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 94-108. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-94-108.
3. Митрофанов Ю.И. Эффективность осушения переувлажненных почв в обеспечении высокопродуктивного земледелия / Ю.И. Митрофанов, О.Н. Анциферова, Н.К. Первушина // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2022. № 5. С. 47-52. DOI: 10.31857/2500-2082/2022/5/47-52.
4. Кирейчева Л.В., Супрун В.А. Очистка дренажных вод – важное направление водосбережения в орошаемом земледелии // Известия НВ АУК. 2023. № 2 (70). С. 65-71. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-07.
5. Дрововозова Т.И. Оценка качества дренажных вод с оросительных систем Сибирского федерального округа / Т.И. Дрововозова, М.В. Власов, С.А. Манжина // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2023. № 2 (90). С. 113-120.
6. Robson J.F., Stoner R.F., Perry J.H. Disposal of Drainage Water from Irrigated Alluvial Plains // Water Science & Technology. 1984. Vol. 16, No. 5-7. Pp. 41-55. DOI: 10.2166/wst.1984.0121.
7. Lee E.W. Treatment, Reuse and Disposal of Drainage Waters // Water Science & Technology. 1991. Vol. 24, No. 5. Pp. 183-188. DOI: 10.2166/wst.1991.0124.
8. Патент № 2807694 С1. Российская Федерация, МПК E02B11/00. Пруд-испаритель дренажного стока: № 2023101389; заявл. 23.01.2023; опубл. 21.11.2023

Выводы

Особенности увлажнения территории Таманского полуострова в непродуктивные для вегетации сельскохозяйственных культур месяцы провоцируют подтопление и переувлажнение земель, выведение их из оборота. Для отведения избыточных поверхностных вод из понижений сельскохозяйственных земель Темрюкского района Краснодарского края поля обустроены регулирующей открытой осушительной системой. Для решения проблемы улучшения качества дренажного стока в целях его сброса в природный водоем рыбохозяйственного значения спроектирован пруд-испаритель площадью 35200 м² со ступенчатой очисткой воды механическим и биологическим способами и частичной ее утилизацией при естественном испарении. Результаты качественного анализа очищенного таким образом стока показывают его соответствие экологическим требованиям для сброса в поверхностные водоисточники рыбохозяйственного значения. Осушительная система имеет перспективу широкого применения на практике при модернизации, реконструкции и новом строительстве мелиоративных систем.

References

1. Guliuk G.G., Glukharev V.I. Some technical practices for surface water drainage // Melioration and Water Management. 2022. No. 3. P. 3-5.
2. Drovovozova T.I., Kirilenko A.A. Improving the technical approach to managing the process of local treatment of drainage runoff from irrigated lands // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 94-108. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-94-108.
3. Mitrofanov Yu.I., Antsiferova O.N., Pervushina N.K. Efficiency of saturated with water soils drainage in ensuring highly productive agriculture // Vestnik of the Russian agricultural science. 2022. No. 5. P. 47-52. DOI: 10.31857/2500-2082/2022/5/47-52.
4. Kireycheva L.V., Suprun V.A. Drainage water treatment is an important area of water conservation in irrigated agriculture // Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp. 2023. No. 2(70). P. 65-71. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-07.
5. Drovovozova T.I., Vlasov M.V., Manzhina S.A. Assessment of the quality of drainage water from irrigation systems of the Siberian Federal District // Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2023. No. 2 (90). P. 113-120.
6. Robson J.F., Stoner R.F., Perry J.H. Disposal of Drainage Water from Irrigated Alluvial Plains // Water Science & Technology. 1984. Vol. 16, No. 5-7. P. 41-55. DOI: 10.2166/wst.1984.0121.
7. Lee E.W. Treatment, Reuse and Disposal of Drainage Waters // Water Science & Technology. 1991. Vol. 24, No. 5. P. 183-188. DOI: 10.2166/wst.1991.0124.
8. Patent 2807694 Russian Federation, IPC E02B11/00. Evaporation pond for drainage runoff / Kuznetsov E.V., Kili-di Kh.I., Khadzhi A.E., Kurtnezirov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "

/ Е.В. Кузнецов, Х.И. Килиди, А.Е. Хаджиди, А.Н. Куртнезир; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

9. Патент № 2810747 С1. Российская Федерация, МПК E02B11/00. Способ утилизации дренажного стока: № 2023106304: заявл. 16.03.2023; опубл. 28.12.2023 / Е.В. Кузнецов, Х.И. Килиди, А.Е. Хаджиди, А.Н. Куртнезир; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

10. Дугин Е.А. Совершенствование технологии биологической очистки сточных бытовых вод на основе разработки малогабаритной станции: Автореф. дис ... канд. техн. наук. Волгоград, 2023. 20 с.

11. Новиков А.Е. Моделирование гидродинамических и биоэкологических процессов очистки многокомпонентных систем от дисперсной фазы: Монография / А.Е. Новиков, А.Б. Голованчиков, Е.А. Дугин, М.И. Филимонов. Волгоград: ВолГГАУ, 2019. 200 с.

12. Novikov A., Lamskova M., Dugin E., Filimonov M., Grigorov S., Poddubskiy A., Chamurliiev G. Modeling of enzymatic waste water treatment // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1553 (1), № 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/1553/1/012023.

Об авторах

Анна Евгеньевна Хаджиди, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения; Author ID: 509767, ORCID: 0000-0002-1375-9548; dtn-khanna@yandex.ru

Евгений Владимирович Кузнецов, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов; Author ID: 176848, ORCID: 0000-0003-0524-8390; dtn-kuz@rambler.ru

Андрей Евгеньевич Новиков, д-р техн. наук, член-корр. РАН, директор ВНИИОЗ – филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», заведующий кафедрой Процессы и аппараты химических и пищевых производств; Author ID: 619181, ORCID: 0000-0002-8051-4786; ae_novikov@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Хаджиди А.Е., Кузнецов Е.В., Новиков А.Е. выполнили теоретические и практические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Хаджиди А.Е., Кузнецов Е.В., Новиков А.Е. имеют. на статью авторские права 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 эквивалентный вклад в подготовку публикации / All the authors contributed equally to this article

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 26.04.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 09.12.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 09.12.2024

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trublina. Publ. 11/21/2023.

9. Patent 2810747 Russian Federation, IPC E02B11/00. Method for utilization of drainage runoff / Kuznetsov E.V., Kilidi Kh.I., Khadzhidi A.E., Kurtnezirov A.N.; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education" Kuban State Agrarian University named after I.T. Trublina" Publ. 12.28.2023

10. Dugin E.A. Improving the technology of biological treatment of domestic wastewater based on the development of a small-sized station: abstract of thesis. dis. ...cand. tech. sciences: 01.04.05 / Dugin Evgeniy Aleksandrovich. Volgograd, 2023. 20 p.

11. Novikov A.E. Modeling of hydrodynamic and bioecological processes of purification of multicomponent systems from dispersed phase: monograph / A.E. Novikov, A.B. Golovanchikov, E.A. Dugin, M.I. Filimonov. Volgograd: Volg-gas, 2019. 200 p.

12. Novikov A., Lamskova M., Dugin E., Filimonov M., Grigorov S., Poddubskiy A., Chamurliiev G. Modeling of enzymatic waste water treatment // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1553 (1), № 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/1553/1/012023.

About the authors

Anna E. Khadzhidi, DSc (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Hydraulics and Agricultural Water Supply; Author ID: 509767, ORCID ID: 0000-0002-1375-9548; dtn-khanna@yandex.ru

Evgeniy V. Kuznetsov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Construction and Operation of Water Management Facilities, Author ID: 176848, ORCID ID: 0000-0003-0524-8390; dtn-kuz@rambler.ru

Andrey E. Novikov, DSc (Eng), Corresponding Member of RAS, Director, VNIIOZ Branch of the VNIIGiM, Volgograd, Russian Federation; Head of the Department Processes and Devices of Chemical and Food Production; Author ID: 619181, ORCID: 0000-0002-8051-4786; ae_novikov@mail.ru.

Khadzhidi A.E., Kuznetsov E.V., Novikov A.E. carried out theoretical and practical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript.

Khadzhidi A.E., Kuznetsov E.V., Novikov A.E. have copyright on the article and are responsible for plagiarism

Оригинальная статья
<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-21-26>
УДК 631.674.4:626.844



ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТУРОВ УВЛАЖНЕНИЯ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ И ВНУТРИПОЧВЕННОЙ УКЛАДКЕ КАПЕЛЬНОЙ ЛЕНТЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КАРТОФЕЛЯ

Н.Б. Мартынова[✉], Л.А. Журавлева

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. Цель исследований – сравнить способы поверхностной и внутрипочвенной укладки капельной ленты, проанализировать достоинства и недостатки обеих технологий, сравнить тяговые сопротивления, возникающие при поверхностной и внутрипочвенной укладке капельной ленты; по результатам исследований предложить рациональный способ укладки капельной ленты, позволяющий наиболее рационально использовать поливную воду и не требующий повышенных энергозатрат. Для сравнения поверхностного и внутрипочвенного способов укладки капельной ленты были исследованы по приведенным методикам тяговые сопротивления, возникающие при укладке капельной ленты. Данные тяговых сопротивлений, возникающих при обоих способах укладки капельной ленты, были получены также в лабораторных условиях и сравнивались с результатами теоретических исследований. Были исследованы геометрические параметры контура увлажнения при обоих способах укладки капельной ленты, для чего была разработана оригинальная методика, полученные данные также проверялись в лабораторных условиях. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что при внутрипочвенной укладке капельной ленты, если глубина укладки не превышает 0,1 м, не наблюдается существенного роста тяговых сопротивлений по сравнению с поверхностной укладкой. При этом полученная форма поливного контура лучше охватывает корневое пространство, сокращая зону поверхностного смачивания и, следовательно, потери на испарение поливной воды. Внутрипочвенный способ укладки капельной ленты может быть рекомендован как наиболее перспективный, так как позволяет существенно экономить поливную воду, не приводя к росту тяговых сопротивлений при прочих достоинствах внутрипочвенной укладки: прямолинейное расположение капельной ленты с минимальными отклонениями от горизонтали существенно снижает потери напора в ленте; внутрипочвенное расположение не допускает перегрева воды, а следовательно, ее губительного действия на корневую систему в жаркое время года.

Ключевые слова: капельная лента, внутрипочвенная укладка, поверхностная укладка, контур увлажнения, сопротивление укладке, корнеобитаемое пространство

Формат цитирования: Мартынова Н.Б., Журавлева Л.А. Особенности формирования контуров увлажнения при поверхностной и внутрипочвенной укладке капельной ленты при выращивании картофеля // Природообустройство. 2025. № 1. С. 21-26. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-21-26>

Scientific article

FEATURES OF FORMATION OF MOISTURE CONTOURS DURING SURFACE AND INTRA-SOIL LAYING OF DRIP TAPE WHEN GROWING POTATOES

N.B. Martynova[✉], L.A. Zhuravleva

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

Abstract. The purpose of the study: to compare the methods of surface and intra-soil drip tape laying, to analyze the advantages and disadvantages of both technologies, to compare the traction resistances that occur during surface and intra-soil drip tape laying. Based on the results of the research, to propose a rational method of laying drip tape, which allows the most rational use of irrigation water and does not require increased energy consumption. Research methods. To compare the surface and intra-soil methods of drip tape laying, the traction resistances that occur during drip tape laying were studied using the above methods. The data of traction resistances arising from both methods of drip tape laying were also obtained in laboratory conditions and compared with the results of theoretical studies. The geometric parameters of the moisture contour in both methods of laying drip tape were investigated, an original

technique was developed for this, and the data obtained were also checked in laboratory conditions. Research results. The data obtained allow us to conclude that during intra-soil laying of drip tape, if the laying depth does not exceed 0.1 m, there is no significant increase in traction resistances, compared to surface laying. At the same time, the resulting shape of the irrigation circuit better covers the root space, reducing the zone of surface wetting, and, consequently, losses due to evaporation of irrigation water. Findings. The intra-soil method of laying drip tape can be recommended as the most promising, as it allows you to significantly save irrigation water without leading to an increase in traction resistances with other advantages of subsoil laying: the straight-line arrangement of the drip tape, with minimal deviations from the horizontal, significantly reduces head loss in the tape; The intra-soil location does not allow water to overheat, and, consequently, its detrimental effect on the root system, in the hot season.

Keywords: drip tape, intra-soil laying, surface laying, moisture contour, laying resistance, root-inhabited space

Format of citation: Martynova N.B., Zhuravleva L.A. Features of the formation of moisture contours during surface and intra-surface laying of drip tape when growing potatoes // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 21-26. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-21-26>

Введение. Основным преимуществом капельного полива считается существенная экономия поливной воды благодаря ее доставке непосредственно в корнеобитаемое пространство [1]. Немаловажным преимуществом является возможность производства отечественными предприятиями – такими, как ООО «Угличский завод полимеров», НПО «Агрополимер», ЗАО «Новый век агротехнологий», ООО «Виола», полного перечня технологического оборудования: лент, фитингов, контрольного оборудования [2]. В последнее время указанные предприятия наращивают мощности, но произошла замена импортного оборудования на отечественное. Общая доля территорий, занятых капельным поливом, невелика среди орошаемых земель и составляет менее 10% [3]. Одной из причин низких темпов распространения капельного полива является отсутствие специальных машин, предназначенных для укладки капельной ленты. Используемые для этих целей кустарно изготовленные приспособления не обеспечивают требуемого качества работ, что в итоге приводит к обрыву или перекручиванию ленты, делающей невозможным работу системы капельного полива и требующей проведения ремонтных работ. Специальные машины, предназначенные для поверхностной и внутрипочвенной укладки капельной ленты, с регулированием глубины заложения ленты и ее постоянного натяжения в процессе укладки, для исключения обрывов и перекручивания, выпускаются американскими фирмами Andros и Rain Flo. Их закупка является нерентабельной, а с учетом непростой внешнеполитической ситуации – вряд ли возможной [4].

Капельная лента может быть уложена как поверхностно, так и внутрипочвенно. Поверхностная укладка часто совмещается с укладкой пленки. При таком способе укладки лента не отклоняется от заданного положения. Однако

в жаркую погоду поливная вода от нагретой под солнцем темной пленки может также нагреться до опасных для растения температур. Существуют технические разработки, направленные на устройство небольшого углубления, для уменьшения пятна контакта капельной ленты с пленкой, однако в конструкции выпускаемых машин подобные технические усовершенствования введены не были [5]. При поверхностной укладке ленты без пленки возможно отклонение капельной ленты от заданного положения в процессе эксплуатации системы в связи с ростом растения или под действием ветра. Это создаст дополнительные сопротивления движению потока воды, что нежелательно для некомпенсированных капельниц, значительные отклонения могут привести к выходу из строя системы полива. При внутрипочвенной укладке лента занимает заданное положение, так как в почве лента размещается из направляющей трубы. Отклонения от заданного положения незначительны благодаря постоянному натяжению ленты, не зависящему от скоростных колебаний базовой машины. При обратной засыпке положение ленты в почве фиксируется. При внутрипочвенном расположении ленты вода непосредственно проникает в корнеобитаемое пространство, при этом потери на испарение практически отсутствуют, а фильтрация воды в нижележащие слои сведена к минимуму. Однако при таком способе укладки капельной ленты возникают дополнительные сопротивления, которые следует учитывать при выборе способа укладки ленты.

Цель исследований: сравнить способы поверхностной и внутрипочвенной укладки капельной ленты, проанализировать достоинства и недостатки обеих технологий, сравнить тяговые сопротивления, возникающие при поверхностной и внутрипочвенной укладке капельной ленты;

по результатам исследований предложить рациональный способ укладки капельной ленты, позволяющий наиболее рационально использовать поливную воду и не требующий повышенных энергозатрат.

Материалы и методы исследований.

В процессе укладки капельной ленты в случае внутрипочвенной укладки возникают силы сопротивления разработки грунта и укладки ленты в почву, а также сила инерции катушки капельной ленты. Суммарное сопротивление укладки капельной ленты определим по формуле [6]:

$$F_o = F_{cp} + F_{ик} + F_{дк} + F_{то} + F_{ты} = \mu \cdot G_y + k_p \cdot h_p \cdot b_3 + \varepsilon \cdot h_p \cdot b_3 \cdot v_y^2 + \omega_d \cdot r_k \cdot \delta_{вр} \cdot i_t^{-1} + (f_o \cdot G_k \cdot d_o \cdot d_k^{-1} + 2 \cdot G_k \cdot l_o \cdot d_k) \cdot (1 + e^{f_o \beta}), \quad (1)$$

где F_{cp} – сопротивление грунта разработке, Н; $F_{ик}$ – сила инерции катушки с лентой, Н; $F_{дк}$ – сопротивление от дисбаланса катушки, Н; $F_{ты}$ – сила трения ленты в направляющей трубе, Н; $F_{то}$ – сила трения катушки об ось, Н; μ – коэффициент трения грунта о поверхность рабочего органа; G_y – вес укладчика, Н; k_p – удельное сопротивление грунта резанию, Па; h_p – глубина укладки, м; b_3 – ширина захвата, м; ε – удельное сопротивление грунта подъему, Па; v_y – скорость базовой машины, м/с; ω_d – угловая скорость колесного вала, с⁻¹; r_k – радиус ходового колеса, м; $\delta_{вр}$ – коэффициент учета вращающихся масс; i_t – передаточное число трансмиссии; f_o – коэффициент трения оси в подшипниках; G_k – вес катушки ленты, Н; d_o – диаметр оси катушки, м; d_k – диаметр катушки, м; l_o – смещение центра тяжести катушки от оси вращения, м; β – угол обхвата ленты, м.

Если имеют дело с поверхностной укладкой капельной ленты, то пленку и ленту часто размещают единой бухтой. В этом случае возникают сопротивления дисбаланса бухты, трение ее об ось, а также сила инерции. Следовательно, итоговое сопротивление укладке пленки и ленты будет выглядеть как

$$F_{по} = F_{иб} + F_{дб} + F_{тб} = \omega_d \cdot r_k \cdot \delta_{вр} \cdot i_t^{-1} + 2 \cdot G_b \cdot l_o \cdot d_b^{-1} + 2 \cdot G_k \cdot l_o \cdot d_k^{-1} \cdot e^{f_o \beta}, \quad (2)$$

где $F_{иб}$ – сила инерции катушки с лентой, Н; $F_{дб}$ – сопротивление от дисбаланса бухты, Н; $F_{тб}$ – сила трения бухты об ось, Н; G_b – вес катушки ленты, Н; $d_{об}$ – диаметр оси бухты, м; d_b – диаметр бухты, м; l_b – смещение центра тяжести бухты от оси вращения, м.

Небольшая разница обусловлена значительной массой бухты с пленкой и, следовательно, повышенным трением об ось и инерционными силами [7]. Дальнейшими исследованиями следует оценить параметры контура увлажнения при поверхностной и внутрипочвенной укладке.

Поскольку движение воды в почве происходит под действием гравитационной и капиллярной силы в вертикальной плоскости, а горизонтальной – только под действием капиллярной

силы, то движение капли следует рассматривать отдельно в каждой плоскости.

Движение воды в вертикальной плоскости может быть описано уравнением [8]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial W}{\partial z} + M \frac{\partial^2 W}{\partial t \partial z} \right), \quad (3)$$

где W – относительная влажность почвенного слоя; D – коэффициент диффузивности воды, находящейся в почве; t – время работы капельницы, с; M – общая минерализация, мг/л.

Коэффициент диффузивности почвы можно определить из выражения:

$$D = \frac{K_f^2 \sqrt{\frac{1}{v} \ln \frac{W_m - W_0}{W_1 - W_m}} W_m}{1 - \left(\frac{W_m}{W_1} \right)^3} \left(\frac{W_m - W_0}{W_1 - W_m} \right)^5 \times \left(\frac{1}{W_0^2} + 2 \frac{W_0}{W_1^3} \right) \cdot e^{\beta(W_m - W_0)}, \quad (4)$$

где K_f – коэффициент пористости; W_0 – начальная влагоемкость; W_1 – предельная полевая влагоемкость; W_m – текущая влагоемкость; v – коэффициент, зависящий от категории грунта; β – параметр, зависящий от пористости почвы и ее влажности.

Указанный параметр следует определить по формуле:

$$\beta = \frac{1}{W_1 - W_0} \ln \left(\frac{3(W_1 - W_m)^5}{W_1^2 (W_m - W_0)^5 \left(\frac{1}{W_0^2} + 2 \frac{W_0}{W_1^3} \right)} \right). \quad (5)$$

Исходя из вышеперечисленного передвижение влаги в вертикальной плоскости может быть определено как

$$z = \sqrt{4t \cdot M \cdot \frac{K_f^2 \sqrt{\frac{1}{v} \ln \frac{W_m - W_0}{W_1 - W_m}} W_m}{1 - \frac{W_m}{W_1}} \cdot \left(\frac{W_0 - W_m}{W_1 - W_m} \right)^5 \cdot \left(\frac{1}{W_0^2} + 2 \frac{W_0}{W_1^3} \right)}. \quad (6)$$

Движение воды в вертикальной плоскости описывается уравнением:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \right). \quad (7)$$

Следовательно, движение воды в горизонтальной плоскости определяется как

$$x = \sqrt{4t \cdot M \cdot \frac{K_f^2 \sqrt{\frac{1}{v} \ln \frac{W_m - W_0}{W_1 - W_m}} W_m}{(W_1 - W_0^2 \cdot W_m)} \cdot \left(\frac{W_0 - W_m}{W_1 - W_m} \right)^5}. \quad (8)$$

Учитывая эллиптическую форму контура увлажнения, определим требуемый расход на капельницу [9]:

$$Q_k = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot z \cdot x^2 \cdot t^{-1} \cdot (W_1 - W_0). \quad (9)$$

Подставив параметры ленты, определим поливную норму:

$$m = \frac{2,4 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot z \cdot x^2 \cdot (W_1 - W_0) \cdot l \cdot a}{c \cdot b}, \quad (10)$$

где l – длина гона, м; a – ширина участка, м; c – расстояние между капельницами, м; b – расстояние между соседними гребнями, м.

Результаты и их обсуждение. Сопоставляя усилия при погружной и поверхностной укладке под пленку, можно сделать вывод о том, что при глубине до 0,1 м разработка грунта не приводит к значительному росту тяговых сопротивлений (рис. 1). При поверхностной укладке под пленку на величину тяговых сопротивлений влияет вес бухты пленки.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод о том, что при скорости базового трактора до 2 м/с и глубине укладки капельной ленты до 0,1 м тяговые сопротивления не превысили 500 Н. Это позволит разместить оборудование по укладке ленты [10] на сельскохозяйственных машинах (рис. 2) и не окажет влияния на тягово-эксплуатационные свойства машины, позволив совместить сельскохозяйственные операции.

При поверхностной и погружной укладке капельной ленты начальные вертикальные координаты будут различными [11]. Это повлияет на геометрическую форму полученного контура увлажнения, что наглядно представлено на рисунке 3.

На форму контура влияют также почвенные условия, начальная влагоемкость, требуемая глубина промачивания, коэффициент пористости [12]. На рисунке 4 показан вид контура увлажнения при поверхностном и внутрипочвенном увлажнении.

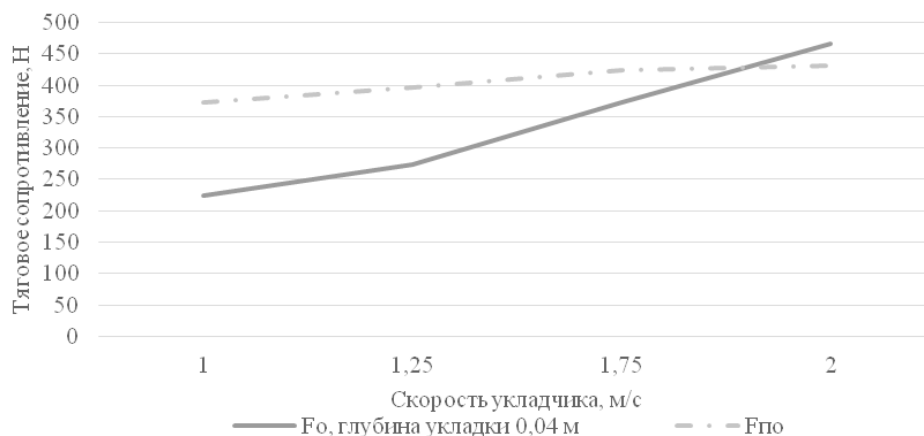


Рис. 1. Тяговое сопротивление при поверхностной и внутрипочвенной укладке капельной ленты на глубину 0,04 м

Fig. 1. Traction resistance for surface and intra-soil laying of drip tape to a depth of 0.04 m



Рис. 2. Испытания рабочего органа укладчика в лаборатории (а) и на базе формирователя картофельных гребней Grimme GF-75/4 (б) на Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Fig. 2. Testing of the working element of the stacker in the laboratory (a) and on the basis of the Grimme GF-75/4 potato ridge former (b) at the Field experimental station of the Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Как следует из фотографии (рис. 4), при внутрипочвенной укладке формы контура при одинаковом расходе на капельницу лучше охват корневой зоны картофеля, что приведет

к более рациональному расходу поливной воды за счет минимизации потерь на проникновение капельной воды в глубокие почвенные слои.

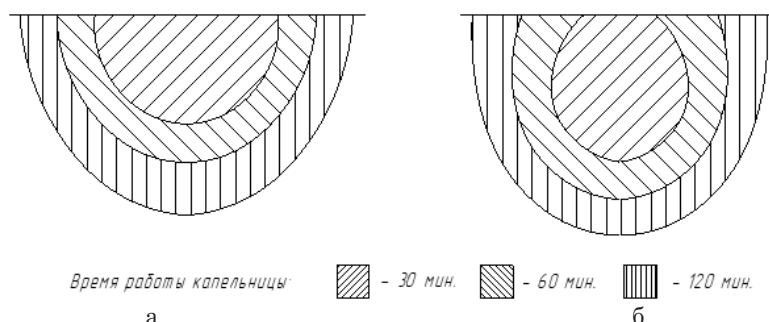


Рис. 3. Геометрическая форма контура увлажнения при поверхностной (а) и внутрипочвенной (б) укладке капельной ленты

Fig. 3. Geometric shape of the moisture contour for surface (a) and intra-soil (b) laying of drip tape



Рис. 4. Контур увлажнения через 30 мин полива при поверхностном (а) и внутрипочвенном расположении капельной ленты на глубине 0,04 м (б)

Fig. 4. Moisture contour after 30 minutes of irrigation with a surface arrangement of the drip tape (a) and intra-soil arrangement at a depth of 0.04 m (b)

Выводы

Капельная лента может быть уложена на поверхность (под пленку или без нее) или внутрипочвенно. Преимуществом внутрипочвенной укладки является точное положение ленты, когда отклонения от заданного положения минимальны. Укладка ленты на глубину до 0,1 м не приведет к существенному росту тяговых сопротивлений. При внутрипочвенной укладке ленты отклонения от прямолинейного

положения минимальны, лента в процессе эксплуатации не меняет положение, что приводит к снижению потерь напора. При внутрипочвенной укладке ленты жидкость распределяется равномерно в корневом пространстве, сокращаются потери на просачивание во внутрипочвенные слои. Следовательно, внутрипочвенная укладка капельной ленты на глубину до 0,1 м может быть рекомендована при выращивании картофеля.

Список использованных источников

1. Васильева Н.А. Роль мелиорации в повышении продуктивности сельскохозяйственных земель на примере Московской области / Н.А. Васильева, Л.В. Кирейчева // Природообустройство. 2023. № 3. С. 6-14. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-6-14.
2. Дубенок Н.Н. Перспективы и общественная значимость развития мелиорации в Московской области / Н.Н. Дубенок, Г.В. Ольгаренко, Р.В. Калинин // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 5. С. 6-11.
3. Ольгаренко Г.В. Перспективы импортозамещения и разработки технических средств орошения для

References

1. Vasilyeva N.A. The role of reclamation in increasing the productivity of agricultural lands using the example of the Moscow region / N.A. Vasilyeva, L.V. Kireycheva // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 3. P. 6-14. – DOI 10.26897/1997-6011-2023-3-6-14
2. Dubenok N.N. Prospects and social significance of the development of land reclamation in the Moscow region / N.N. Dubenok, G.V. Olgarenko, R.V. Kalinichenko // Melioration and water management. 2022. No. 5. P. 6-11.
3. Olgarenko G.V. Prospects for import substitution and development of technical irrigation means for the land

программы развития мелиорации в Российской Федерации / Г.В. Ольгаренко, С.С. Турапин // Мелиорация и водное хозяйство. 2016. № 2. С. 35-39.

4. Пчелкин В.В. Водный баланс зоны аэрации и расчетного слоя при орошении картофеля на дерново-подзолистых почвах / В.В. Пчелкин, В.О. Герасимов, О.М. Кузина, М.И. Новикова // Научная жизнь. 2018. № 10. С. 49-56.

5. Яшин В.М. Обоснование требований растений к регулированию водного режима почв и его контроль / В.М. Яшин, И.В. Глазунова // Природообустройство. 2022. № 5. С. 15-21. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-15-21.

6. Жалнин Э.В. О фундаментальности земледельческой механики // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2017. № 6 (82). С. 10-14.

7. Абдулмажидов Х.А. Комплексное проектирование и прочностные расчеты конструкций машин природообустройства в системе Inventor Pro / Х.А. Абдулмажидов, А.С. Матвеев // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2016. № 2. С. 40-46.

8. Карпов М.В. Исследование эффективности и экономической оценка применения разработанной картофелепосадочной машины / М.В. Карпов, Г.Е. Шардина, А.А. Жиздюк, А.Г. Шаповалов // Научная жизнь. 2018. № 3. С. 19-27.

9. Мартынова Н.Б. Капельное орошение картофеля с применением механизированной укладки капельной ленты // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 3. С. 26-30.

10. Устройство для укладки капельной ленты: Патент на полезную модель. Российская Федерация, U1 № 2021128300МПК, A01G 25/06, № 208061 / А.Ю. Корнеев, В.И. Балабанов, Н.Б. Мартынова, Л.А. Журавлева; заявл. 28.09.2021; Опубл. 01.12.2021

11. Makani M.N., Sargent S.A., Zotarelli L., Huber D.J., Sims C.A. Irrigation method and harvest time affect storage quality of two early-season, tablestock potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars // Scientia Horticulturae. 2015. № 197. Pp. 428-433.

12. Балабанов В.И. Расчет параметров контура увлажнения при капельном поливе картофеля / В.И. Балабанов, Н.Б. Мартынова, Х.А. Абдулмажидов // Природообустройство. 2022. № 2. С. 41-47. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-41-47.

Об авторах

Наталья Борисовна Мартынова, канд., техн. наук, доцент, yourim2@rambler.ru

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

Критерии авторства / Criteria of authorship

Мартынова Н.Б., Журавлева Л.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

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

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 28.04.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 21.09.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 21.09.2024

reclamation development program in the Russian Federation / G.V. Olgarenko, S.S. Turapin // Melioration and water management. 2016. No. 2. P. 35-39.

4. Pchelkin V.V. Water balance of the aeration zone and calculation layer when irrigating potatoes on sod-podzolic soils / V.V. Pchelkin, V.O. Gerasimov, O.M. Kuzina, M.I. Novikova // Scientific life. 2018. No. 10. P. 49-56.

5. Yashin V.M. Justification of plant requirements for the regulation of soil water regime and its control / V.M. Yashin, I.V. Glazunova // Prirodoobustroystvo. 2022. No. 5. P. 15-21. – DOI 10.26897/1997-6011-2022-5-15-21

6. Zhalnin E.V. On the fundamental nature of agricultural mechanics // Bulletin of the federal state educational institution of higher professional education "Moscow State Agricultural Engineering University named after V.P. Goryachkin", 2017. No. 6(82) P. 10-14.

7. Abdulmazhidov Kh.A. Integrated design and strength calculations of environmental engineering machine structures in the Inventor Pro system / Kh.A. Abdulmazhidov, A.S. Matveev // Bulletin of the Federal state educational institution of higher professional education "Moscow State Agricultural Engineering University named after V.P. Goryachkin". 2016. No. 2. P. 40-46.

8. Karpov M.V. Study of the effectiveness and economic assessment of the use of the developed potato planting machine / M.V. Karpov, G.E. Shardina, A.A. Zhizdyuk, A.G. Shapovalov // Scientific life. 2018. No. 3. P. 19-27.

9. Martynova N.B. Drip irrigation of potatoes using mechanized laying of drip tape / N.B. Martynova // Melioration and water management. 2021. No. 3. P. 26-30.

10. Utility model patent No. 208061 U1 Russian Federation, IPC A01G 25/06. Device for laying drip tape: No. 2021128300: application. 09/28/2021: publ. 12/01/2021 / A.Yu. Korneev V.I. Balabanov, N.B. Martynova, L.A. Zhuravleva.

11. Makani M.N. Irrigation method and harvest time affect storage quality of two early-season, tablestock potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars / M.N. Makani S.A. Sargent, L. Zotarelli, D.J. Huber, C.A. Sims // Scientia Horticulturae. 2015. No. 197, P. 428-433.

12. Balabanov V.I. Calculation of the parameters of the humidification circuit for drip irrigation of potatoes / V.I. Balabanov, N.B. Martynova, Kh.A. Abdulmazhidov // Prirodoobustroystvo. 2022. No. 2. P. 41-47. DOI 10.26897/1997-6011-2022-2-41-47.

Information about the authors

Natalia B. Martynova, CSc (Eng), associate professor, yourim2@rambler.ru

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

Martynova N.B., Zhuravleva L.A. 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/10.26897/1997-6011-2025-1-27-32>

УДК 633.34:575.224



ТРАНСФОРМАЦИЯ КЛИМАТА ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

М.Е. Бельшкина

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5, Россия

Аннотация. Статья содержит анализ изменения агроклиматических условий Центрального района Нечерноземной зоны за период с 1981 по 2020 гг. и установления новых границ сосеяния в регионе. На основании сходства температурного и влажностного режима в течение вегетационного периода авторами были выделены 3 агроклиматические подзоны: северная, центральная и южная. Установлено, что рост температур в мае составил в среднем 3-4°C. Если в начале анализируемого периода среднемесячные температуры в мае составляли 12,8°C в северной агроклиматической подзоне, 14,0°C – в центральной, 13,6°C – в южной, то уже к 2020 г. данные температурные значения составили, соответственно, 16,8; 17,2; 18,9°C. В августе значения среднемесячных температур также возросли в среднем на 2-3°C, что положительно сказывается на обеспечении благоприятных условий вегетации сельскохозяйственных культур в целом, и в частности – сои. Суммы активных температур также возросли. Если в начале анализируемого периода они составляли в среднем по подзонам 1800-1950°C, то в настоящее время их значения составляют 1900-2200°C. В результате анализа сумм выпадающих осадков по месяцам было установлено, что в мае их количество возросло в среднем на 16-18 мм, причем в августе значение этого показателя год от года сокращалось в среднем на 20-25 мм. Установлено смещение северной допустимой границы интродукции сои на европейской территории страны, наиболее пригодными являются южная агроэкологическая подзона, а также часть регионов центральной подзоны. На этой территории рекомендовано возделывание сои северного экотипа, а также полудетерминантных сортов, рекомендованных для более южных регионов.

Ключевые слова: изменение климата, Центральное Нечерноземье, агроклиматические подзоны, температура, осадки, соя (*Glicine hispida* L.), интродукция

Формат цитирования: Бельшкина М.Е. Трансформация климата Центрального района Нечерноземной зоны в условиях глобального потепления // Природообустройство. 2025. № 1. С. 27-32. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-27-32>

Scientific article

CLIMATE TRANSFORMATION OF THE CENTRAL REGION OF THE NON-CHERNOZEM ZONE IN THE CONTEXT OF GLOBAL WARMING

M.E. Belyshkina

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

Abstract. The article analyzed the change in the agro-climatic conditions of the Central region of the Non-chernozem zone for the period from 1981 to 2020 and established new boundaries of soybean sowing in the region. Based on the similarity of temperature and humidity conditions during the growing season, the authors identified 3 agro-climatic subzones – northern, central and southern. It was found that the temperature increase in May averaged 3-4°C. At the beginning of the analyzed period, the average monthly temperatures in May were 12.8°C in the northern agro-climatic subzone, 14.0°C in the central and 13.6°C in the southern, then by 2020 these temperature values were 16.8°C, 17.2°C and 18.9°C, respectively. In August, the average monthly temperatures also increased by an average of 2-3°C, which generally has a positive effect on ensuring favorable growing conditions for crops in general, and in particular soybeans. The amounts of active temperatures have also increased. If at the beginning of the analyzed period they averaged 1800-1950°C for the subzones, at present their values are 1900-2200°C. As a result of the analysis of the amounts of precipitation by month, it was found that in May their number increased by an average of 16-18 mm, while in August the value of this indicator decreased by an average of 20-25 mm from year to year. The shift of the northern permissible limit of soybean introduction in the European territory of the country has been established, the most suitable are the southern agroecological subzone,

as well as part of the regions of the central subzone. Cultivation of soybeans of the northern ecotype, as well as semi-determinant varieties recommended for more southern regions, is recommended in this territory.

Keywords: climate change, Central Non-Chernozem region, agro-climatic subzones, temperature, precipitation, soybeans (*Glycine hispida* L.), introduction

Format of citation: Belyshkina M.E. Climate transformation of the central region of the non-chernozem zone in the context of global warming // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 27-32. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-27-32>

Введение. Климатические изменения, произошедшие на планете за последние полвека и вызванные естественными природными процессами, а также антропогенными факторами, оказывают неизбежное воздействие на изменения в биосфере и экосистемах.

В Российской Федерации климатические изменения и их последствия рассматриваются на государственном уровне, принимаются соответствующие программные документы, которые призваны адаптировать к ним различные сферы экономики. Одной из наиболее подверженных изменениям климата отраслей является сельскохозяйственное производство. Фиксируется увеличение беззаморозкового периода, благодаря чему появилась возможность возделывать достаточно теплолюбивые культуры в регионах, которые еще несколько десятилетий назад было принято считать зонами рискованного земледелия [1]. Так, в Центральном районе Нечерноземной зоны продолжительность беззаморозкового периода увеличилась на 8-9 дней в весну и на 12-14 дней осенью, что позволяет оптимизировать весенне-осенние полевые работы и вводить в севообороты более теплолюбивые сельскохозяйственные культуры, к которым относится соя (*Glycine hispida* Max.) [2, 3].

Одной из основных задач сельскохозяйственного производства является рациональное природопользование, учитывающее агроклиматические условия региона земледелия, к которым относятся солнечная радиация, тепло и влага, и позволяющее максимально использовать агропроизводственный потенциал территории [4].

Для земледелия в XX в. была характерной четко выраженная зональность производства. Однако уже с начала текущего столетия и в настоящее время наблюдается трансформация в сельскохозяйственной специализации в регионах земледелия, что обусловлено трансформацией природно-климатических условий [5]. Оценка возможного дальнейшего изменения климатических условий и его последствий является одной из ключевых задач исследований в различных областях науки.

Цель исследований: анализ динамики изменения климатических условий в Центральном

районе Нечерноземной зоны и оценка возможности интродукции теплолюбивых перспективных сельскохозяйственных культур в новые регионы возделывания на примере сои.

Материалы и методы исследований. Объектами исследований явились агроклиматические условия Центрального района Нечерноземной зоны и сорта сои. Были проанализированы изменения температурно-влажностного режима за период с 1981 по 2020 гг. и установлены новые границы соеяния в регионе. Методология исследований была основана на работах Г.С. Посыпанова [6] и В.Т. Синеговской [7].

В исследованиях были проанализированы изменения показателей обеспеченности теплом и влагой территории Центрального Нечерноземья на протяжении 40-летнего периода начиная с 1981 по 2020 гг. В качестве исходного массива данных была избрана база Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ) [8].

Суммы активных температур рассчитывались по формуле:

$$\sum T_{\text{акт.}} = \sum T_{\text{среднесут.}} \geq 10^{\circ}\text{C},$$

где $\sum T_{\text{среднесут.}}$ – значение средней температуры за сутки, $^{\circ}\text{C}$.

Значение гидротермического коэффициента рассчитывалось по формуле:

$$\Gamma\text{ТК} = \sum_p / 0,1 \sum T_{\text{акт.}},$$

где $\sum_p$ – сумма осадков за период вегетации; $\sum T_{\text{акт.}}$ – сумма активных температур за период вегетации.

$\Gamma\text{ТК}$ оценивался по следующей шкале: 1,0-1,5 – достаточная влагообеспеченность; свыше 1,5 – избыточная влагообеспеченность; менее 1,0 – дефицитная влагообеспеченность.

Результаты и их обсуждение. Решением проблем глобального потепления заняты ученые во всем мире. Так, был проанализирован V Оценочный доклад Всемирной метеорологической организации по изменению климата (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) [9]. В документе приводится информация о том, что наряду с происходящим глобальным потеплением климата возросло количество выпадающих осадков, а также частота и интенсивность засух.

На территории Российской Федерации к середине XXI в. прогнозируется повышение средней температуры воздуха на 2-5 °С в зависимости от географического расположения – от Дальневосточного до Западносибирского регионов, но наибольшие значения роста температур фиксируются на Европейской территории России. Благодаря повышению температурного режима увеличивается продолжительность вегетационного периода, что приводит к расширению ареала возделывания многих теплолюбивых культур, к которым относится и соя [10]. Однако наряду с ростом температур будет фиксироваться учащение неблагоприятных погодных аномалий: засух и периодов избыточного увлажнения, что в свою очередь будет приводить к адаптации существующих агротехнологий к изменяющимся условиям окружающей среды [11, 12].

По данным Росгидромета [13], за период с 1976 по 2020 гг. среднемесячная температура возрастала на 0,51°С за десятилетие, при этом в южных регионах сокращается количество выпадающих осадков и возрастает продолжительность засушливых периодов.

В основе размещения сельскохозяйственных культур по регионам России лежит их потребность в обеспеченности теплом и влагой. Традиционно Нечерноземная зона относилась к умеренному поясу, пригодному для возделывания культур, достаточно холодостойких. Соя относится к сельскохозяйственным культурам, требовательным к температурному режиму. Растениям требуется средняя температура в течение вегетации на уровне 22-28 °С, после всходов соя плохо переносит заморозки. Соя ускоряет свое развитие при продвижении в более южные регионы.

В средней полосе России часто наблюдается так называемая «консервация» посевов: при снижении дневных температур в августе-сентябре, когда соя созревает, растения не переходят к созреванию и зелеными остаются на поле. Проблема ранее решалась подбором сортов, интродуцированных для регионов Центрального Нечерноземья, – так называемых сортов сои «северного экотипа». Однако температурно-влажностный режим в Нечерноземной зоне России значительно изменился. В результате анализа средних температур за вегетацию, сумм активных температур, а также количества выпадающих осадков и расчетного значения гидротермического коэффициента (ГТК), проведенных автором за 40-летний период, с 1981 по 2020 гг., были выделены 3 агроклиматических подзоны: северная (Тверская, Ярославская,

Костромская области); центральная (Смоленская, Московская, Калужская, Владимирская, Ивановская области); южная (Брянская, Орловская, Рязанская, Тульская области) [4].

На рисунке 1 представлена динамика среднемесячных температур в мае и в августе за 40-летний период, зафиксированное значение роста показателя составило в среднем 3-4°С. Так, если в начале анализируемого периода среднемесячные температуры в мае составляли 12,8°С в северной агроклиматической подзоне, 14,0°С – в центральной, 13,6°С – в южной, то уже к 2020 г. данные температурные значения составили, соответственно, 16,8; 17,2; 18,9°С.

В августе значения среднемесячных температур также возросли в среднем на 2-3°С, что положительно сказывается на обеспечении благоприятных условий вегетации сельскохозяйственных культур в целом, и в частности – сои. Температурно-влажностная обеспеченность вегетационного периода на 60-70% оказывает влияние на вариабельность урожайности сои.

В результате анализа сумм выпадающих осадков по месяцам было установлено, что в мае их количество возросло в среднем на 16-18 мм, при этом в августе значение этого показателя год от года сокращалось в среднем на 20-25 мм (рис. 2).

В условиях средней полосы России, в Московской области и даже в более северных областях стало возможным расширение ассортимента сортов для ее возделывания, так как ранее основной проблемой представлялось наличие низких температур в конце лета наряду с большим количеством осадков, что не позволяло культуре вовремя созревать. Однако значения температур и осадков достаточно сильно варьируют относительно линейной средней величины, и в большей мере это было зафиксировано в центральной и южной агроклиматических подзонах.

Усредненные данные по десятилетним периодам по тепло- и влагообеспеченности агроклиматических подзон приведены в таблице. Наибольший рост средней температуры воздуха был зафиксирован в южной агроклиматической подзоне. При этом количество выпадающих осадков возросло в мае в среднем на 16,2 мм, а в августе сократилось на 22,4 мм. Установлено, что наиболее активный рост средних температур начался с 2001 г., тенденция чего продолжается по настоящее время. Прирост составляет 0,5°С за десятилетие.

Повышение температуры и среднемесячного количества осадков в начале вегетации способствует появлению дружных всходов,

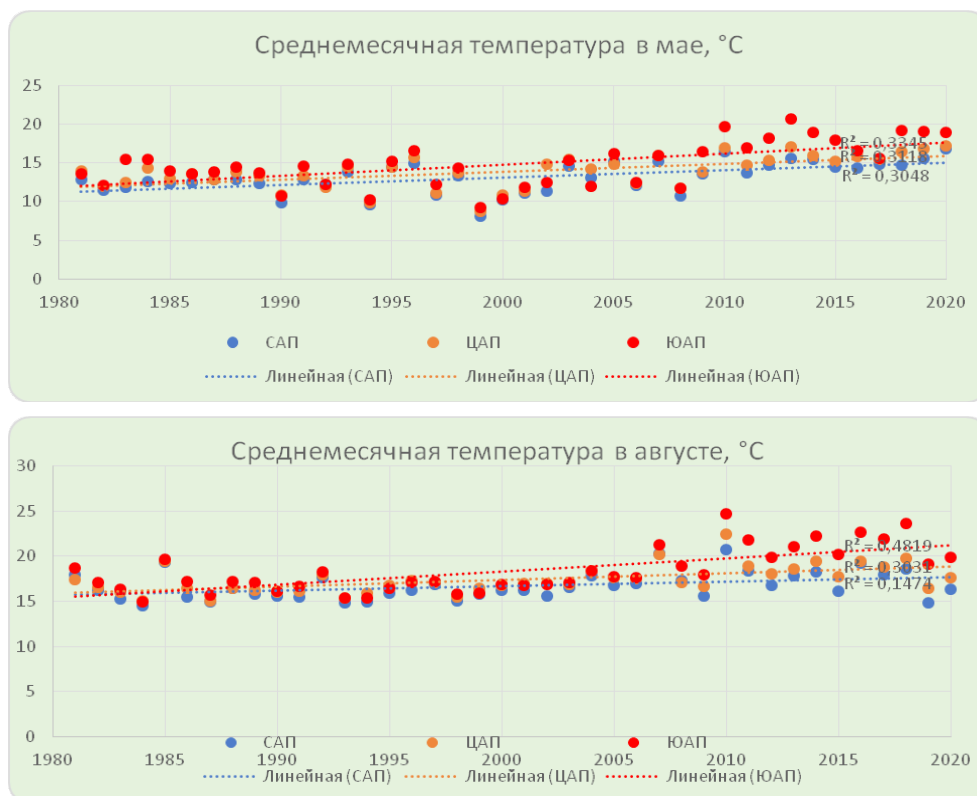


Рис. 1. Динамика среднемесячной температуры воздуха в мае и августе по агроклиматическим подзонам Центрального Нечерноземья (1981-2020 гг.)

Fig. 1. Dynamics of the average monthly air temperature in May and August by agroclimatic subzones of the Central Non-Chernozem Region (1981-2020)

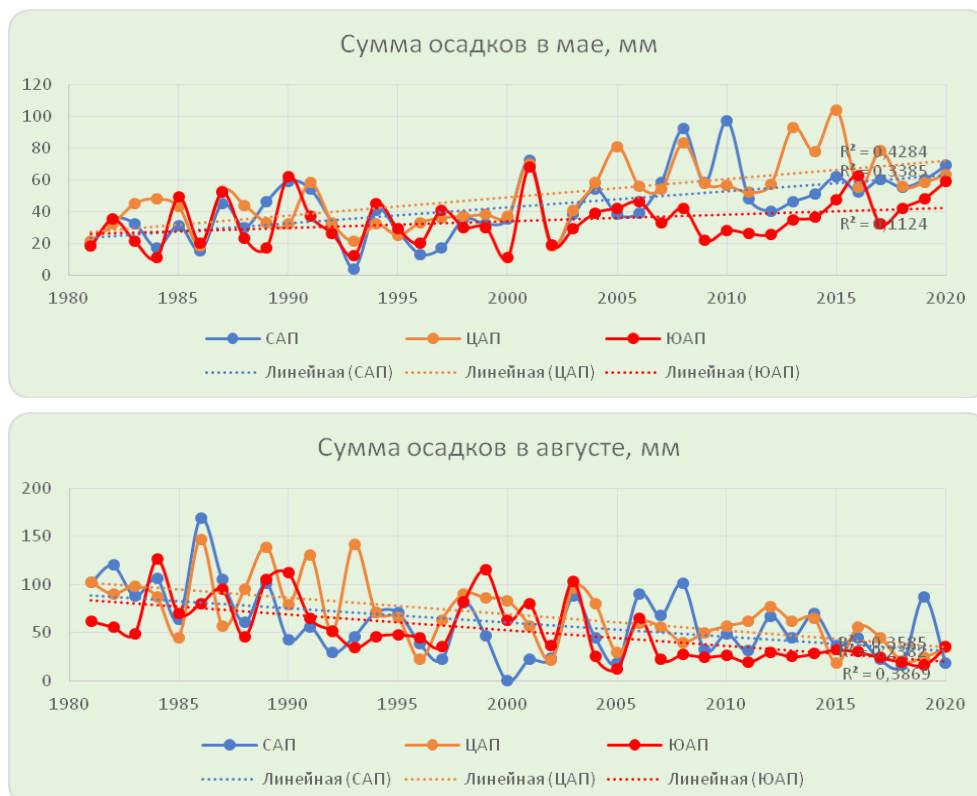


Рис. 2. Динамика среднемесячного количества осадков в мае и августе по агроклиматическим подзонам Центрального Нечерноземья (1981-2020 гг.)

Fig. 2. Dynamics of average monthly precipitation in May and August in agroclimatic subzones of the Central Non-Chernozem Region (1981-2020)

Таблица. Динамика температуры воздуха и количества осадков с мая по август в Центральном Нечерноземье по агроклиматическим подзонам с 1981 по 2020 гг.

Table. Dynamics of air temperature and precipitation from May to August in the Central Non-Chernozem Earth Region by agroclimatic subzones from 1981 to 2020

Годы Years	Средняя температура воздуха, °С Average air temperature, °C	$\Sigma T_{\text{акт.}}, ^\circ\text{C}$	Среднемесячное кол-во осадков, мм Average monthly precipitation, mm	ГТК HTC
Северная агроклиматическая подзона / Northern agroclimatic subzone				
1981-1990	15,5	1807	73,7	1,63
1991-2000	15,6	1803	70,1	1,56
2001-2010	16,3	1922	69,8	1,45
2011-2020	16,4	1944	71,6	1,48
Центральная агроклиматическая подзона / Central agroclimatic subzone				
1981-1990	15,6	1849	73,1	1,59
1991-2000	16,0	1886	67,5	1,44
2001-2010	16,7	1972	68,6	1,41
2011-2020	16,8	2021	72,6	1,44
Южная агроклиматическая подзона / Southern agroclimatic subzone				
1981-1990	16,4	1952	69,9	1,44
1991-2000	16,6	1975	67,6	1,38
2001-2010	17,6	2089	61,8	1,19
2011-2020	18,5	2240	62,2	1,14

а в конце ее – быстрому и равномерному созреванию сои в данной подзоне. Суммы активных температур также возросли. Если в начале анализируемого периода они составляли в среднем по подзонам 1800-1950°C, то в настоящее время их значения составляют 1900-2200°C. При этом количество выпадающих осадков сокращалось в среднем на 5 мм за десятилетие, соответственно уменьшалось значение гидротермического коэффициента: с 1,44-1,63 за 1981-1990 гг. до 1,14-1,48 за 2011-2020 гг.

Выводы

В исследованиях было установлено произошедшее смещение северной допустимой границы интродукции сои на Европейской территории страны. Однако наиболее пригодными являются южная агроэкологическая подзона, а также

часть регионов центральной подзоны. На этой территории становится возможным возделывание не только сортов сои северного экотипа, но и современных высокотехнологичных сортов полудетерминантного типа, рекомендованных для более южных регионов.

Сорта сои, полученные в 1990-2000-е гг., зачастую имеют сильную зависимость развития продукционного процесса в течение вегетационного периода от температурно-влажностного режима. Современные сорта обладают большей адаптивностью к факторам внешней среды и стабильностью вызревания, а также большим потенциалом в формировании урожайности семян. Изменение агроклиматических условий на территории Центрального Нечерноземья позволяет вводить эти сорта сои в севооборот, тем самым повышая потенциал культуры в регионе.

Список использованных источников

1. Суховеева О.Э. Изменения климатических условий и агроклиматических ресурсов в Центральном районе Нечерноземной зоны // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «География. Геоэкология». 2016. № 4. С. 41-49.
2. Гатаулина Г.Г. Урожайность семян и элементы продуктивности у разнотипных сортов люпина белого (*Lupinus albus* L.) в разные по метеорологическим условиям годы / Г.Г. Гатаулина, М.Е. Бельшккина, Н.В. Медведева // Известия ТСХА. 2016. № 6. С. 32-44.
3. Дорохов А.С. Агроклиматическая характеристика регионов Нечерноземной зоны Российской Федерации и оценка пригодности для возделывания современных раннеспелых сортов сои / А.С. Дорохов, М.Е. Бельшккина

References

1. Sukhoveeva O.E. Changes in climatic conditions and agro-climatic resources in the Central region of the Non-Chernozem zone // Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology. 2016. No. 4. P. 41-49.
2. Gataulina G.G., Belyshkina M.E., Medvedeva N.V. Seed yield and productivity elements in varieties of different types of white lupin (*Lupinus albus* L.) in years of different meteorological conditions // Izvestiya Timiryazevskaya Agricultural Academy. 2016. No. 6. P. 32-44.
3. Dorokhov A.S., Belyshkina M.E. Agro-climatic characteristics of the regions of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation and assessment of suitability for cultivation of modern early-ripening soybean varieties // Bulletin

// Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 3 (55). С. 34-39.

4. Jumrani K., Bhatia V.S. Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean // *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2019. Vol. 25, № 3. Pp. 667-681. DOI: 10.1007/s12298-019-00657-5.

5. Краснощекоев В.Н. Изменение климата и сельское хозяйство России: проблемы и решения / В.Н. Краснощекоев, Д.Г. Ольгаренко, О.Н. Рожкова // *Природообустройство*. 2017. № 2. С. 80-88.

6. Посыпанов Г.С. Методы изучения биологической фиксации азота воздуха (методы проведения лабораторных, вегетационных и полевых опытов). М.: Агропромиздат, 1991. 300 с.

7. Синеговская В.Т. Методы исследований в полевых опытах с соей / В.Т. Синеговская, Е.Т. Наумченко, Т.П. Кобозева. Благовещенск: ФГБНУ Всероссийский НИИ сои, 2016. 116 с.

8. Специализированные массивы для климатических исследований: Информация ВНИИГМИ-МЦД. (Электронный ресурс). Режим доступа: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>.

9. Schauburger B., Gornott C., Wechsung F. Global evaluation of a semiempirical model for yield anomalies and application to within-season yield forecasting // *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23, № 11. Pp. 4750-4764.

10. Гатаулина Г.Г. Рост и развитие раннеспелых сортов сои при разных сроках посева в Московской области / Г.Г. Гатаулина, М.Е. Бельшккина // *Кормопроизводство*. 2012. № 3. С. 26-28.

11. Гришин А.П. Способ контроля продуктивности растения / А.П. Гришин, А.А. Гришин, Н.А. Семенова // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15, № 2. С. 69-74.

12. Ракутько С.А. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по экологии светокультуры / С.А. Ракутько, Е.Н. Ракутько, Г.В. Медведев // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17, № 2. С. 40-48.

13. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.

Об авторе

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

Критерии авторства / Authorship criteria

Бельшккина М.Е. выполнила теоретические исследования, на основании которых провела обобщение и написала рукопись, имеет на статью авторское право и несёт ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 15.07.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 10.11.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 10.11.2024

of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2021. № 3 (55). P. 34-39.

4. Jumrani K., Bhatia V.S. Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean // *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2019. Vol. 25, № 3. P. 667-681. – DOI: 10.1007/s12298-019-00657-5

5. Krasnoshchekov V.N., Olgarenko D.G., Rozhkova O.N. Climate change and agriculture in Russia: problems and solutions // *Prirodoobustroystvo*. 2017. No. 2. P. 80-88.

6. Posypanov G.S. Methods of studying biological fixation of air nitrogen (methods of laboratory, vegetation and field experiments). M.: Agropromizdat, 1991. 300 p.

7. Sinegovskaya V.T., Naumchenko E.T., Kobozeva T.P. Research methods in field experiments with soybeans. Blagoveshchensk: All-Russian Research Institute of Soy, 2016. 116 p.

8. Specialized arrays for climate research: Information from VNIIGMI-MCD (Electronic resource). – Access mode: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>.

9. Schauburger B., Gornott C., Wechsung F. Global evaluation of a semiempirical model for yield anomalies and application to within-season yield forecasting // *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23, № 11. P. 4750-4764.

10. Gataullina G.G., Belyshkina M.E. Growth and development of early-ripening soybean varieties at different sowing dates in the Moscow region // *Forage production*. 2012. No. 3. P. 26-28.

11. Grishin A.P., Grishin A.A., Semenova N.A. A way to control the productivity of a plant // *Agricultural machinery and technology*. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 69-74.

12. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Development of an experimental phytotron and its application in research on the energy ecology of light culture // *Agricultural machines and technologies*. 2023. Vol. 17, No. 2. P. 40-48.

13. Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2020. Moscow: Roshydromet, 2021. 104 p.

About the author

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

Belyshkina M.E. performed theoretical research, on the basis of which she conducted a generalization and wrote a manuscript. She has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-33-39>

УДК 631.46:633.34:631.67



ДЕЙСТВИЕ ИНОКУЛЯЦИИ СЕМЯН СОИ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ОРОШАЕМОЙ СВЕТЛО-КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

С.А. Агапова¹✉, А.Ю. Москвичев²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; 400002, Волгоградская область, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, 9, Россия

² Волгоградский государственный аграрный университет; 400002, Волгоградская область, г. Волгоград, Университетский пр-кт, 26, Россия

Аннотация. Основная цель исследований заключалась в определении биологической активности почвы путем изучения интенсивности разложения льняного материала на изучаемых вариантах опыта. Именно такое использование инокулянта выбранной ценной зернобобовой культуры значительно увеличивает биологическую активность, находящихся в ней микроорганизмов, характерных для светло-каштановой почвы. Такое применение способствует обогащению почвы своеобразными бактериями, которые усиливают фиксацию азота из атмосферы и превращают его в доступные легкоусвояемые формы. Наблюдения проводились с 2022 по 2023 гг. на орошаемой светло-каштановой почве опытной станции «Орошаемая» (Волгоградская область, пос. Водный). Было рассмотрено два режима увлажнения почвы, по которым проводилась оценка эффективности посевной обработки семян сои комплексом бактериальных азотфиксирующих компонентов в сравнении с необработанным вариантом опыта (контроль). Полученные итоги таких наблюдений убедительно доказывают, что предпосевная обработка посевного материала биологическими компонентами действует положительно на биоту изучаемого профиля почвы. Данные по биологической активности почвы коррелируют с урожайностью и качеством собранного зерна при условии поддержания предполивного порога влажности на уровне 80% от наименьшей влагоемкости. Постоянное увлажнение почвы на уровне 80% НВ при выращивании сои с проведением предпосевной инокуляции семян позволяет получить урожай зерна в течение двух лет исследований на уровне 2,85 т/га с повышенными показателями качества зерна, где содержание общего азота составляет 5,04%, фосфора – 0,90%, калия – 2,15%, сырого жира – 21,21%, а содержание клетчатки – 9,74%.

Ключевые слова: предпосевная инокуляция семян, соя, урожайность, качество семян, орошение, биологическая активность

Формат цитирования: Агапова С.А., Москвичев А.Ю. Действие инокуляции семян на биологическую активность орошаемой светло-каштановой почвы Нижнего Поволжья // Природообустройство. 2025. № 1. С. 33-39. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-33-39>

Scientific article

THE EFFECT OF SEED INOCULATION ON THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF IRRIGATED LIGHT CHESTNUT SOIL IN THE LOWER VOLGA REGION

S.A. Agapova, A.Yu. Moskvichev

¹ All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture, a branch of the A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation; 9 Timiryazev St., Volgograd, 400002, Volgograd Region, Russia

² Volgograd State Agrarian University; 26 Universitetskii Prospekt, Volgograd, 400002, Volgograd Region, Russia

Abstract. The main purpose of this study was to determine the biological activity of the soil by studying the intensity of decomposition of flax material in the studied experimental variants. It is precisely this use of inoculant, a selected valuable leguminous crop, that significantly increases the biological activity of the microorganisms present in it, characteristic of light chestnut soil. This application helps enrich the soil with peculiar bacteria that enhance nitrogen fixation from the atmosphere and turn it into accessible, easily digestible forms. **Materials and methods.** Our observations were carried out from 2022 to 2023 on irrigated light chestnut soil at the experimental station “Irrigated” (Volgograd region, village Water). Two soil moisture regimes were considered, according to which the effectiveness of soybean seed treatment with a complex of bacterial nitrogen-fixing components was evaluated in comparison with the untreated version of the experiment (control). **Results.** The obtained results of such observations

convincingly prove that pre-sowing treatment of seed material with biological components has a positive effect on the biota of the studied soil profile. Data on the biological activity of the soil correlate with the yield and quality of the harvested grain, provided that the pre-irrigation moisture threshold is maintained at 80% of the lowest moisture capacity. **Conclusions.** Constant moistening of the soil at the level of 80% HB when growing soybeans with pre-sowing inoculation of seeds makes it possible to obtain a grain harvest within two years of research at the level of 2.85 t/ha with increased grain quality indicators, where the total nitrogen content is 5.04%; phosphorus – 0.90%; potassium – 2.15%; crude fat – 21.21%, and fiber content is 9.74%.

Keywords: pre-sowing inoculation of seeds, soybeans, yield, seed quality, irrigation, biological activity

Format of citation: Agapova S.A., Moskvichev A.Yu. The effect of seed inoculation on the biological activity of irrigated light chestnut soil in the Lower Volga region // Prirodoobutrojstvo. 2025. No. 1. P. 33-39. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-33-39>

Введение. Аграрное производство составляет одну из основных отраслей экономики России, и важным компонентом этой отрасли является производство сои [1]. Соя – это одна из самых распространенных и востребованных сельскохозяйственных культур в мире, которая используется в пищевой, кормовой и технической промышленности. Однако, как и любое другое растение, соя нуждается в определенных условиях для своего успешного роста и развития [2, 3].

Почва является одним из основных элементов, влияющих на рост и развитие в жизни растений. Почва является жизненно важным ресурсом для растений, которая обогащает растения элементами питания, а также водой и воздухом. Кроме того, почва является основой для развития корневой системы растений, которая обеспечивает их устойчивость к внешним воздействиям [4, 5]. Однако в условиях современного сельского хозяйства почва может подвергаться различным негативным воздействиям – таким, как эрозия, загрязнение химическими веществами и деградация биологической активности. В связи с этим важно разрабатывать и использовать методы, способствующие улучшению состояния почвы и успешному развитию сельскохозяйственных культур [6].

Одним из таких приемов в технологии возделывания важнейшей зернобобовой культуры – сои – является инокуляция семян [7, 8]. Инокуляция семян сои представляет собой процесс введения в почву или нанесение на семена микроорганизмов рода *Rizobium*, которые способны образовывать симбиотическую азотфиксирующую ассоциацию с корневой системой растений сои [9].

Кроме того, инокуляция семян сои помогает улучшить структуру почвы и ее водно-воздушный режим. Благодаря увеличению биологической активности почвы растения получают лучший доступ к минеральным веществам и воде,

что способствует более эффективному росту и развитию [10, 11].

Использование предпосевной обработки семян сои такими препаратами в орошаемом земледелии может стать одним из ключевых шагов к повышению продуктивности и устойчивости сельскохозяйственных культур [12, 13].

Биологическую активность орошаемой светло-каштановой почвы можно значительно усилить благодаря процессу инокуляции. Взаимодействие микроорганизмов в почве и корней сои приводит к увеличению биологической активности, что способствует повышению урожайности и качества почвы.

Цель исследований: измерение интенсивности биоты в почве путем оценки скорости разложения тканевого материала в различных вариантах исследований.

Материалы и методы исследований. В 2022-2023 гг. проводились наблюдения за использованием малоизученных элементов в технологии возделывания сои. Был выбран сорт селекции ВНИИОЗ – Волгоградка 2, посев которой прошел во второй половине мая. Место проведения исследований – орошаемая светло-каштановая почва Нижней Волги.

Исследования включали в себя два ключевых фактора: изучение режимов орошения почвы и предпосевную обработку семян.

Экспериментальная схема включает в себя фактор А – водный режим. Первый тип режима основывается на поддержании благоприятного уровня влажности почвы на протяжении основных фаз роста и развития растений, где от начала посева и до конца ветвления глубина увлажнения составляет 0,4 м, уровень влажности поддерживается на уровне 70% от наименьшей влагоемкости (НВ). От начала цветения до завершения налива зерна глубина увлажнения увеличивается до 0,6 м, а уровень влажности находится в пределах 80% от НВ. В последующем

от завершения налива зерна и до его спелости влажность в исследуемом горизонте не опускается ниже 70% НВ.

Второй тип водного режима основывается на поддержании более высокого уровня влажности в период всего вегетационного периода. Так, от посева до конца ветвления влажность почвы находится в пределах 80% НВ в слое 0,4 м. Этот период важен для активного роста корневой системы и формирования вегетативной массы. Во второй период вегетации (цветение-полная спелость) – 80% НВ на глубину увлажнения почвенного профиля почвы 0,6 м.

Обработка семян включала в себя два варианта (Фактор В): контроль (необработанные семена) и обработка семян биологическими препаратами. В качестве препаратов использовались Геостим Фит Г (5-10 л/т), Импровер (20 мл/т), Гелиос Супер (1-2 л/т). Эти препараты обладают различными биологически активными веществами, которые оказывают положительное влияние на основные этапы роста и развитие растений, тем самым повышая их устойчивость к заболеваниям и вредителям, а также улучшая усвоение питательных веществ.

Новый препарат Геостим Фит марки Г – микробиологическое удобрение широкого спектра действия с фунгицидными и стимулирующими свойствами. В основе препарата – 8 видов живых полезных микроорганизмов (*Chaetomium globosum*, *Trichoderma viride*, *Bacillus megaterium*, *Azospirillum brasilense*, *Rhizobium leguminosarum*, *Mesorhizobium ciceri*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus subtilis*) и их метаболитов. Акцент сделан на преобладание определенных видов микроорганизмов, поэтому Геостим Фит марки Г решает разные задачи: разложение пожнивных остатков; увеличение доступности почвенного питания; защита семян и вегетирующих растений от фитопатогенов; инокуляция семян азотфиксирующими бактериями; фиксация атмосферного азота и почвенного фосфора. Препарат положительно влияет на рост и развитие некорневой подкормки.

Импровер ВР – адъювант-смачиватель. Он применяется для улучшения растекания рабочего раствора биопрепаратов, пестицидов и агрохимикатов на поверхности обрабатываемых объектов.

Гелиос Супер – жидкое минеральное удобрение для предпосевной обработки семян. Препарат стимулирует рост и развитие корневой системы и надземной части растений сои, увеличивает всхожесть, ускоряет прорастание семян, повышает жизнеспособность всходов, обеспечивает прорастающие семена азотным питанием,

устраняет признаки дефицита элементов питания, увеличивает азотфиксирующую активность клубеньковых бактерий, повышает устойчивость к засухе, морозам, заболеваниям, повышает урожайность.

Биологическая активность почвы изучалась методом закладки льняного полотна на глубину промачивания до 60 см. Этот метод позволяет оценить количество микроорганизмов в почве, что является ключевым показателем плодородия. Льняные полотна, помещенные в почву, обеспечивают среду для развития микроорганизмов, что позволяет изучить их активность. Посев сои был произведен ширококормным способом с междурядьем 0,7 м и нормой высева 600 тыс. шт. семян на 1 га. Повторность полевого опыта – трехкратная. Размещение делянок в опыте – рендомизированное.

Почва опытного участка – светло-каштановая, характеризуется тяжелосуглинистой текстурой. Мощность гумусового слоя составляет 0,00-0,28 м, содержание гумуса в этом слое почвы – от 1,3 до 1,4%. Реакция почвенного раствора слабощелочная, рН водной вытяжки колеблется в пределах от 7,2 до 7,7. Уровень питательных элементов в почве показывает низкое содержание азота, умеренное содержание фосфора и высокое содержание калия. Плотность естественного сложения почвы для слоев 0,0-0,4 и 0,0-0,6 м составляет 1,38 и 1,43 т/м³ соответственно. Значения порозности варьируются от 46,64 до 51,59% в разных слоях.

Результаты и их обсуждение. В результате наблюдений была определена скорость разложения льняного полотна в зависимости от его размещения по профилю (15, 30 и 45 дней). По истечении этого срока полотна выкапывались и анализировались по изучаемым вариантам опыта.

Биологическая активность светло-каштановой почвы в наших наблюдениях на двух водных режимах почвы осуществлялась путем закладки тканевого материала на глубину 0,6 м. Было выбрано три срока определения с экспозицией: 15, 30 и 45 суток. По истечении указанных сроков полотна выкапывались и подвергались дальнейшим определениям в лабораторных условиях. Для удобства полотна подразделялись на три горизонта по профилю почвы: пахотный (0,00-0,20 м); подпахотный (0,20-0,40 м); глубокий (0,40-0,60 м).

На двух водных режимах почвы были заложены делянки, где изучали эффективность предпосевной инокуляции семян сои и варианты без применения обработок (рис. 1, 2).

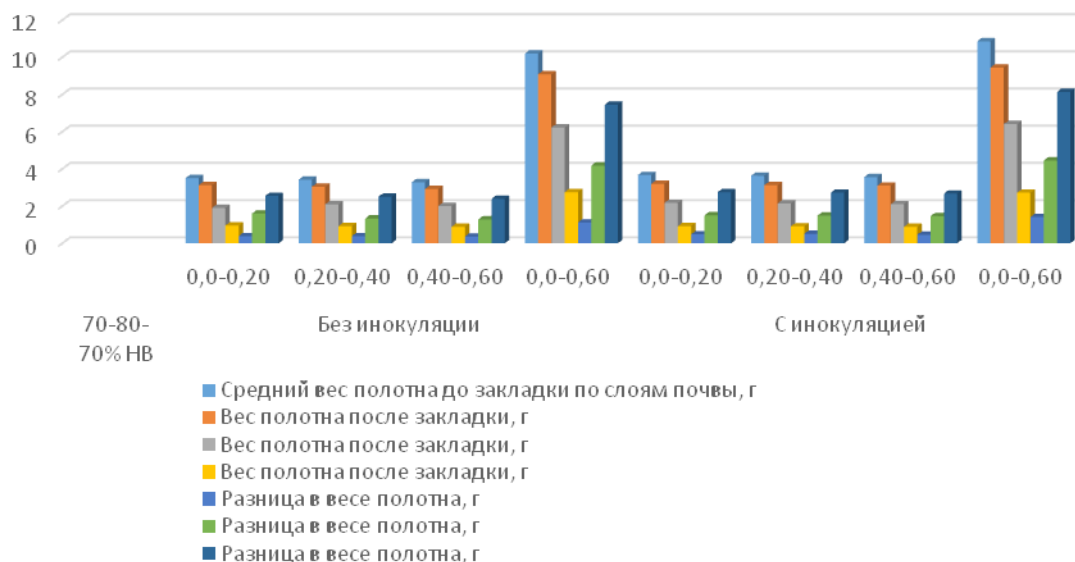


Рис. 1. Исследование влияния предпосевной инокуляцией семян на процесс разложения полотна по горизонтам почвы при дифференцированном режиме орошения за 2022-2023 гг.

Fig. 1. Study of the effect of pre-sowing inoculation of seeds on the process of decomposition of the canvas along the soil horizons under a differentiated irrigation regime for 2022-2023

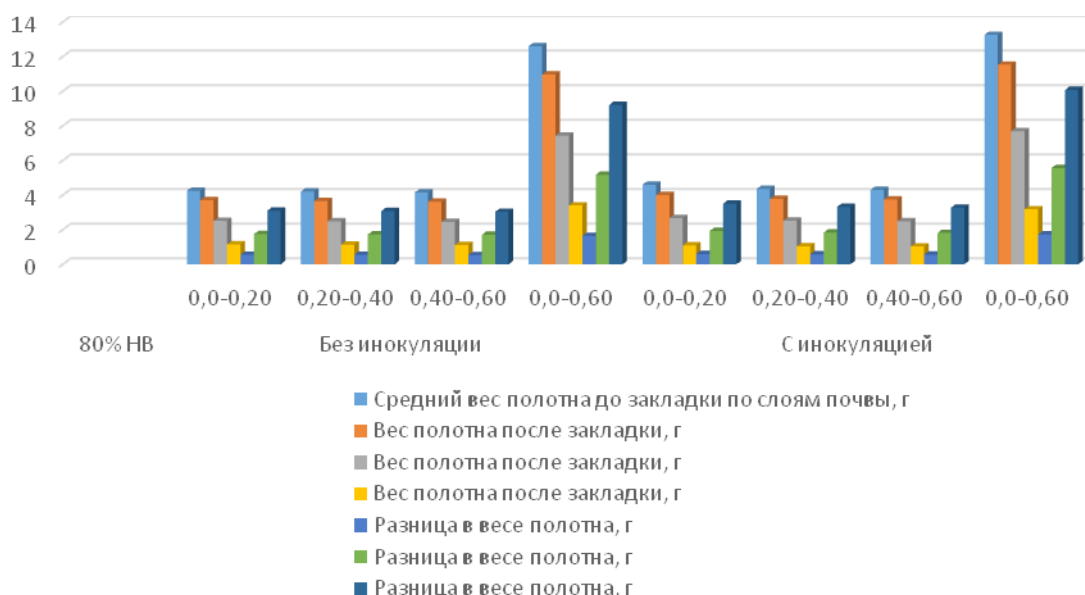


Рис. 2. Исследование влияния предпосевной инокуляцией семян на процесс разложения полотна по горизонтам почвы при постоянном водном режиме за 2022-2023 гг.

Fig. 2. Study of the effect of pre-sowing inoculation of seeds on the process of decomposition of the canvas along the soil horizons under a constant water regime for 2022-2023

Полученные данные показывают, что биологическая активность почвы снижается вниз по профилю, и наибольшие ее значения были отмечены по пахотному слою почвы на всех исследуемых вариантах. При этом варианты без инокуляции имели больший вес полотна, чем на вариантах с инокуляцией, по этим двум водным режимам почвы.

В процессе нахождения ткани в почве ее масса уменьшалась в зависимости от времени нахождения: 15, 30 и 45 дней. Явное отличие в массе льняной ткани было зафиксировано

при максимальном сроке (45 дней), когда наблюдалось почти полное ее разложение. Полученные результаты, касающиеся изменений в массе закладываемого материала, указывают на значительную интенсивность изменений в его весовых характеристиках.

Наименьшие весовые утраты в интервале 0,00-0,60 м составили 7,45 г на варианте с режимом орошения 70-80-70% HB без предварительной обработки семян. А на варианте с проведением инокуляции при этом же режиме почвы разница в весе между закладкой и извлечением

ткани составила 8,14 г. При поддержании постоянной величины уровня влажности почвы 80% НВ на варианте без использования обработки семян разница в массе по окончании 45-дневного нахождения экспозиции в почве составила 9,20 г. Максимальное отличие в весе, равное 10,04 г, было зафиксировано на том же варианте водного режима почвы, но с инокуляцией семян.

Исходя из веса материала, заложенного в почву, можно определить степень разложения полотна в профиле светло-каштановой почвы на выбранных вариантах эксперимента.

Анализируя уровень разложения материала на основе имеющихся данных (15, 30 и 45 суток), следует отметить, что степень разложения за первый период нахождения полотна в почве составляла от 11 до 13%. Во время второго срока

наблюдений значение разложения полотна увеличилось и уже находилось в пределах от 39 до 42%, а на третьем этапе достигало 73-76%. Все это говорит о том, что процесс разложения такого полотна активно осуществлялся на делянках с проведением инокуляции семян при поддержании влажности почвы на уровне до 80% НВ, где в среднем по слою 0,0-0,6 м достигал своего максимума в 44,29%.

Произошедшие изменения в биологической активности почвы, отраженной на полотне, полностью совпадают с результатами продуктивности по изучаемым вариантам опыта.

Исходя из приведенных данных (рис. 4), следует отметить, что уровень урожайности полученного зерна в 2022 г. заметно уступал уровню продуктивности в 2023 г. ввиду более благоприятных

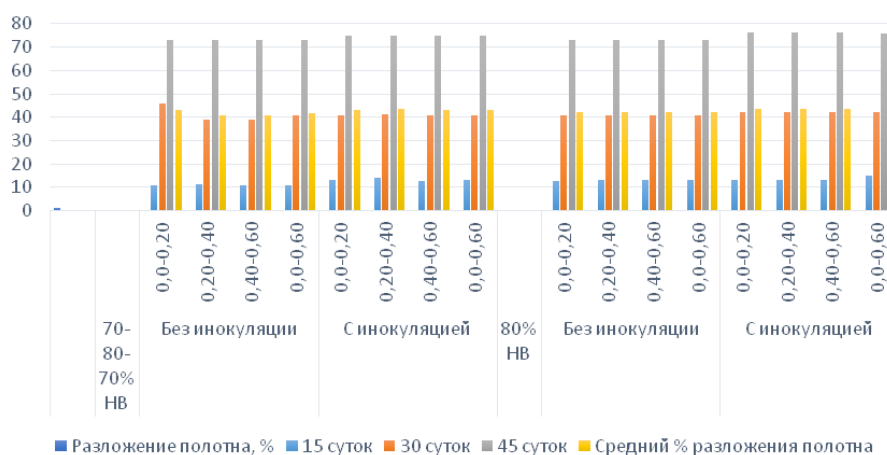


Рис. 3. Степень разложения ткани по почвенному профилю по исследуемым вариантам опыта за 2022-2023 гг.

Fig. 3. The degree of tissue decomposition by soil profile according to the studied variants of the experiment for 2022-2023

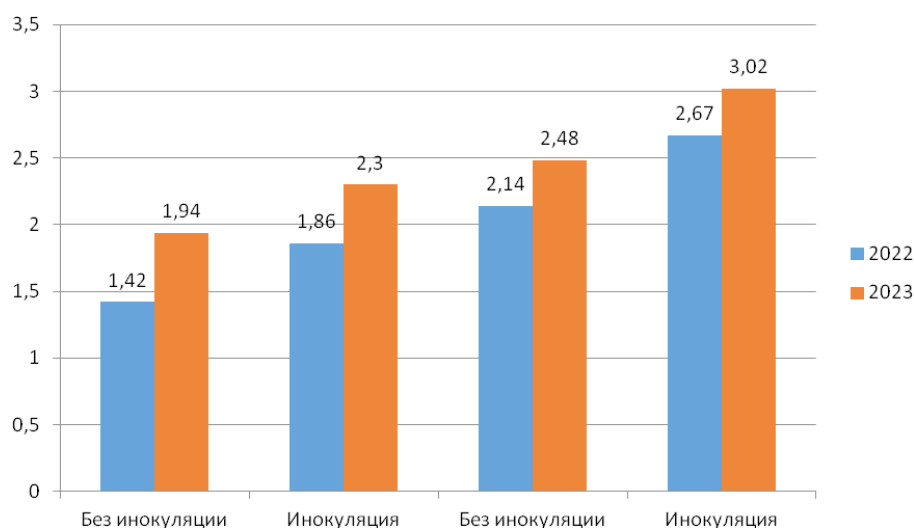


Рис. 4. Действие предпосевной инокуляции на продуктивность зерна сои при двух уровнях влажности почвы в период с 2022 по 2023 гг.

Fig. 4. Effect of pre-sowing inoculation on soybean grain productivity at two levels of soil moisture in the period from 2022 to 2023

условий роста и развития сои. При поддержании предполивного порога влажности на уровне 80% НВ имел некоторые положительные моменты по сравнению с дифференцированным. Однако по обоим водным режимам почвы наглядно просматривается преимущество предпосевной обработки семян биологическими инокулянтами. Полученные данные по продуктивности сои в целом за два года составляют: при дифференцированном водном режиме на необработанном варианте сбор зерна сои был получен на уровне 1,68 т/га, в то время как при проведении инокуляции семян – 2,08 т/га. При постоянном водном режиме с поддержанием предполивного порога влажности до 80% НВ по вариантам опыта она увеличилась от 2,31 до 2,85 т/га.

Анализируя полученные значения качества зерна сои (табл. 1), необходимо подчеркнуть, что отмеченные показатели полностью совпадают с урожайностью зерна. Максимальные результаты этих значений были отмечены при поддержании НВ не ниже 80% и при осуществлении допосевной инокуляции семян. Исходя из этого несколько худшие качественные значения были получены при переменном водном режиме – 70-80-70% НВ без инокуляции, которые составили: N общ. – 4,15%; P – 0,81%; K – 2,08%; сырой жир – 20,59%; клетчатка – 8,24%. А наилучшим показал себя вариант с постоянным режимом орошения (80% НВ) и инокуляцией семян, который достигал: N общ. – 5,04%; P – 0,90%; K – 2,15%; сырой жир – 21,21%; клетчатка – 9,74%.

Таблица 1. Качественные показатели зерна сои по изучаемым факторам за два года 2022-2023 гг.

Table 1. Qualitative indicators of soybean grain by the factors studied for two years 2022-2023

Изучаемые варианты Studied options		N общ., % N total, %	P, %	K, %	Сырой жир, % Crude fat, %	Клетчатка, % Fiber content, %
70-80-70% НВ	без инокуляции / without inoculation	4,15	0,81	2,08	20,59	8,24
	с инокуляцией / with inoculation	4,27	0,84	2,13	20,95	8,80
80% НВ	без инокуляции / without inoculation	4,78	0,86	2,13	21,00	9,09
	с инокуляцией / with inoculation	5,04	0,90	2,15	21,21	9,74

Выводы

На основании полученных опытных данных следует отметить наибольшую эффективность предпосевной обработки семян сои биологическими препаратами, которые оказывают благоприятное действие на биологическую активность почвенного горизонта светло-каштановой почвы.

Значения биологической активности почвы на исследуемых делянках полностью

совпадают с продуктивностью зерна сои и его качеством.

За два года наблюдений наилучшим вариантом следует признать постоянный водный режим орошения почвы (80% НВ) с проведением допосевной инокуляции семян сои. Все это позволяло достичь продуктивности зерна сои на уровне 2,85 т/га с достижением высоких значений параметров качества зерна.

Список использованных источников

- Грядунцова Н.В. Зернобобовые культуры в экономике России / Грядунцова Н.В., Зотиков В.И. и др. // Земледелие. 2014. № 4. С. 6-8.
- Бельшклина М.Е. Рост и развитие сортов сои северного экотипа в зависимости от влияния лимитирующих факторов вегетационного периода / М.Е. Бельшклина, Т.П. Кобозева, Е.В. Гуреева // Аграрный научный журнал. 2020. № 9. С. 4-9. DOI: 10.28983/asj.y2020i9pp4-9.
- Board J.E., Kahlon C.S. Soybean Yield Formation: What Controls It and How It Can Be Improved, Soybean Physiology and Biochemistry, Prof. Hany El-Shemy (Ed.) 2011. 488 p.
- Дорохов А.С. Производство сои в Российской Федерации: основные тенденции и перспективы развития / А.С. Дорохов, М.Е. Бельшклина, К.К. Болшева // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 3 (47). С. 25-33. DOI: 10.18286/1816-4501-2019-3-25-33.
- Волобуева О.Г. Повышение эффективности бобово-ризобияльного симбиоза при участии

References

- Gryadunova N.V. Leguminous crops in the Russian economy / V.I. Zotikov, N.V. Gryadunova, V.I. Zotikov [et al.] // Agriculture. 2014. No. 4. P. 6-8.
- Belyshkina M.E. Growth and development of soybean varieties of the northern ecotype depending on the influence of limiting factors of the growing season / M.E. Belyshkina, T.P. Kobozeva, E.V. Gureeva // Agrarian Scientific Journal. 2020. No. 9. P. 4-9. DOI 10.28983/asj.y2020i9pp4-9.
- Board J.E. Soybean Yield Formation: What Controls It and How It Can Be Improved, Soybean Physiology and Biochemistry, Prof. Hany El-Shemy (Ed.)/J.E.Board C.S. Kahlon. 2011. 488 p.
- Dorokhov A.S. Soybean production in the Russian Federation: main trends and development prospects / A.S. Dorokhov, M.E. Belyshkina, K.K. Bolshcheva // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2019. No. 3(47) P. 25-33. DOI 10.18286/1816-4501-2019-3-25-33.
- Volobueva O.G. Improving the efficiency of legume-rhizobial symbiosis with the participation of a biological product and growth regulators / O.G. Volobueva

биопрепарата и регуляторов роста // Зернобобовые и крупяные культуры. 2022. № 3 (43). С. 26-32. DOI: 10.24412/2309-348X-2022-3-26-32.

6. Москвичев А.Ю. Биологическая активность почвы в связи с предпосевной инокуляцией семян сои на двух режимах орошения светло-каштановой почвы / А.Ю. Москвичев, С.А. Агапова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 4 (72). С. 49-58. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-04.

7. Лыгин А.В. Влияние фунгицидных протравителей и инокулянта на продуктивность сои в условиях производственного опыта / А.В. Лыгин, Д.А. Белов, В.А. Крылов, М.Ф. Крылова // Земледелие. 2023. № 4. С. 44-47. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-4-44-47.

8. Агафонов О.М., Шабалдас О.Г. Применение бактериальных удобрений и стимуляторов роста при выращивании сои в условиях восточной зоны Краснодарского края. Ставрополь: Издательство «АГРУС», 2020. 136 с.

9. Балакай Г.Т. Урожайность сортов сои при поливе дождеванием и системами капельного орошения в условиях Ростовской области / Г.Т. Балакай, С.А. Селицкий // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2019. № 3 (35). С. 80-97.

10. Бородычев В.В. Особенности применения минеральных удобрений при возделывании сои при орошении в условиях Нижнего Поволжья / В.В. Бородычев, Н.М. Лытов // Плодородие. 2015. № 1 (82). С. 33-35.

11. Бельшккина М.Е. Проблема производства растительного белка и роль зерновых бобовых культур в ее решении // Природобустройство. 2018. № 2. С. 65-73. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-2-65-73.

12. Мухаметханова С.С. Сорты сои Нижневолжской селекции / С.С. Мухаметханова, В.В. Толоконников // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2 (70). С. 247-256. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-28.

13. Biological nitrogen fixation (BNF) by legume crops in Yeurope/J.A. Baddeley S. Jones, C.F. Ye Topp C.A. Watson, J. Helming, F.L. Stoddard. – Text: electronic // Legume Futures Report 1.5. 2013: Available at: URL: <http://www.legumefutures.de>. (In English).

// Legumes and cereals. 2022. No. 3(43). P. 26-32. DOI 10.24412/2309-348X-2022-3-26-32.

6. Moskvichev A.Y. Biological activity of the soil in connection with the pre-sowing inoculation of soybean seeds in two irrigation modes of light chestnut soil / A.Y. Moskvichev, S.A. Agapova // Izvestia of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex: Science and higher professional education. 2023. No. 4(72). P. 49-58. DOI 10.32786/2071-9485-2023-04-04.

7. Lygin A.V., Belov D.A., Krylov V.A., Krylova M.F. Influence of fungicidal mordants and inoculant on soybean productivity in conditions of production experience // Agriculture. 2023. No. 4. P. 44-47. DOI 10.24412/0044-3913-2023-4-44-47.

8. Agafonov O.M. The use of bacterial fertilizers and growth stimulants in soybean cultivation in the eastern zone of the Krasnodar Territory / O.M. Agafonov, O.G. Shabaldas. Stavropol: AGRUS Publishing House, 2020. 136 p. ISBN 978-5-9596-1626-7.

9. Balakai G.T. Yield of soybean varieties during irrigation by sprinkling and drip irrigation systems in the Rostov region / G.T. Balakai, S.A. Selitsky // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2019. No. 3 (35). pp. 80-97.

10. Borodychev V.V. Features of the use of mineral fertilizers in soybean cultivation during irrigation in the conditions of the Lower Volga region / V.V. Borodychev, N.M. Lytov // Fertility. 2015. No. 1(82). P. 33-35.

11. Belyshkina M.E. The problem of vegetable protein production and the role of grain legumes in its solution / M.E. Belyshkina // Prirodoobustrojstvo. 2018. No 2. P. 65-73. DOI 10.26897/1997-6011/2018-2-65-73

12. Mukhametkhanova S.S. Soybean varieties of the Lower Volga breeding / S.S. Mukhametkhanova, V.V. Tolokonnikov // Izvestia of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex: Science and higher professional education. 2023. No. 2(70). P. 247-256. DOI 10.32786/2071-9485-2023-02-28.

13. Biological nitrogen fixation (BNF) by legume crops in Yeurope/J.A. Baddeley S. Jones, C.F. Ye Topp C.A. Watson, J. Helming, F.L. Stoddard. – Text: electronic // Legume Futures Report 1.5. 2013: Available at: URL: <http://www.legumefutures.de>. (In English).

Об авторах

Светлана Александровна Агапова, младший научный сотрудник; <https://orcid.org/0000-0001-5159-6578>; sveta-sxi@rambler.ru

Александр Юрьевич Москвичев, д-р с.-х. наук, профессор; <https://orcid.org/0000-0002-9309-2885>; moskvichev56@bk.ru

Authors Information

Svetlana A. Agapova, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5159-6578>; sveta-sxi@rambler.ru

Alexander Y. Moskvichev, Doctor of Agricultural Sciences Sci., Professor; <https://orcid.org/0000-0002-9309-2885>; moskvichev56@bk.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Агапова С.А., Москвичев М.Ю. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare that there is no conflict of interest

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 02.08.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 15.11.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 15.11.2024

Agapova S.A., Moskvichev M.Yu. carried out practical and 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.

All the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. All authors are equally responsible for violations in the field of ethics of scientific publications.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-40-47>

УДК 631.6.02:504.064:504.054



ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СЕДИМЕНТАЦИИ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ МЕЛИОРИРОВАННЫХ ЗЕМЕЛЬ ПОЙМЕННОГО АГРОЛАНДШАФТА ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

А.В. Ильинский[✉], К.Н. Евсенкин, А.А. Павлов

Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, корп. 2, Россия

Аннотация. Целью исследований являлась экологическая оценка влияния паводковой седиментации на пахотную аллювиальную почву затапливаемой поймы в период весеннего половодья р. Ока. Эксперимент по изучению поступления тяжелых металлов и мышьяка вместе с паводковыми седиментами на пахотные земли затапливаемой части поймы р. Ока проводился в 2023 г. на участке площадью 20 га, расположенном в 2 км к северу от границы г. Рязани. Изучение седиментной нагрузки на опытном участке выполнялось с помощью заблаговременно установленных на поверхности почвы седиментационных ловушек, расположенных друг от друга на расстоянии 0,45 км. В ходе проведения эксперимента установлен уровень седиментной нагрузки, изучено содержание поллютантов в паводковых седиментах в сравнении с подстилающей почвой, проведена оценка степени загрязнения седиментов тяжелыми металлами и мышьяком, проанализирована структура поступления в агроландшафт изучаемых химических элементов с паводковыми седиментами. Из рассмотренных поллютантов в паводковых седиментах стационарного участка наблюдений больше всего концентрируется кадмий, со значительным отставанием следуют ртуть, цинк, никель, марганец, свинец, мышьяк, а медь и хром концентрируются менее активно. Поступление валовых форм тяжелых металлов составило: марганец – 8793,4 г/га; цинк – 1435,28 г/га; хром – 539 г/га; никель – 523,6 г/га; медь – 280,28 г/га; свинец – 238,7 г/га; кадмий – 112,42 г/га; мышьяк – 87,93 г/га; ртуть – 0,65 г/га. Выявленная тенденция загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком в процессе седиментогенеза на территорию пойменного агроландшафта р. Ока обуславливает необходимость разработки комплексных профилактических и реабилитационных мероприятий, содержащих в себе избирательный выбор культур, не накапливающих в себе тяжелые металлы, а также использование органоминеральных мелиорантов. При этом рекомендуется проведение агроэкологического мониторинга исследуемого агроландшафта на основе изучения циклов миграции тяжелых металлов.

Ключевые слова: паводковые седименты, пойменный агроландшафт, седиментная нагрузка, техногенное загрязнение, тяжелые металлы, экологическая безопасность

Формат цитирования: Ильинский А.В., Евсенкин К.Н., Павлов А.А. Экологическая оценка влияния седиментации на загрязнение мелиорированных земель пойменного агроландшафта тяжелыми металлами // Природообустройство. 2025. № 1. С. 40-47. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-40-47>

Scientific article

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE EFFECT OF SEDIMENTATION ON THE POLLUTION OF RECLAIMED LANDS OF THE FLOODPLAIN AGRICULTURAL LANDSCAPE WITH HEAVY METALS

A.V. Ilyinsky[✉], K.N. Evsenkin, A.A. Pavlov

All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya str, 44, building 2, Russia

Abstract. The purpose of the research was an environmental assessment of the impact of flood sedimentation on the arable alluvial soil of the floodplain during the spring flood of the river Oka. An experiment to study the supply of heavy metals and arsenic along with flood sediments to arable lands in the flooded part of the river floodplain Oka was carried out in 2023 on an area of 20 hectares located 2 km north of the border of Ryazan. The study of sediment load on the experimental site was carried out using sediment traps installed in advance on the soil surface, located at a distance of 0.45 km from each other. During the experiment, the level of the sediment load was established, the content of pollutants in flood sediments was studied in comparison with the underlying soil, the degree of contamination of sediments

with heavy metals and arsenic was assessed and the structure of the flow of the studied chemical elements into the agricultural landscape with flood sediments was analyzed. Of the pollutants considered, cadmium is the most concentrated in flood sediments at the stationary observation site, followed by mercury, zinc, nickel, manganese, lead, and arsenic with a significant lag, and copper and chromium are concentrated less actively. The intake of gross forms of heavy metals was: manganese – 8793.4 g/ha; zinc – 1435.28 g/ha; chromium – 539 g/ha; nickel – 523.6 g/ha; copper – 280.28 g/ha; lead – 238.7 g/ha; cadmium – 112.42 g/ha; arsenic – 87.93 g/ha; mercury – 0.65 g/ha. The revealed tendency of contamination with heavy metals and arsenic in the process of sedimentogenesis is on the territory of the floodplain agricultural landscape of the river Oka conditions the need to develop comprehensive preventive and rehabilitation measures that include a selective selection of crops that do not accumulate heavy metals, as well as the use of organomineral ameliorants. At the same time, it is recommended to conduct agroecological monitoring of the studied agricultural landscape based on studying the cycles of migration of heavy metals.

Keywords: flood sediments, floodplain agricultural landscape, sediment load, technogenic pollution, heavy metals, environmental safety

Format of citation: Ilyinsky A.V., Evsenkin K.N., Pavlov A.A. Environmental assessment of the effect of sedimentation on the pollution of reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape with heavy metals // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 40-47. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-40-47>

Введение. Одним из важнейших аспектов экологической оценки сельскохозяйственных земель является контроль над загрязнением почвы поллютантами, поступающими от антропогенных источников [1-4]. Наибольший вклад в поступление тяжелых металлов на пахотные земли затопляемой поймы вносят паводковые седименты, оседающие на поверхности почвы после схода полых вод [5-7]. Загрязнение пашни тяжелыми металлами влечет за собой потенциальный риск ухудшения качества продукции растениеводства и животноводства [8]. В процессе постоянного загрязнения почв тяжелыми металлами происходит их избыточная транслокация в растительные ткани сельскохозяйственных культур [2, 9, 10]. Распределение паводковых седиментов зависит от целого ряда условий – таких, как интенсивность прохождения половодья, концентрации взвешенных веществ в воде, рельеф местности, шероховатость почвенного покрова [11, 12]. В этой связи исследования по определению седиментной нагрузки, оценка химического состава и анализ структуры поступления тяжелых металлов с паводковыми седиментами на пойменный агроландшафт являются важным элементом экологического мониторинга сельскохозяйственного агроландшафта, результаты которого послужат обоснованием необходимости проведения агромелиоративных мероприятий, направленных на повышение плодородия пахотных почв пойменных агроландшафтов [13-15].

Цель исследований: экологическая оценка влияния паводковой седиментации на пахотные земли агроландшафта поймы р. Ока.

Материалы и методы исследований. Экспериментальные исследования по изучению загрязнения пойменного агроландшафта

поллютантами, поступающими в составе паводковых седиментов на пахотные земли, проводились на опытном участке площадью 20 га, расположенном в 2 км от границы г. Рязани (рис. 1).

На исследуемой территории распространены аллювиальные луговые среднесуглинистые почвы, характеризующиеся: близкой к нейтральной кислотной средой, гидролитической кислотностью – 1,10 ммоль/100 г; высокой степенью насыщенности основаниями – 94,3%; очень высоким содержанием обменного кальция – 25,76 ммоль/100 г; повышенным подвижным фосфором – 109 мг/кг; низким, ближе к среднему, обменным калием – 80 мг/кг [16].

Выбор места расположения опытного участка обоснован в первую очередь тем, что на данном участке поймы расположена пашня, для которой необходимо учитывать влияние седиментной нагрузки. Кроме того, по результатам

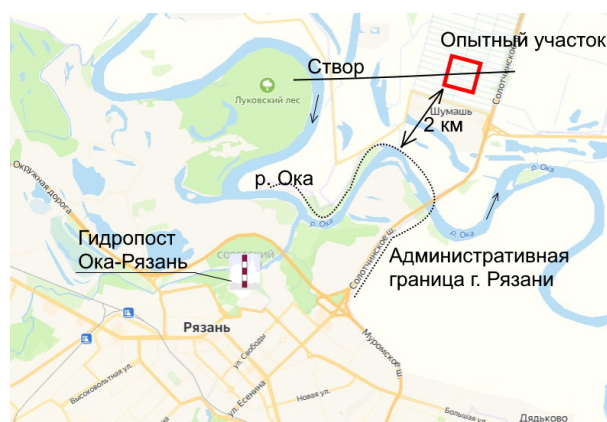


Рис. 1. Схематичное расположение участка проведения исследований

Fig. 1. Schematic location of the research site for the floodplain agricultural landscape of the river Oka

архивных исследований ВНИИГиМ, территория центральной поймы подвержена техногенному воздействию (коммунальное, промышленное и сельскохозяйственное) [7, 11]. Основными источниками антропогенной нагрузки являются промышленные и коммунальные сбросы в р. Ока, выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ энергетическим сектором, транспортом, промышленностью и сельским хозяйством, которые осаждаются на рельеф местности [7].

Министерство природопользования Рязанской области в своих отчетах отмечает, что уровень загрязнения атмосферного воздуха в региональном центре считается высоким, как и степень загрязнения воды р. Ока за пятилетний период, вода очень загрязненная и даже грязная по большому перечню загрязняющих веществ [17, 18]. По данным государственной статистической отчетности [17, 18] и результатам ранее проведенных исследований [7, 11, 21], на данной территории наиболее приоритетными и специфическими поллютантами, получившими наибольшее распространение, являются цинк, свинец, кадмий, никель, хром, ртуть, мышьяк, медь, марганец.

Изучение седиментной нагрузки на исследуемой территории осуществлялось с помощью зафиксированных на рельефе четырех седиментационных ловушек (рис. 2), представляющих собой ворсистые пластиковые маты, расположенных друг от друга на расстоянии 0,45 км. Сразу после схода полых вод ловушки снимались с поверхности почвы, затем транспортировались в лабораторию, высушивались (до воздушно-сухого состояния наилка), после чего проводилось извлечение седиментов (рис. 3) посредством встряхивания матов и их чисткой лопаткой

с последующим определением массы седиментов и направлением на химико-аналитические исследования.

Размещение ловушек на рельефе опытного участка выполнено 23 марта 2023 г., накопление седиментов осуществлялось в течение 42 дней. Отбор почвенных образцов осуществлен методом конверта в интервале 0,0-0,2 м.

Лабораторный анализ отобранных проб паводковых седиментов и подстилающей аллювиальной почвы на содержание поллютантов выполнен по стандартным методикам определения содержания химических показателей: для седиментов – значение водородного показателя (рН) по ПНД Ф 16.2:2.2.3:3.3.33-02; для почвы – значение водородного показателя (рН) по ГОСТ 26483-85; для седиментов и почвы – содержание кислоторастворимых форм меди, цинка, свинца, кадмия, никеля, хрома, ртути, марганца по методике выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии (С.П., 2008); для мышьяка – МУ по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом (МСХ. ЦИНАО, 1993).

По данным гидрологического поста на р. Ока в г. Рязани, полученным за 23 года, высшая точка половодья приходится на 18-19 апреля и составляет 220 см выше нуля поста. Абсолютный максимум – 618 см (28 апреля 2013 г.). Весеннее половодье имеет однопиковый характер. Абсолютного максимума в 2023 г. паводок достиг 6 апреля и составил 590 см, что приравнивается ко второму уровню неблагоприятного явления, при котором русло выходит из берегов, а паводок характеризуется как средний [19].



Рис. 2. Снятие седиментационных ловушек на опытном участке после прохождения весеннего половодья

Fig. 2. Removal of sediment traps at the experimental site after the spring flood



Рис. 3. Внешний вид отобранной пробы паводкового седимента

Fig. 3. Appearance of the collected flood sediment sample

Осенне-зимний период 2022-2023 гг. характеризовался обильными осадками, превышающими климатическую норму, вследствие чего предзимнее увлажнение почвы в бассейне р. Ока было в норме, в некоторых местах переувлажнение почвы отмечалось до 70% выше нормы. Чередование оттепелей и морозов в период с декабря 2022 г. по январь 2023 г. местами на полях образовало ледяную корку. К середине февраля глубина промерзания почвы составила до 87 см, что на 40% выше февральской нормы. Высота снежного покрова и количество влаги в снеге всю зиму были ниже нормы, к концу февраля благодаря обильным снегопадам запас воды в снеге приблизился к норме. Уровень воды в р. Ока в период зимнего паводка 2023 г. был выше, чем за последние годы, на 1,5 м. После прохождения пика зимнего паводка отметка воды к концу февраля 2023 г. снизилась на 3 м.

Прохождение половодья в 2023 г. по скорости повышения уровня воды можно подразделить на 4 периода: с 12 по 14 марта – медленное, стабильное повышение в пределах 8-10 см за сутки; с 14 по 18 марта – средней интенсивности повышение на 22-35 см в сутки; с 18 по 25 марта – период максимального роста на 40-56 см в сутки; с 25 марта по 6 апреля – замедление и достижение пика до 7-20 см в сутки [20].

Результаты и их обсуждение. Исследования показали, что масса седиментов на территории обследованного участка агроландшафта варьирует от 10,8 до 18,6 т/га, что может быть связано с небольшими перепадами рельефа на данной местности. При этом среднее значение седиментной нагрузки на опытный участок пойменного агроландшафта в 2023 г. составило 15,4 т/га (рис. 4).

Анализ результатов содержания валовых форм тяжелых металлов и мышьяка в паводковых седиментах (табл.) показал, что из изучаемых элементов только концентрация кадмия, относящегося к первому классу опасности веществ, в 3,65 раза превысила значение, установленное гигиеническими нормативами. По остальным элементам были получены следующие значения: Cu – 0,14 ОДК; Zn – 0,42 ОДК; Pb – 0,12 ОДК; Ni – 0,43 ОДК; Hg – 0,02 ПДК; As – 0,57 ОДК; Mn – 0,38 ОДК.

Анализ результатов химико-аналитических исследований показал, что в настоящее время содержание исследуемых элементов в аллювиальной почве соответствует требованиям экологических нормативов, но при этом зафиксировано превышение региональных фоновых концентраций: ртути – в 12,9 раза; цинка – в 2,29 раза;

никеля – в 1,51 раза; марганца – в 1,34 раза; свинца – в 1,31 раза; кадмия – в 1,05 раза. По критерию оценки химического загрязнения почва относится к верхнему пределу допустимой категории (Z_c соответствует 15,6).

При сопоставлении концентрации валовых форм тяжелых металлов и мышьяка в наилке с подстилающей аллювиальной луговой среднесуглинистой почвой отмечено, что наибольшее превышение их содержания в седиментах характерно для кадмия (в 38,4 раза), мышьяка (в 1,8 раза), цинка (в 1,16 раза), никеля (в 1,12 раза), марганца (в 1,07 раза), хрома (в 1,06 раза). По меди, свинцу и ртути превышение содержания в седиментах над подстилающей почвой зафиксировано не было.

На следующем этапе исследований для каждого из рассмотренных элементов был рассчитан коэффициент концентрации (рис. 5), определяемый как отношение содержания элемента в паводковых седиментах к региональному почвенному фону.

Эмпирический ряд накопления тяжелых металлов и мышьяка в паводковых седиментах, установленный на основе расчетных значений коэффициентов концентрации элементов, имеет следующий вид: $Cd > Hg > Zn > Ni > Mn > Pb > As > Cu > Cr$. По критерию оценки химического загрязнения паводковые седименты относятся к высокоопасной категории (Z_c соответствует 46,2).

Анализ полученных результатов показывает, что из рассмотренных поллютантов в паводковых седиментах стационарного участка наблюдений более активно концентрируется кадмий, со значительным отставанием – ртуть, цинк, никель, марганец, свинец, мышьяк, а медь и хром

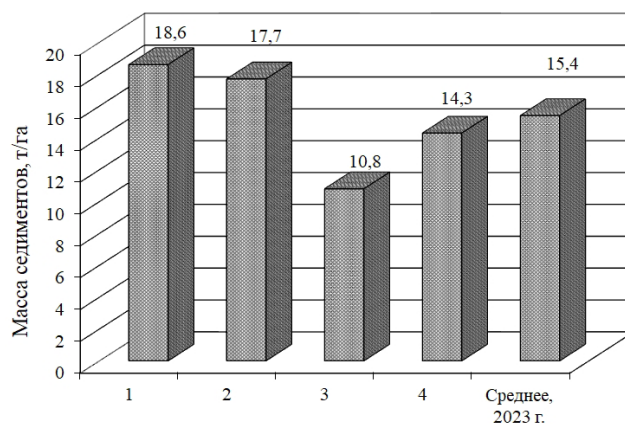


Рис. 4. Результаты расчета уровня седиментной нагрузки на стационарный участок наблюдений
Fig. 4. Results of calculation of sediment load on a stationary observation site

концентрируются менее активно. При этом, в соответствии с ГОСТ Р 17.4.1.02-83, кадмий, цинк, ртуть, свинец и мышьяк относятся к первому классу, никель, медь и хром – ко второму классу, марганец – к третьему классу опасности химических веществ.

Оценка поступления тяжелых металлов и мышьяка с паводковыми седиментами на территорию стационарного участка мониторинговых наблюдений, расположенного в пойме р. Ока, указывает на значительный привнос исследуемых элементов в аллювиальную почву (рис. 6).

Таблица. Результаты определения содержания валовых форм тяжелых металлов и мышьяка в паводковых седиментах и пахотном слое аллювиальной почвы стационарного участка наблюдений

Table. Results of determining the content of bulk forms of heavy metals and arsenic in flood sediments and the arable layer of alluvial soil at the stationary observation site

Элемент <i>Element</i>	Седимент Почва / <i>Sediment Soil</i>	Отклонение / <i>Deviation</i>		Рег. фон [21-23]	ОДК APC
		мг/кг <i>mg / kg</i>	%		
Медь (Cu) / <i>Copper</i>	$\frac{18,2 \pm 0,2}{22,7 \pm 0,3}$	-4,5	-19,82	27	132
Цинк (Zn) / <i>Zinc</i>	$\frac{93,2 \pm 3,1}{80,1 \pm 1,8}$	13,1	16,35	35	220
Свинец (Pb) / <i>Lead</i>	$\frac{15,5 \pm 0,6}{15,8 \pm 0,4}$	-0,3	-1,9	12	130
Кадмий (Cd) / <i>Cadmium</i>	$\frac{7,3 \pm 0,08}{0,19 \pm 0,02}$	7,11	3742,11	0,18	2,0
Никель (Ni) / <i>Nickel</i>	$\frac{34,0 \pm 1,2}{30,3 \pm 1,1}$	3,7	12,21	20	80
Хром (Cr) / <i>Chrome</i>	$\frac{35,0 \pm 1,4}{33,1 \pm 1,3}$	1,9	5,74	61	—
Ртуть (Hg) / <i>Mercury</i>	$\frac{0,042 \pm 0,002}{0,129 \pm 0,003}$	-0,087	-67,44	0,01*	2,1**
Мышьяк (As) / <i>Arsenic</i>	$\frac{5,71 \pm 0,05}{3,2 \pm 0,08}$	2,51	78,44	5,0*	10
Марганец (Mn) / <i>Manganese</i>	$\frac{571,0 \pm 34}{534,0 \pm 29}$	37	6,93	400	1500

Измерения выполнены в четырех повторностях (среднее $\pm$ доверительный интервал, при $\alpha = 0,95$)
Measured in four repeats (mean $\pm$ confidence interval, $\alpha = 0.95$)

* – по данным Ю.А. Саета и др. [24]; / according to Y.A. Saet et al. [24]

** – ПДК в почве в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 / MPC in the soil in accordance with SanPiN 1.2.3685-21.

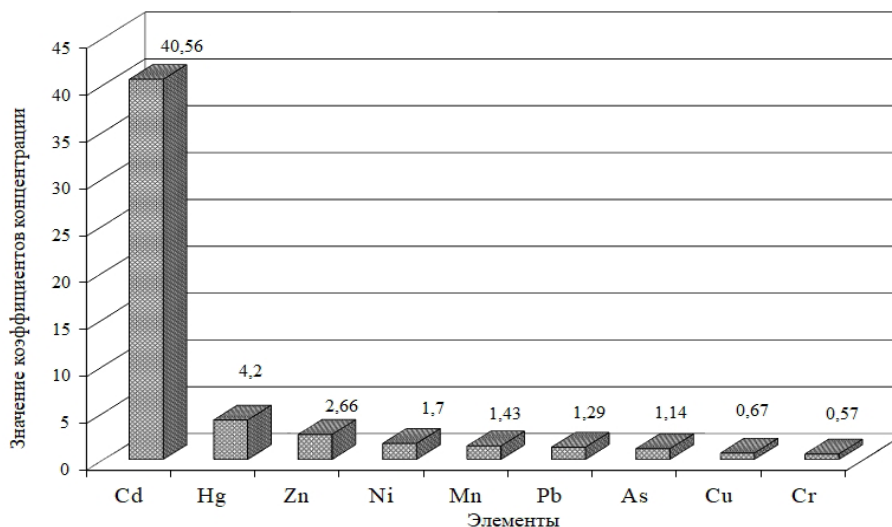


Рис. 5. Количественная оценка коэффициентов концентрации тяжелых металлов и мышьяка в паводковых седиментах

Fig. 5. Quantitative assessment of heavy metal and arsenic concentration coefficients in flood sediments

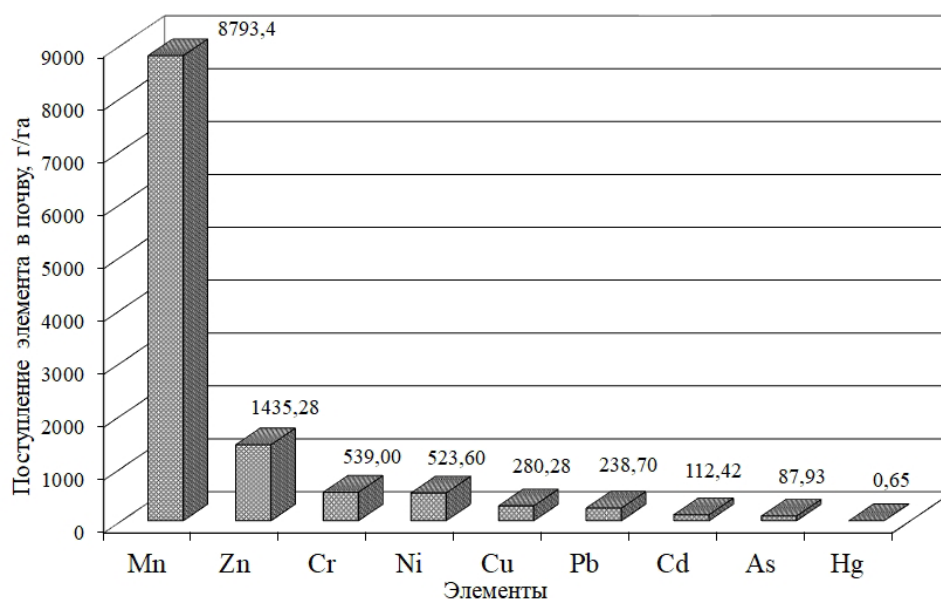


Рис. 6. Поступление тяжелых металлов и мышьяка с паводковыми седиментами в аллювиальную почву стационарного участка наблюдений

Fig. 6. The entry of heavy metals and arsenic with flood sediments into the alluvial soil of the stationary observation site

На основе анализа поступления тяжелых металлов и мышьяка в процессе седиментогенеза на территорию агроландшафта в пойме р. Ока был построен эмпирический ряд их поступления с паводковыми седиментами: $Mn > Zn > Cr > Ni > Cu > Pb > Cd > As > Hg$. Установлено, что в структуре поступления в почву с седиментами из изучаемых химических элементов на марганец приходится 73,2%, на цинк – 11,9%, на хром – 4,5%, на никель – 4,4%, на медь – 2,3%, на свинец – 2%, на кадмий – 0,9%, на мышьяк – 0,7%, на ртуть – менее 0,01%.

Выводы

Результаты выполненных исследований дают современное представление о степени антропогенного воздействия посредством паводковой седиментации на почвенный покров пахотных земель затопляемой поймы р. Ока Рязанской области на примере стационарного участка наблюдений. Содержание тяжелых металлов в паводковых седиментах значительно выше, чем в подстилающей почве: по Cd – в 38,4 раза; по As, Zn, Ni, Mn, Cr – в 1,06-1,8 раз. При этом представленная характеристика химического состава паводковых седиментов свидетельствует

о большом превышении фоновых значений: по Cd – в 40,6 раза; по Hg, Zn, Ni – в 1,7-4,2 раз; по Mn, Pb, As – в 1,1-1,4 раз.

Выполненный количественный анализ поступления поллютантов с паводковыми седиментами на почвенный покров выявил тенденцию загрязнения пахотных земель, что обуславливает в перспективе потребность в разработке комплексных профилактических и реабилитационных мероприятий, содержащих избирательный выбор культур, не накапливающих в себе тяжелые металлы, а также использование органических мелиорантов. В этой связи возникает необходимость организации и проведения локального агроэкологического мониторинга содержания ТМ и мышьяка в паводковых седиментах и подстилающей почве с целью прогноза загрязнения пойменного агроландшафта на основе изучения циклов миграции тяжелых металлов.

Для оценки динамики экологического состояния пойменного агроландшафта представляется целесообразным изучение циклов миграции тяжелых металлов, учитывающих приходную и расходную части, на примере стационарного участка наблюдений, расположенного в центральной части поймы р. Ока.

Список использованных источников

1. Борисочкина Т.И. Геохимия тяжелых металлов почв урбанизированных ландшафтов зон воздействия металлургических предприятий / Т.И. Борисочкина, К.А. Колчанова // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25, № 10. С. 50-56. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-10-50-56.

References

1. Borisochkina T.I., Kolchanova K.A. Geochemistry of heavy metals in soils of urban landscapes affected by metallurgical enterprises // Ecology and industry of Russia. 2021. No. 10. P. 50-56. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-10-50-56.
2. Ilinskiy A., Vinogradov D., Politaeva N., Badenko V., Ilin I. Features of the Phytoremediation by Agricultural

2. Ilinskiy A., Vinogradov D., Politaeva N., Badenkov V., Ilin I. Features of the Phytoremediation by Agricultural Crops of Heavy Metal Contaminated Soils // *Agronomy*. 2023. № 13 (1). P. 127. DOI: 10.3390/agronomy13010127.
3. Ilinsky A.V., Selmen V.N., Selmen E.V., Karyakina S., Matyukhin M., Grebennikova V. Environmental substantiation of the use of soil based on sewage sludge from urban wastewater treatment plants in the landscaping of residential areas // In the collection: XV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2022». Springer. 2023. Pp. 3027-3036.
4. Ilinskiy A.V., Selmen V.N., Selmen E.V. et al. The use of soil based on sewage sludge from urban wastewater treatment plants in the greening of urban areas // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. № 2. Pp. 191-197.
5. Силаев А.Л. Распределение микроэлементов в почвах пойменного ландшафта р. Унеча / А.Л.Силаев, Г.В. Чекин, Е.В. Смольский // *Агрохимический вестник*. 2021. № 5. С. 12-17. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-003.
6. Kałmykow-Piwińska A., Falkowska E. Morphodynamic conditions of heavy metal concentration in deposits of the Vistula River valley near Kępa Gostecza (central Poland) // *Open Geosciences*. 2020. V. 12, № 1. Pp. 1036-1051.
7. Пыленок П.И. Влияние седиментации на качество аллювиальной почвы в пойме реки Ока // *Агрофизика*. 2020. № 4. С. 7-13.
8. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S. Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the east Donbass (Rostov region, Russia) // *Water and Ecology*. 2020. № 3 (83). Pp. 32-40. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.3.32-40.
9. Забашта А.В. Накопление тяжелых металлов в почвах предгорных районов Краснодарского края / А.В. Забашта, Н.Н. Забашта, Е.П. Лисовицкая // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14, № 1 (52). С. 22-26. DOI: 10.12737/article_5ccedba6e0c8c9.68580698.
10. Kalimoldina L.M., Sultangazieva G.S., Suleimеноva M.Sh. Contamination of soils with heavy metal in the urban area of Almaty // *Почвоведение и агрохимия*. 2022. № 3. Pp. 38-45. DOI: 10.51886/1999-740X_2022_3_38.
11. Новосельцев В.Н. Техногенное загрязнение речных экосистем: Монография / В.Н. Новосельцев, И.Б. Бесфамильный, Б.М. Кизяев, В.Е. Райнин. М.: Научный мир, 2002. 140 с.
12. Ильинский А.В. Оценка поступления питательных веществ с седиментами на пахотные земли пойменного агроландшафта / А.В. Ильинский, К.Н. Евсенкин, А.А. Павлов // *Экологические системы и приборы*. 2024. № 2. С. 24-31. DOI: 10.25791/esip.2.2024.1430.
13. Кирейчева Л.В. Состояние пахотных земель Черноземной зоны Российской Федерации и основные направления повышения плодородия почв / Л.В. Кирейчева, В.А. Шевченко // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020. № 2. С. 12-16. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12021.
14. Михайлушкин П.В. Органическое земледелие – направление перехода к «зеленой» экономике в России / П.В. Михайлушкин, А.Р. Алиева // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020. № 2. С. 17-19. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12022.
15. Германова С.Е. Воздействие антропогенных факторов на сельскохозяйственные почвы / Петухов Н.В., Самброс Н.Б., Пивень Е.А., Зинченко А.В. // *Международный Crops of Heavy Metal Contaminated Soils // Agronomy*. 2023. No. 13(1). DOI: 10.3390/agronomy13010127.
3. Ilinsky A.V., Selmen V.N., Selmen E.V., Karyakina S., Matyukhin M., Grebennikova V. Environmental substantiation of the use of soil based on sewage sludge from urban wastewater treatment plants in the landscaping of residential areas // In the collection: XV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2022». 2023. Springer. 2023. P. 3027-3036.
4. Ilinskiy A.V., Selmen V.N., Selmen E.V. The use of soil based on sewage sludge from urban wastewater treatment plants in the greening of urban areas // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 2. P. 191-197.
5. Silaev A.L., Chekin G.V., Smol'sky E.V. Distribution of microelements in soils of the floodplain landscape of the river. Unecha // *Agrochemical Bulletin*. 2021. No. 5. P. 12-17. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-003.
6. Kałmykow-Piwińska A., Falkowska E. Morphodynamic conditions of heavy metal concentration in deposits of the Vistula River valley near Kępa Gostecza (central Poland) // *Open Geosciences*. 2020. No. 1. P. 1036-1051.
7. Pylenok P.I. The influence of sedimentation on the quality of alluvial soil in the floodplain of the Oka River // *Agrophysics*. 2020. No 4. P. 7-13.
8. Zakrutkin V.E. Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S. Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the east Donbass (Rostov region, Russia) // *Water and Ecology*. 2020. No. 3(83), P. 32-40. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.3.32-40.
9. Zabashta A.V., Zabashta N.N., Lisovitskaya E.P. Accumulation of heavy metals in soils of foothill areas of the Krasnodar region // *The Herald of Kazan State Agrarian University*. 2019. No. 1(52), pp. 22-26. DOI: 10.12737/article_5ccedba6e0c8c9.68580698.
10. Kalimoldina L.M., Sultangazieva G.S., Suleimеноva M.Sh. Contamination of soils with heavy metal in the urban area of Almaty // *Soil Science and Agrochemistry*. 2022. No. 3. P. 38-45. DOI: 10.51886/1999-740X_2022_3_38.
11. Novosel'tsev V. N., Besfamil'nyi I. B., Kizyaev B.M., Rainin V.E. Technogenic pollution of river ecosystems. The monograph. Moscow: Scientific world. 2002. 140 p.
12. Ilyinsky A.V., Evsenkin K.N., Pavlov A.A. Assessment of nutrient intake with sediments on arable lands of the floodplain agricultural landscape // *Ecological systems and devices*. 2024. No. 2. P. 24-31. – DOI 10.25791/esip.2.2024.1430.
13. Kireicheva L.V., Shevchenko V.A. The state of arable lands in the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation and the main directions of increasing soil fertility // *International Agricultural Journal*. 2020. No. 2, P. 12-16. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12021.
14. Mikhailushkin P.V., Alieva A.R. Organic farming – direction of transition to a “green” economy in Russia // *International Agricultural Journal*. 2020. No. 2. P. 17-19. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12022.
15. Germanova S.E., Petukhov N.V., Sambros N.B., Piven' E.A., Zinchenko A.V. Impact of anthropogenic factors on agricultural soils // *International Agricultural Journal*. 2023. No. 1. P. 39-42. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_1_39.
16. Ilyinsky A.V., Kolomytsev N.V., Matveev A.V., Evsenkin K.N., Korzhenevsky B.I. New ways to increase the productivity of degraded reclaimed lands using information technologies: monograph. Moscow: All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova. 2022. 152 p..

сельскохозяйственный журнал. 2023. № 1. С. 39-42. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_1_39.

16. Ильинский А.В. Новые способы повышения продуктивности деградированных мелиорированных земель с применением информационных технологий. Монография / А.В. Ильинский, Н.В. Коломийцев, А.В. Матвеев, К.Н. Евсенкин, Б.И. Корженевский. М.: ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», 2022. 152 с.

17. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды в Рязанской области в 2020 году / Комитет природных ресурсов по Рязанской области. Рязань, 2020. 148 с.

18. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды в Рязанской области в 2021 году / Комитет природных ресурсов по Рязанской области. Рязань, 2021. 163 с.

19. Уровень воды в Оке (г. Рязань) сегодня. [Электронный ресурс]. URL: <https://allrivers.info/gauge/oka-ryazan/waterlevel> (дата обращения: 10.07.2023).

20. Информация о сложившихся (к 20 февраля) и ожидаемых гидрометеорологических условиях на территории Рязанской области в преддверии весеннего половодья 2023 года. [Электронный ресурс]. URL: https://meteo62.ru/press-relizy/:polovode-2022_220309 (дата обращения: 04.06.2023).

21. Мажайский Ю.А. Нейтрализация загрязненных почв. Монография. Рязань: Мещерский филиал ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, 2008. 528 с.

22. Мажайский Ю.А. Особенности распределения тяжелых металлов в профилях почв Рязанской области // Агрохимия. 2003. № 8. С. 74-79.

23. Мажайский Ю.А., Гусева Т.М. Мониторинг тяжелых металлов в экосистеме малой реки Окского бассейна // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 54-59.

24. Сает Ю.А. Геохимия окружающей среды / Ю.А. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. М.: Недра, 1990. 335 с. ISBN 5-247-01127-9

17. Report on the state and environmental protection in Ryazan Oblast in 2020. Committee of Natural Resources of Ryazan Oblast. Ryazan. 2020. 148 p.

18. Report on the state and environmental protection in Ryazan Oblast in 2021. Committee of Natural Resources of Ryazan Oblast. Ryazan. 2021. 163 p.

19. Water level in the Oka (Ryazan) today. [Electronic resource]. URL: <https://allrivers.info/gauge/oka-ryazan/water-level> (Date of application 10/07/2023).

20. Information on the current (by February 20) and expected hydrometeorological conditions in the Ryazan region on the eve of the spring flood of 2023. [Electronic resource]. URL: https://meteo62.ru/press-relizy/:polovode-2022_220309 (Date of application 04/06/2023).

21. Mazhaisky Yu.A. Neutralization of contaminated soils: monograph. Ryazan: Meshchersky branch of GNU VNIIGiM of the Russian Agricultural Academy. 2008. 528 p.

22. Mazhaisky Yu.A. The distribution of heavy metals in the profile of soils of Ryazan oblast // Agrochemistry. 2002. No 8. P. 74-79.

23. Mazhaisky Yu.A. Guseva T.M. Monitoring of heavy metals in the ecosystem of a small river of the Oka basin // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No 2. P. 54-59.

24. Sayet Yu.A., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sargsyan S.Sh. Geochemistry of the environment. Moscow: Nedra. 1990. 335 p. ISBN 5-247-01127-9

Об авторах

Андрей Валерьевич Ильинский, канд. с.-х. наук, доцент, ведущий научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-6843-9170, PIIID AuthorID: 331409; ilinskiy-19@mail.ru

Константин Николаевич Евсенкин, канд. техн., ведущий научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-0194-8552, PIIID AuthorID: 858186; kn.evsenkin@yandex.ru

Артём Андреевич Павлов, канд. биол. наук, научный сотрудник; ORCID: 0000-0001-5932-1624, PIIID AuthorID: 1141178; kupoz@mail.ru

About the authors

Andrey V. Ilyinsky, CSc (Agro), associate professor, leading researcher; ORCID: 0000-0002-6843-9170, RSCI AuthorID: 331409; ilinskiy-19@mail.ru

Konstantin N. Evsenkin, CSc (Eng); ORCID: 0000-0002-0194-8552, RSCI AuthorID: 858186; kn.evsenkin@yandex.ru

Artem A. Pavlov, CSc (Bio), researcher; ORCID: 0000-0001-5932-1624, RSCI AuthorID: 1141178; kupoz@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Ильинский А.В., Евсенкин К.Н., Павлов А.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись.

Ильинский А.В., Евсенкин К.Н., Павлов А.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 that there are no conflicts of interests

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 11.04.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 21.12.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 21.12.2024

Ilyinsky A.V., Evsenkin K.N., Pavlov A.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote a manuscript.

Ilyinsky A.V., Evsenkin K.N., Pavlov A.A. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-48-55>

УДК 631.445.12:631.436



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОВОЗГОРАНИЯ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ

О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов , А.С. Гузалов, Н.Н. Пуляев, А.В. Куриленко

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

Аннотация. Целью исследований являлась разработка математической модели, позволяющая использовать ее в дальнейшем для разработки компьютерной программы составления прогнозов возникновения торфяных пожаров на землях, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот. Проведено математическое описание процесса самовозгорания, происходящего по следующей схеме: тепловой поток нагревает поверхность до температуры зажигания, в результате чего возникает самонагревающаяся зона. В итоге формируется волна горения (тления), которая способна самостоятельно распространяться. Представлены методика и лабораторное оборудование для исследования саморазогрева образцов торфа. Проанализированы результаты экспериментальных и теоретических исследований химической реакции саморазогрева образцов торфа. Энергия активации образцов торфа определялась методом подбора и подстановки значений в уравнения и сравнения полученных результатов с расчетными. Результаты исследований позволили оценить высокую корреляцию с экспериментальными данными в зависимости от содержания общего органического углерода в торфяной почве. Таким образом, математическую модель можно использовать для прогнозирования возникновения эффекта самовозгорания.

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

Ключевые слова: торфяная почва, объемная плотность, степень разложения, зольность, пожары, экология, выбросы углерода, углерод, сера, железо

Формат цитирования: Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Гузалов А.С., Пуляев Н.Н., Куриленко А.В. Математическое моделирование самовозгорания торфяной почвы // Природообустройство. 2025. № 1. С. 48-55. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-48-55>

Scientific article

MATHEMATICAL MODELING OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF PEAT SOIL

O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, A.S. Guzalov, N.N. Pulyaev, A.V. Kurilenko

Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

Abstract. The aim of the study is to develop a mathematical model that can be used in the future to develop a computer program for forecasting the occurrence of peat fires on lands involved in agricultural circulation. A mathematical description of the spontaneous combustion process is given, which occurs according to the following scheme: the heat flow heats the surface to the ignition temperature, resulting in a self-heating zone. As a result, a combustion (smoldering) wave is formed, which is capable of self-propagating. The methodology and laboratory equipment for studying the self-heating of peat samples are presented. The results of experimental and theoretical studies of the chemical reaction of self-heating of peat samples are analyzed. The activation energy of peat samples was determined by selecting and substituting values into equations and comparing the obtained results with the calculated ones. The results of the study made it possible to estimate a high correlation with experimental data depending on the content of total organic carbon in peat soil. Thus, the mathematical model can be used to predict the occurrence of the spontaneous combustion effect.

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-16-00081 (URL: <https://rscf.ru/project/24-16-00081/>)

Keywords: peat soil, bulk density, degree of decomposition, ash content, fires, ecology, carbon emissions, carbon, sulfur, iron

Format of citation: Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Guzalov A.S., Pulyaev N.N., Kurylenko A.V. Mathematical modeling of spontaneous combustion of peat soil // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. С. 48-55. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-48-55>

Введение. Сжигание биомассы является основным глобальным источником газопылевых выбросов в атмосферу и считается одним из основных экотоксикологических факторов риска для здоровья населения.

Дым торфяных пожаров по своему составу представляет собой аэрозольно-газовую смесь, в которую входят: CO , CO_2 , NO_2 , SO_2 ; водяные испарения; твердые частицы, 90% которых имеют размеры меньше 0,1 мкм и в состав которых входят сажки, золы, пепел и смолы; продукты трансформации компонентов горючего материала. В задымленном воздухе присутствуют также акролеин и ацетальдегид в концентрациях, превышающих ПДК, которые оказывают гипоксическое, гемотоксическое и нейротоксическое действие на человека [1-3].

По независимой оценке Центра охраны дикой природы, общий экономический ущерб от природных пожаров прогнозируется на уровне 10 трлн руб. (375 млрд долл.) [4].

В процессе торфяных пожаров в РФ, по результатам исследований геобиоцентра Мюнхенского университета (Германия), в приземные слои атмосферы планеты выбрасывается от 30 до 100 млн т двуокиси углерода [5].

При длительном воздействии крупных природных пожаров или множества мелких пожаров в атмосфере образуются постоянные области повышенного давления. Циклоны обходят эти районы стороной, создавая в районе пожара более сухую и жаркую погоду, чем обычно.

Возможность возгорания осушенных месторождений торфа представляет собой угрозу возникновения негативных экологических и климатических последствий для населения, экосистем и экономики в целом. При этом в результате природных пожаров в атмосферу поступают парниковые газы.

Торфяные пожары оказывают большое влияние на увеличение сезонной глубины промерзания почв (в связи с выгоранием почвы, уменьшением утепляющего воздействия происходит нарушение теплофизических параметров почвенных слоев), увеличивают поверхностный сток и повышают степень деградации почв за счет увеличения водной и ветровой эрозии на значительных площадях.

Цель исследований: разработка математической модели для составления прогнозов возникновения торфяных пожаров на землях, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот.

Материалы и методы исследований. В результате химической и энергетической неоднородности склонность к самовозгоранию одних и тех же материалов неодинакова и характеризуется различными значениями кинетических параметров. Такими свойствами обладает торф. Окислительные процессы экзотермичны, поэтому они ведут к самонагреванию окисляющегося материала. Как только температура самонагревающейся массы превысит температуру окружающей среды, начинается процесс охлаждения. Интенсивность теплоотвода определяется размером и формой скопления самонагревающегося материала, его теплофизическими свойствами, коэффициентом внешнего теплообмена, а также условиями внешней среды.

Тепловое самовозгорание происходит при следующих условиях:

- скорость самонагревания $\geq$ скорости охлаждения;
- темп самонагревания $\geq$ темпа охлаждения.

Процесс самовозгорания происходит по следующей схеме: тепловой поток нагревает поверхность до температуры зажигания T_z , в результате чего возникает самонагревающаяся зона. В итоге формируется волна горения (тления), которая способна самостоятельно распространяться.

При проведении экспериментальных исследований пожароопасности отобранных образцов торфа была применена методика экспериментального определения условий теплового самовозгорания, согласно которой в контейнере цилиндрической формы размером 30 × 30 мм, изготовленном из латунной сетки с ячейкой 0,8 мм, загружается испытуемый материал, внутри контейнера размещаются термодатчики, фиксирующие температуру поверхности и центра образца, где возникает очаг тления или горения испытуемого материала.

Для проведения экспериментальных исследований пожароопасности торфяных почв сельскохозяйственных угодий были отобраны

образцы в Московской, Рязанской и Тверской областях, определен их физико-химический состав (табл. 1).

Экспериментальные исследования проводились с использованием лабораторного оборудования:

- сушильный шкаф СНОЛ-3.5;
- термодатчики ДТКП-0.5-4;
- измеритель-регистратор 8 каналов ОВЕН;

- программное обеспечение ОВЕН;
- весы АСЗЕТ СУ-513, точность 0,001 гр.;
- контейнер из латунной сетки 30 × 30 мм с ячейкой 0,8 мм.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1 [6-8].

Отобранные образцы торфа, представленные в таблице 1, загружались в контейнеры (рис. 1), внутри которых были размещены

Таблица 1. Химический состав образцов торфа

Table 1. Chemical composition of peat samples

№	Гигроскопическая влажность, % <i>Hygroscopic humidity, %</i>	Сера подвижная, млн-1 <i>Mobile sulfur, ppm</i>	Массовая доля железа, млн-1 (валовая форма) <i>Mass fraction of iron, ppm (gross form)</i>	Массовая доля зольности, % <i>Mass fraction of ash content, %</i>	Общий (органический) углерод <i>Total (organic) carbon</i>	Метод степени разложения <i>Degree of decomposition method</i>
	ГОСТ 5180 <i>GOST 5180</i>	ГОСТ 26490 <i>GOST 26490</i>	М МВИ-80-2008 <i>M MVI-80-2008</i>	ГОСТ 27784-88 <i>GOST 27784-88</i>	Метод сухого сжигания <i>Dry incineration method</i>	ГОСТ 10650 <i>GOST 10650</i>
Тверская область / Tverskaya region						
T1	13,88	19,5	3287,5	77,53	22,47	35,2
T2	20,14	6,6	2381,25	33,99	66,0	4,8
T3	25,2	23,4	3781	36,3	63,7	6,1
Рязанская область / Ryazanskaya region						
P1	3,6	9,3	91	89,6	10,4	52,5
P2	10,4	25,2	742	75,3	24,7	30,6
P3	50,7	22,2	93	45,0	55,0	27,8
Московская область / Moskovskaya region						
M1	14,26	16,4	934,3	72,4	19,8	38,6
M2	15,2	29,4	836	69,8	23,2	35,1
M3	45,8	28,5	40	35,8	60,1	5,5

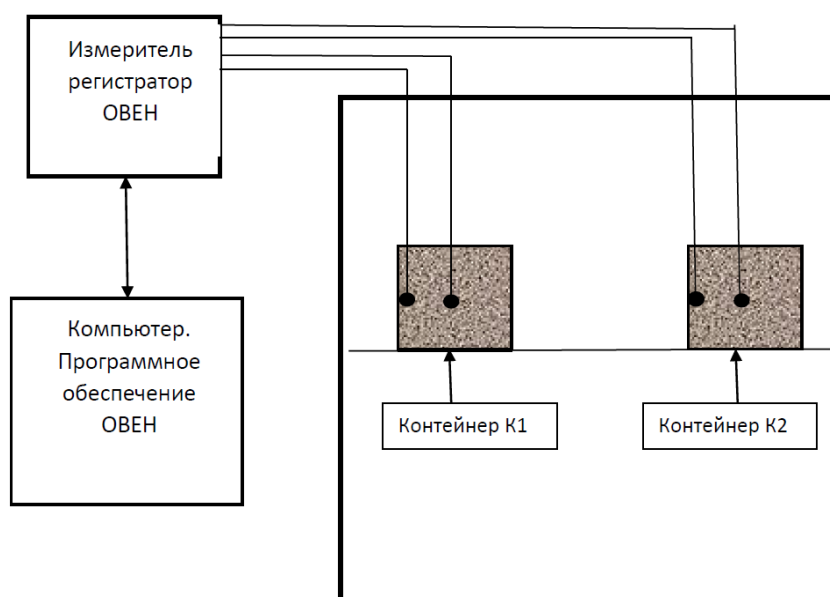


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental facility

термопары, которые фиксировали температуру теплофизического центра и поверхности, размещенного в них торфа с интервалом 1 с, очаг самовозгорания возникал в центре испытуемого материала (рис. 2) [6-8].

В процессе эксперимента в сушильном шкафу с 8.00 до 18.00 поддерживалась температура 58°C, в вечернее и ночное время она составляла 20°C, что соответствует природным условиям [6-8].

При самовозгорании процесс горения возникает при определенном соотношении интенсивности теплоотвода и тепловыделения. Тление протекает в диффузионном режиме горения. В случае притока в зону тления окислителя скорость тления возрастает, и оно может переходить в стадию пламенного горения. Волна тления в обезвоженном материале распространяется так же, как волна горения.

Ориентировочную оценку опасности теплового самовоспламенения дает стандартная температура самовоспламенения. В отличие от самовоспламенения самовозгорание может происходить при комнатных температурах.

При саморазогреве тела теплота передается в окружающую среду через поверхность площадью F , м². Через эту поверхность в единицу времени отводится количество теплоты Q' , которое экспериментально было

получено И. Ньютоном [9] и записывается в виде уравнения:

$$Q' = \alpha \cdot F \cdot \Delta T_F, \quad (1)$$

где α – коэффициент пропорциональности или коэффициент теплоотдачи Вт м⁻² К⁻¹; ΔO_F – разность температур поверхности тела и окружающей среды.

Данное уравнение, описывающее теплоотвод, является линейным.

При отводе тепла от тела в окружающую среду оно будет охлаждаться. Данный процесс при линейном законе охлаждения описывается уравнением скорости охлаждения:

$$P' = \frac{\Delta T_F}{\Delta \tau}, \quad (2)$$

где P' – скорость охлаждения К с⁻¹; $\Delta \tau$ – отрезок времени.

Фактическая скорость охлаждения P' в любой момент времени может определяться через производную:

$$P' = \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \frac{\partial T'}{\partial \tau}. \quad (3)$$

По Я.С. Киселёву [9] скорость охлаждения можно записать в виде:

$$P' = \frac{\alpha \cdot F}{c_p \cdot \rho \cdot V}, \quad (4)$$

где c_p – удельная теплоемкость, Дж/(Кг · К); ρ – плотность материала, кг/м³; V – объем, м³.

Линейный темп охлаждения – величина постоянная и выражается уравнением:

$$m_{ox} = \frac{\alpha \cdot F}{c_p \cdot \rho \cdot V}, \quad 1/c. \quad (5)$$

Следует отметить, что уравнение (2) справедливо при охлаждении тела без внутренних источников теплоты или саморазогрева. Наличие таких источников учитывается критерием неравномерности нагрева.

Критерий неравномерности нагрева –

$$\psi = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_{Ц}}, \quad (6)$$

где $\Delta T_{Ц}$ – разность между температурами теплофизического центра нагреваемого материала и окружающей среды $T_{Ц} - T_{окр}$,

$$\text{или} \quad \psi = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_{Ц}} = \frac{n \cdot \lambda}{\alpha \cdot R_x + n \cdot \lambda}, \quad (7)$$

где ΔO_F – температура поверхности, К; $\Delta T_{Ц}$ – температура теплофизического центра, К; n – относительный температурный градиент, который зависит от кривизны теплообменной поверхности, $n = 2$ [10, 11]; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК); R_x – определяющий размер скопления материала, радиус или половина высоты слоя, м.

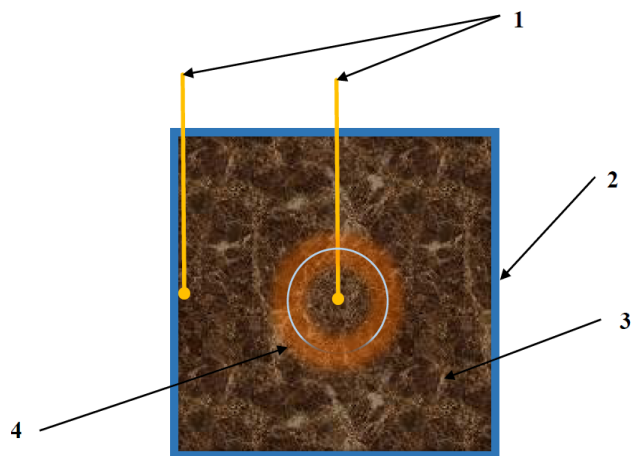


Рис. 2. Схема размещения термопар в контейнере:

- 1 – термопары; 2 – контейнер из латунной сетки размером 30 × 30 мм с размером ячейки 0,8 мм; 3 – образцы торфа; 4 – место возникновения очага самовозгорания в режиме тления

Fig. 2. Layout of thermocouples in a container, where

- 1 – thermocouples, 2 – a container made of brass mesh 30 × 30 mm with a mesh size of 0.8 mm, 3 – peat samples, 4 – the place of occurrence of the source of spontaneous combustion in the smoldering mode

В естественных условиях точки тела охлаждаются с неодинаковыми скоростями. Неравномерность процесса учитывают также с помощью критерия неравномерности нагрева, тогда скорость охлаждения и темп охлаждения выглядят следующим образом:

$$P' = \frac{\psi \cdot \alpha \cdot F}{c_p \cdot \rho \cdot V} \cdot \Delta T; \quad (8)$$

$$m_{ox} = \frac{\alpha \cdot F}{c_p \cdot \rho \cdot V} \cdot \psi. \quad (9)$$

Температуру поверхности торфа на конкретный момент времени можно определить по зависимости:

$$\Delta T_{\Pi} = (T_{окр} - T_{\Pi}) \cdot \exp(-m_{ox} \cdot \tau) K, \quad (10)$$

где $T_{окр}$ – температура окружающей среды, принимаемая на конкретный момент времени, К; T_{Π} – температура поверхности образца торфа, задаваемая на начало расчета, К; τ – интервал времени, с.

Окислительные процессы экзотермичны, поэтому происходит саморазогрев вещества, в данном случае – образцов торфа. Залежи торфа представляют собой неподвижную массу, в которой создаются затрудненные условия для теплоотвода от центра скопления реагирующего вещества, и поэтому при достаточном количестве окислителя очаг тления возникает в нем, что подтверждается проведенными нами экспериментальными исследованиями.

Условием самовозгорания является равенство скорости тепловыделения и теплоотвода. Скорость охлаждения центра торфяного скопления пропорциональна разности температур теплофизического центра и окружающей среды:

$$P = \Pi_o \cdot T_{\Pi}, \quad (11)$$

где P – скорость охлаждения, К/с; T_{Π} – разность температур теплофизического центра нагреваемого образца торфа и окружающей среды $T_{\Pi} - T_{окр}$, К; Π_o – темп охлаждения, с⁻¹.

Для слоя торфа или образца торфяной почвы, находящейся в контейнере, темп охлаждения можно записать как

$$\Pi_o = \frac{\psi \cdot \alpha \cdot F}{C_p \cdot \rho \cdot V}, \quad (12)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К); F – поверхность торфяной почвы или контейнера, м²; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг К); ρ – объемная плотность торфа, кг/м³; V – объем торфяного образца или слоя, м³.

Математическую зависимость (2) можно записать в виде:

$$P = \frac{\psi \cdot \alpha \cdot F}{C_p \cdot \rho \cdot V} \cdot (T_{\Pi} - T_{окр}). \quad (13)$$

Возникновение процесса самовозгорания зависит от E – энергии активации торфа, изменяющейся в пределах 70-170 кДж/моль, которая определяется по зависимости:

$$E = R \cdot T_c \cdot (\ln C - \ln P_c), \text{ Дж/моль}, \quad (14)$$

где T_c – температура компенсации процесса самовозгорания, К; P_c – адиабатическая скорость самонагрева при температуре T_c , К/с; C – предэкспоненциальный множитель, К/с; R – универсальная постоянная, $R = k_B \cdot N_A$.

Предэкспоненциальный множитель определяется по зависимости:

$$C = \theta \cdot 2 \cdot 10^{11}, \text{ К/с}, \quad (15)$$

где θ – активная доля поверхности, в среднем для торфа $9,8 \cdot 10^{-7}$.

Скорость самонагрева описывается выражением:

$$P_c = C \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right), \text{ К/с}. \quad (16)$$

Период самонагрева торфа τ_i представлен зависимостью:

$$\tau_i = \frac{R \cdot T_{\Pi}^2}{E \cdot C} \cdot \exp\left(\frac{E}{R \cdot T_{\Pi}}\right), \text{ с}, \quad (17)$$

где T_{Π} – начальная температура, К.

Энергию активации вещества можно определить по зависимости:

$$E = E_0 + C \cdot \ln \theta, \quad (18)$$

где E_0 – минимальная энергия активации.

Минимальную энергию активации определяется по зависимости:

$$E_0 = 2200 - R \cdot T_x \cdot \ln \theta, \quad (19)$$

где T_x – температурный параметр распределения, для торфа ориентировочно принимаемый как $2,7 \cdot 10^3$.

Температуру центра контейнера с помещенным образцом торфа можно определить по зависимости:

$$\Delta T_{\Pi} = (T_{окр} - T_{\Pi}) \cdot \exp(-m_{ox} \cdot \tau_i). \quad (20)$$

Результаты и их обсуждение. Из проведенных экспериментальных исследований следует, что критические условия для самовозгорания создаются при равенстве температур поверхности и теплофизического центра торфяного образца.

Энергия активации образцов торфа E определялась методом подбора, путем подстановки значений в уравнения и сравнения полученных результатов с расчетными (табл. 2-3), откуда следует, что она коррелируется с экспериментальными данными в зависимости от содержания общего органического углерода в торфяной

Таблица 2. Результаты моделирования процесса самовозгорания образцов торфа и сравнения их с экспериментальными данным при плотности 0,3 г/см³

Table 2. Results of modeling the process of spontaneous combustion of peat samples and comparing them with experimental data at a density of 0.3 g/cm³

№	Маркировка образцов торфа <i>Marking of peat samples</i>	Содержание общего органического углерода, % <i>Content of total organic carbon, %</i>	Расчетное время по математической модели до самовозгорания, сут. <i>Estimated time according to the mathematical model before spontaneous combustion, days</i>	Экспериментальное время до самовозгорания, сут. <i>Experimental time to spontaneous combustion, days</i>	Энергия активации Е кДж/моль <i>Activation energy E kJ / mol</i>
Тверская область / Tverskaya region					
1	T1	22,47	23	24	117,8
2	T2	66,0	18	17	52,1
3	T3	63,7	18	18	54,3
Рязанская область / Ryazanskaya region					
3	P1	10,4	29	30	150,6
4	P2	24,7	21	23	124,7
5	P3	55,0	22	21	57,4
Московская область / Moskovskaya region					
6	M1	19,8	27	26	123
7	M2	23,2	23	23	120,7
8	M3	60,1	20	19	57,2

Таблица 3. Результаты моделирования процесса самовозгорания образцов торфа и сравнения их с экспериментальными данным при плотности 0,5 г/см³

Table 3. Results of modeling the process of spontaneous combustion of peat samples and comparing them with experimental data at a density of 0.5 g/cm³

№	Маркировка образцов торфа <i>Marking of peat samples</i>	Содержание общего органического углерода, % <i>Content of total organic carbon, %</i>	Расчетное время по математической модели до самовозгорания, сут. <i>Estimated time according to the mathematical model before spontaneous combustion, days</i>	Экспериментальное время до самовозгорания, сут. <i>Experimental time to spontaneous combustion, days</i>	Энергия активации Е кДж/моль <i>Activation energy E kJ / mol</i>
Тверская область / Tverskaya region					
1	T1	22,47	35	36	117,8
2	T2	66,0	26	25	52,1
3	T3	63,7	26	27	54,3
Рязанская область / Ryazanskaya region					
3	P1	10,4	45	45	150,6
4	P2	24,7	34	35	124,7
5	P3	55,0	32	32	57,4
Московская область / Moskovskaya region					
6	M1	19,8	41	40	123
7	M2	23,2	33	34	120,7
8	M3	60,1	27	28	57,2

почве. Из анализа результатов, представленных в таблицах 2-3, следует заключение о том, что математическую модель можно использовать для прогнозирования возникновения эффекта самовозгорания.

Выводы

1. Время до самовозгорания торфа зависит от его плотности, с повышением которой интервал увеличивается, что связано с повышением количества реагирующего вещества в единице объема и уменьшением в нем окислителя.

2. Предложенная математическая модель позволяет использовать ее в дальнейшем для разработки компьютерной программы составления

прогнозов возникновения торфяных пожаров на землях, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот.

3. Возникновение самовозгорания торфяной почвы возможно в период вегетации сельскохозяйственных растений, когда верхний слой торфа обезвожен, поскольку большая часть энергии нагрева расходуется на испарение влаги, и по этой причине возникновение торфяного пожара становится возможным.

4. Высокое содержание органического углерода в торфяной почве повышает возможность возникновения на ней пожара ввиду эффекта самовозгорания, поскольку в данном случае торф обладает низкой энергией активации Е.

Список использованных источников

1. Андропова А.В. Дисперсный состав и содержание химических элементов в аэрозолях приземного слоя атмосферы г. Москвы / А.В. Андропова, М.С. Артамонова, М.А. Иорданский, А.С. Гинзбург, И.Г. Гранберг и др. // Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 9. С. 47-51.
2. Исаева Л.К. Оценка здоровья пожарных в связи с действием на органы дыхания токсичных продуктов горения / Л.К. Исаева, В.А. Сулименко, С.В. Сулименко, С.В. Соловьёв // Вестник Академии государственной противопожарной службы. 2005. № 3. С. 73-81.
3. Исаева Л.К. Исследование свойств торфа при разработке профилактических мер и способов тушения торфяных пожаров / Л.К. Исаева, А.Г. Власов, С.В. Соловьёв // Вестник Академии ГПС МЧС России. 2004. № 2. С. 52-60.
4. Исаева Л.К. Экологические последствия лесных и торфяных пожаров в Московской области в 2002-2009 годах / Л.К. Исаева, С.В. Соловьёв, В.А. Сулименко, С.А. Шилин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2010. № 3. С. 85-91.
5. Dietze E., Theuerkauf M., Bloom K., Brauer A., Dörfler W., Feeser I., Feurdean A., Gedminienė L., Giessecke T., Jahns S., Karpinska-Kolaczek M., Kolaczek P., Lamentowicz M., Latalowa M., Marcisz K., Obremska M., Pedziszewski A., Poska A., Rehfeld K., Stancikait M., Stirrins N., Swieta-Musznicka J., Szal M., Vassiljev J., Veski S., Wacnik A., Weisbrodt D., Wiethold J., Vanniere B., Slowinski M. Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe // Quat. Sci. Rev. 2018. № 201. Pp. 44e56. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.005>
6. Дидманидзе О.Н. Результаты исследований температурного режима осушаемой торфяной почвы / О.Н. Дидманидзе, Е.П. Парлюк, А.В. Евграфов // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 45-49. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-45-49. EDN: VDZKKJ.
7. Дидманидзе О.Н. Результаты исследований пожароопасности торфа в зависимости от степени его разложения на землях сельскохозяйственного назначения / О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, Н.Н. Пуляев, А.С. Гузалов // Природообустройство. 2024. № 4. С. 26-33. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-4-26-33. EDN: VPAVME.

References

1. Andronova A.V. Dispersed composition and content of chemical elements in aerosols of the surface layer of the atmosphere of Moscow / Andronova A.V., Artamonova M.S., Jordansky M.A., Ginzburg A.S., Granberg I.G. and others // Safety of life. 2010. No. 9. P. 47-51.
2. Isaeva L.K. Assessment of the health of firefighters in connection with the effect of toxic gorenje products on the respiratory system / Isaeva L.K., Sulimenko V.A., Sulimenko S.V., Soloviev S.V. // Bulletin of the Academy of State Fire Service. 2005. No. 3. P. 73-81.
3. Isaeva L.K., Vlasov A.G., Solovyov S.V. Investigation of peat properties in the development of preventive measures and methods of extinguishing peat fires // Bulletin of the Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2004. No. 2. P. 52-60.
4. Isaeva L.K. Ecological consequences of forest and peat fires in the Moscow region in 2002-2009 / Solovyov S.V., Sulimenko V.A., Shilin S.A. // Fires and emergencies: prevention, elimination. 2010. No. 3. P. 85-91.
5. Dietze E., Theuerkauf M., Bloom K., Brauer A., Dörfler W., Feeser I., Feurdean A., Gedminienė L., Giessecke T., Jahns S., Karpinska-Kolaczek M., Kolaczek P., Lamentowicz M., Latalowa M., Marcisz K., Obremska M., Pedziszewski A., Poska A., Rehfeld K., Stancikait M., Stirrins N., Swieta-Musznicka J., Szal M., Vassiljev J., Veski S., Wacnik A., Weisbrodt D., Wiethold J., Vanniere B., Slowinski M., 2018. Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe. Quat. Sci. Rev. 201, 44e56. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.005>
6. Didmanidze O.N., Parlyuk E.P., Evgrafov A.V. Results of studies of the temperature regime of drained peat soil // Agroengineering. 2023. Vol. 25, No. 1. P. 45-49. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-45-49. EDN: VDZKKJ.
7. Didmanidze O.N., Yevgrafov A.V., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Results of studies of peat fire hazard depending on the degree of its decomposition on agricultural lands // Prirodoobustrojstvo. 2024. No. 4. P. 26-33. DOI 10.26897/1997-6011-2024-4-26-33. EDN VPAVME.
8. Didmanidze O.N. Influence of peat soil density on the occurrence of landscape fires / O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov // Prirodoobustrojstvo. 2022. No. 4. P. 37-41. DOI 10.26897/1997-6011-2022-4-37-41. EDN AQHMQU.

8. Дидманидзе О.Н. Влияние плотности торфяных почв на возникновение ландшафтных пожаров / О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов // Природообустройство. 2022. № 4. С. 37-41. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-37-41. EDN: AQHMQU.

9. Киселев Я.С. Физические модели горения в системе пожарной безопасности. Монография / Я.С. Киселев, О.А. Хорошилов, Ф.В. Демехин / МЧС России; Санкт-Петербургский государственный университет противопожарной службы. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 347 с.

10. Борисов А.А. Кинетические характеристики низкотемпературного горения торфа / А.А. Борисов, Я.С. Киселёв, Удильов В.П. // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: ИТФСО АН СССР, 1984. С. 23-30.

11. Гедрайтите В.А. Торф и его свойства // Материалы Молодежной научной конференции «Проблемы естествознания»: Труды Томского государственного университета. Томск, 2010. Вып. 2. Т. 273. С. 33-35.

9. Kiselev Ya.S., Khoroshilov O.A., Demekhin F.V. Physical models of gorenje in the fire safety system: a monograph / EMERCOM of Russia; Saint Petersburg State University of Fire Service. SPb.: Publishing House of the Polytechnic University, 2009. 347 p.

10. Borisov A.A. Kinetic characteristics of low-temperature peat combustion / A.A. Borisov Ya.S. Kiselev, Udilov V.P. // Thermophysics of forest fires. Gorenje. Novosibirsk: ITF SOAN USSR, 1984. pp. 23-30.

11. Gedraitite V.A. Peat and its properties // Materials of the International Scientific Conference "Problems of Natural Science". Issue 2. Tomsk: 2010. P. 33-35.

Об авторах

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

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

Николай Николаевич Пуляев, канд.техн.наук., доцент; ORSID: 0000-0001-8984-4426; AuthorID: 416620; pulyaev@rgau-msha.ru

Артёмбек Сергеевич Гузалов, канд.техн.наук.; ORSID: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988; ORSID: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988

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

About the authors

Otari N. Didmanidze, RAS academician, DSc (Eng), professor; ORSID: 0000-0003-2558-0585; AuthorID: 311972; didmanidze@rgau-msha.ru

Alexander V. Evgrafov, DSc (Eng), associate professor; ORSID: 0000-0002-2313-2191, AuthorID: 828739; labpoliv@list.ru

Nikolai N. Pulyaev, CSc (Eng), associate professor; ORSID: 0000-0001-8984-4426; AuthorID: 416620; pulyaev@rgau-msha.ru

Artembek S. Guzalov, CSc (Eng); ORSID: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988; ORSID: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988

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

Критерии авторства / Authorship criteria

Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Гузалов А.С. Пуляев Н.Н., Куриленко А.В. выполнили экспериментальные 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 interests

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 02.12.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 10.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 10.01.2025

Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Guzalov A.S., Pulyaev N.N. carried out experimental and 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.

аОригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-56-62>

УДК 631.6(075.32):519.87



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРКА МЕЛИОРАТИВНЫХ МАШИН

С.В. Чумакова^{1✉}, Д.Г. Горюнов¹, М.Г. Загоруйко²¹ Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; 410012, г. Саратов, проспект им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3, Россия² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5, Россия

Аннотация. Целью исследований явилось сокращение энергозатрат на проведение работ в мелиоративном производстве за счет разработки математической модели и методики, позволяющих осуществлять оптимальное формирование парка машин. Выбраны наиболее эффективные (оптимальные) единицы техники на основе оригинальной методики, разработанной при помощи математического моделирования с использованием элементов теории множеств, математического анализа и алгебры. Применение теории множеств позволило осуществить переход от реальных компонентов парка машин к математическим субъектам для осуществления моделирования и обратно. Элементы математического анализа позволили установить функциональную зависимость между элементами модели и графически представить алгоритм последовательного отбора единиц техники, отвечающих определенным требованиям. При помощи инструментов алгебры были структурированы компоненты модели, вошедшие в разработанную методику. Предложена формула расчета коэффициентов оптимальности, по которым определяются индексы эффективности машин, что позволяет осуществить выбор наиболее эффективной техники при формировании парков машин для мелиоративного производства. Благодаря построенной универсальной математической модели была разработана оригинальная методика, целью которой является повышение производительности и снижение энергозатрат в мелиоративном производстве за счет оптимизации формирования парка машин. Новизна работы заключается в подходе к построению математической модели, использующей элементы теории множеств, обеспечивающей многогранность применения разработанной на ее основе методики выбора оптимального варианта. Проведенные исследования были апробированы на реальных данных, что позволяет говорить и о практической направленности представленной работы. Была разработана математическая модель и с ее использованием предложена оригинальная методика, позволяющая осуществить оптимальное формирование парка машин для мелиоративного производства с условием повышения производительности и минимизации энергозатрат на производство работ. На основании выкладок математической модели и апробирования методики в применении к практическим задачам разработанный метод оптимизации формирования парка машин для мелиоративного производства может быть предложен при использовании в решении задач современных реалий.

Ключевые слова: парк мелиоративных машин, математическая модель, методика, сокращение энергозатрат, коэффициент оптимальности, показатель эффективности

Формат цитирования: Чумакова С.В., Горюнов Д.Г., Загоруйко М.Г. Математическая модель оптимизации формирования парка машин // Природообустройство. 2025. No. 1. С. 56-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-56-62>

Scientific article

MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZING THE FORMATION OF A FLEET OF RECLAMATION MACHINES

S.V. Chumakova^{1✉}, D.G. Goryunov¹, M.G. Zagoruiko²¹ Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov; 410012, Saratov, Pyoter Stolypin Avenue, building 4, constr.3. Russia² Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 109428, Moscow, 1st Institutsky proezd, 5, Russia

Abstract. (*Purpose of the research*) Reduction of energy consumption for works in land reclamation production through the development of mathematical model and methodology, which allow carrying out optimal formation of machinery park. (*Materials and methods*) The most effective (optimal) units

of machinery were selected on the basis of the original methodology developed by means of mathematical modeling using elements of set theory, mathematical analysis and algebra. The application of set theory made it possible to make the transition from real components of the fleet to mathematical subjects for modeling and back. Elements of mathematical analysis made it possible to establish functional dependence between the model elements and graphically represent the algorithm of sequential selection of units of machinery meeting certain requirements. With the help of algebra tools, the model components included in the developed methodology were structured. The formula for calculating the optimality coefficients, which are used to determine the indexes of machinery efficiency, is proposed, which allows selecting the most efficient machinery when forming machine parks for land reclamation production. (*Results and discussion*) Thanks to the constructed universal mathematical model, an original method was developed, the purpose of which is to increase productivity and reduce energy consumption in land reclamation production by optimizing the formation of a fleet of machines. The novelty of this work consists in the approach to the construction of a mathematical model using elements of set theory, providing versatility of application of the methodology of optimal variant selection developed on its basis. The conducted research has been tested on real data, which allows us to talk about the practical orientation of the presented work. (*Conclusions*) The mathematical model has been developed and with its use, the original methodology, allowing carrying out optimum formation of a park of machines for ameliorative manufacture with condition of increase of productivity and minimization of power consumption for manufacture of works, has been offered. On the basis of mathematical model calculations and approbation of the methodology in application to practical problems, the developed method of optimization of machine park formation for land reclamation production can be proposed for use in problems of modern realities.

Keywords: fleet of reclamation machines, mathematical model, methodology, reduction of energy consumption, optimality coefficient, efficiency index

Format of citation: Chumakova S.V., Goryunov D.G., Zagoruiko M.G. Mathematical model for optimizing the formation of a fleet of reclamation machines // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 1. P. 56-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-56-62>

Введение. Оптимизация формирования парка машин – одна из главных задач мелиоративного производства. Актуальность формирования оптимальных парков машин для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем обусловлена рядом факторов. Во-первых, эффективное использование водных и земельных ресурсов является одной из ключевых задач современного сельского хозяйства. Во-вторых, формирование оптимальных парков машин позволяет сократить затраты на эксплуатацию и обслуживание систем, а также снизить негативное воздействие на окружающую среду. В-третьих, улучшение технического состояния оросительных систем и повышение их надежности способствуют повышению урожайности сельскохозяйственных культур и качества продукции [1].

Цель исследований: сокращение энергозатрат в мелиоративном производстве за счет оптимизации формирования парка машин, что в свою очередь достигается путем использования разработанной авторами оригинальной методики, основанной на представленной математической модели.

В нашем случае имеются в виду суммарные годовые энергозатраты на производство работ $\mathcal{E}_{\text{раб}}$, кВт·год/ед. изм. (размерность зависит от вида выполняемых работ: например,

для кусторезов – кВт·год/м²; для землеройной техники – кВт·год/м³), которые определяются по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{раб}} = \frac{N_{\text{дв}}}{\Pi_m} \cdot \Phi, \quad (1)$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность двигателя машины, кВт; Π_m – техническая производительность машины, ед. изм/ч; Φ – годовой фонд рабочего времени машины, ч.

Материалы и методы исследований.

Для решения поставленной задачи построим модель оптимального выбора машин на примере техники для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем. Целесообразно данные действия осуществлять, используя математическую модель, разработанную с учетом специфики работ и позволяющую сделать оптимальный выбор единиц техники. В качестве основных разделов математики для этого случая были выбраны математический анализ, элементы теории множеств и элементы алгебры [2, 3].

В начале построения математической модели данного процесса были задействованы элементы теории множеств, так как именно этот научный раздел позволил перейти от объектов реальности к математическим абстракциям и разрешил в этом случае наиболее точно описать ситуационную задачу и метод

отбора. Каждой единице техники были поставлены в соответствие элементы множества M , обозначенные как m_i [4, 5].

Пусть при первоначальном отборе i будет изменяться от 1 до n , то есть

$$M = \{m_i\}_{i=1}^n = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n\}. \quad (2)$$

Обозначениями M и m_i будем также оперировать при наглядной демонстрации алгоритма отбора элементов, отвечающих требованиям ситуационной задачи (рис. 1, 3).

Выбор машины m_i зависит от ее исследуемых характеристик. Тогда

было введено множество характеристик для машин:

$$\chi = \{\chi_j\}_{j=1}^s = \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_j, \dots, \chi_s\}. \quad (3)$$

Авторами статьи был предложен следующий алгоритм выбора машины для общего случая:

- определение характеристики или результата, являющихся целевой функцией χ_j^z ;
- определение набора характеристик χ_j , влияющих на конечный выбор машины по результату целевых функций
- целевая функция находится по определенному правилу, учитывающему специфику характеристик χ_j .

При этом целевая функция для каждой машины m_i рассчитывается с учетом данных таблицы 1 по формуле (4) [6]:

$$\chi_j^z = f(\chi_j)_{j=1}^s. \quad (4)$$

Далее, на основании данных, отраженных в множествах (2), (3) и полученных по формуле (4), можно сделать вывод об оптимальности выбора той или иной машины. Для этого был введен коэффициент оптимальности k^* , который в свою очередь определяется по формуле (5) [7]:

$$k^* = \min \{k_i^*\}_{i=1}^n, \quad (5)$$

где k_i^* – коэффициент оптимальности, %, для каждой из исследуемых единиц техники, который находится по формуле (6):

$$k_i^* = \frac{\chi_j^z}{\chi_j} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Формула (6) позволила перейти к множеству K_i^* , отраженному в формуле (7):

$$K_i^* = \{k_1^*, k_2^*, \dots, k_i^*, \dots, k_n^*\}. \quad (7)$$

Выбирая минимальное значение коэффициента оптимальности k^* по предложенной методике, можно определить наиболее подходящую по функциональности машину m_i из множества (2).

В процессе построения модели авторы конкретизировали задачу, сузив выбор до единиц техники, осуществляющих очистку каналов. В рассматриваемом случае в качестве характеристик были выбраны:

- $N_{\text{дв}}$ – мощность двигателя машины, кВт;
- $\Pi_{\text{э}}$ – эксплуатационная производительность машины, $\text{м}^3/\text{ч}$;
- V – объем работ, м^3 ;
- Φ – фонд рабочего времени машины, маш.-ч;
- $\mathcal{E}_{\text{раб}}$ – энергозатраты на производство работ, $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$.

Таким образом, получено подмножество χ_{α} множества χ , причем

$$\chi_{\alpha} \subset \chi, \alpha = \overline{1;4} \quad (8)$$

- при $\alpha = 1, \chi_1 \leftrightarrow N_{\text{дв}}$;
- при $\alpha = 2, \chi_2 \leftrightarrow \Pi_{\text{э}}$;
- при $\alpha = 3, \chi_3 \leftrightarrow V$;
- при $\alpha = 4, \chi_4 \leftrightarrow \Phi$.

После введенных выше обозначений покажем элементы множества χ_{α} :

$$\chi_{\alpha} = \{\chi_{\alpha}\}_{\alpha=1}^4 = \{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4\} = \{N_{\text{дв}}, \Pi_{\text{э}}, V, \Phi\}. \quad (9)$$

Графически это также можно изобразить при помощи кругов Эйлера (рис. 1).

На рисунке 2 продемонстрирован алгоритм отбора единиц техники по указанным выше характеристикам.

На рисунке 2 также демонстрируется принцип изображения соответствующих элементов в определенной системе координат. Так, в системе координат $MO_1N_{\text{дв}}$ на оси O_1M расположены значения m_i , а по оси $O_1N_{\text{дв}}$ – значения мощности $N_{\text{дв}}$, соответствующие указанным видам машин. Таким образом, были получены в системе координат $MO_1N_{\text{дв}}$ точки $N_j(m_i, N_{\text{дв}})$. На рисунке 2 показаны системы координат $MO_2\Pi_{\text{э}}$, MO_3V и $MO_5\mathcal{E}_{\text{раб}}$. В них были отмечены

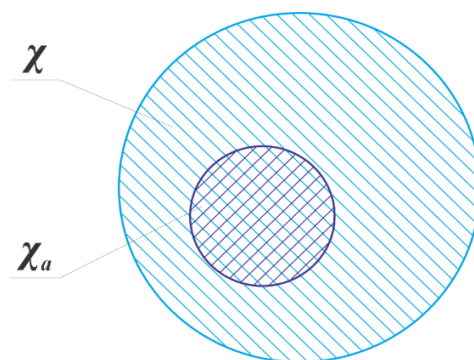


Рис. 1. Изображение при помощи кругов Эйлера вхождения подмножества χ_{α} в множество χ

Fig. 1. Using Euler circles, depicting the occurrence of a subset χ_{α} in a set χ

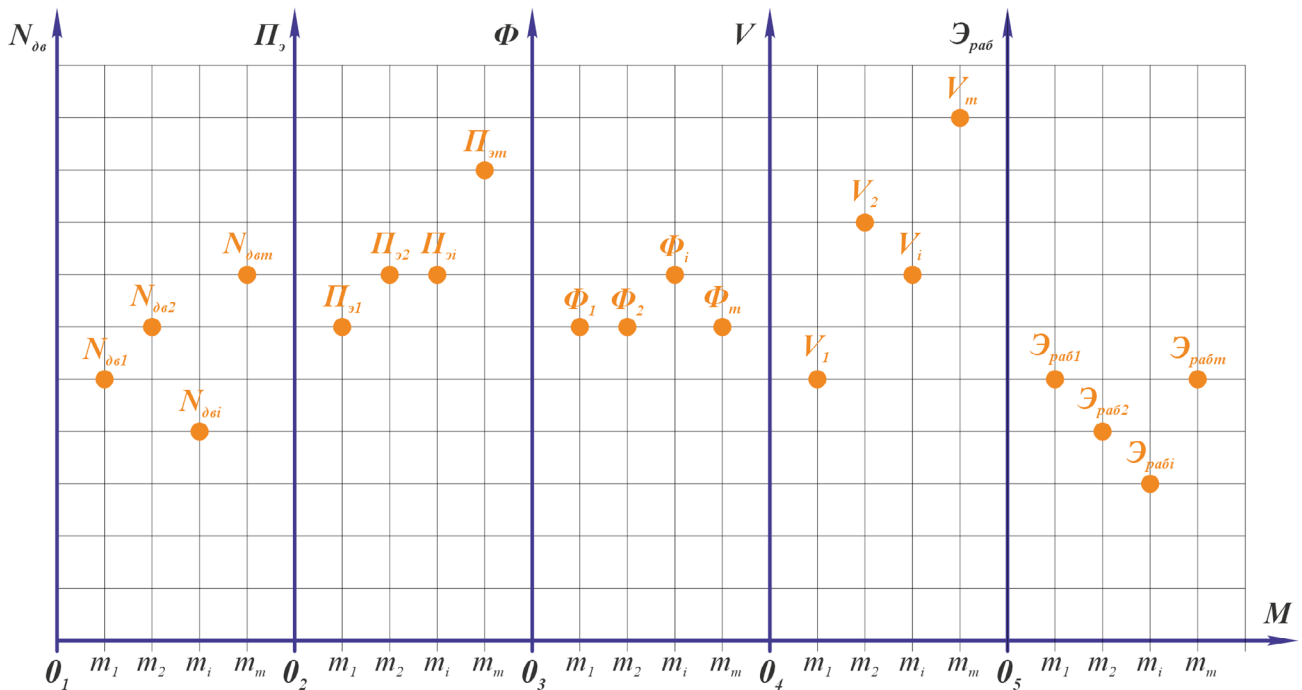


Рис. 2. Демонстрация наглядного изображения алгоритма отбора элементов m_i , расположенных на оси O_iM , с учетом критериев $N_{дв}$, $\Pi_{э}$, Φ , V , $\mathcal{E}_{раб}$

Fig. 2. Demonstration of a visual representation of the element selection algorithm m_i located on axis O_iM taking into account the criteria $N_{дв}$, $\Pi_{э}$, Φ , V , $\mathcal{E}_{раб}$

точки $\Pi_{эj}(m_i, \Pi_{эj})$, $\Phi_j(m_i, \Phi_j)$, $V_j(m_i, V_j)$ и $\mathcal{E}_{рабj}(m_i, V_j)$ соответственно.

В системе координат $MO_1N_{дв}$ получили множество точек:

$$N_{дв} = \{N_{двi}\}_{i=1}^n = \{N_{дв1}, N_{дв2}, \dots, N_{двi}, \dots, N_{двn}\}. \quad (10)$$

Также в системе координат $MO_2\Pi_{э}$ получили множество точек:

$$\Pi_{э} = \{\Pi_{эi}\}_{i=1}^n = \{\Pi_{э1}, \Pi_{э2}, \dots, \Pi_{эi}, \dots, \Pi_{эn}\}. \quad (11)$$

Множество точек

$$\Phi = \{\Phi_i\}_{i=1}^n = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_n\}. \quad (12)$$

было отмечено в системе координат $MO_3\Phi$.

Далее в системе MO_4V было получено множество точек:

$$V = \{V_i\}_{i=1}^n = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n\}. \quad (13)$$

Следующее множество точек было получено в системе координат $MO_5\mathcal{E}_{раб}$:

$$\mathcal{E}_{раб} = \{\mathcal{E}_{раби}\}_{i=1}^n = \{\mathcal{E}_{раб1}, \mathcal{E}_{раб2}, \dots, \mathcal{E}_{раби}, \dots, \mathcal{E}_{рабn}\}. \quad (14)$$

В качестве целевой функции выбраны энергозатраты на производство работ $\mathcal{E}_{раб}$:

$$\mathcal{E}_{раб} = f(N_{дв}, \Pi_{э}, V, \Phi). \quad (15)$$

Целевая функция $\mathcal{E}_{раб}$ зависит от переменных, заявленных ранее в формулах (10), (11), (12), (13). Переходя к пределу в формуле (15) с использованием (13), получили представление $\mathcal{E}_{раб}$ формулой (16), в которой

каждая из переменных стремится к своему заданному значению:

$$N_{дв} \rightarrow N_{0дв}, \Pi_{э} \rightarrow \Pi_{0э}, \Phi \rightarrow \Phi_0, V \rightarrow V_0. \quad (16)$$

Таким образом, формула (16) позволила определить энергозатраты на производство работ как целевую функцию:

$$\mathcal{E}_{раб} = \lim_{\substack{N_{дв} \rightarrow N_{0дв} \\ \Pi_{э} \rightarrow \Pi_{0э} \\ \Phi \rightarrow \Phi_0 \\ V \rightarrow V_0}} f(N_{дв}, \Pi_{э}, V, \Phi). \quad (17)$$

Далее в качестве примера на основании данных, соответствующих 5 единицам бульдозерной техники (m_1 – ДЗ-133; m_2 – ДЗ-29; m_3 – ДЗ-42; m_4 – ДЗ-110; m_5 – ДЗ-59С) и касающихся элементов отмеченных ранее множеств (2), (10), (11), (12), (13), (14), заполнена таблица 2 [10, 11]. При этом множество (2) трансформировалось в множество (18):

$$M_5 = \{m_i\}_{i=1}^5 = \{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\}. \quad (18)$$

Аналогично в формулах (10), (11), (12), (13), (14) $n = 5$.

В процессе расчета $\mathcal{E}_{раб}$ по формуле (17) были использованы следующие условия [8-10]:

1) происходит первичное формирование парка из машин, не имеющих наработки;

2) машины работают в условно-идеальных условиях, то есть эксплуатационная производительность ($\Pi_{э}$) равна технической ($\Pi_{т}$);

3) машина работает в течение всего фонда рабочего времени, то есть время работы машины в год равно годовому фонду рабочего времени (здесь необходимо пояснить: если парк машин формируется из машин, бывших в эксплуатации, то для решения задачи принимаются фактические данные по планируемому годовому времени работы машин). Тогда годовой объем работ (V) можно определить по формуле (19):

$$V = \Phi \cdot \Pi_r, \text{ м}^3 \quad (19)$$

Далее вычисляем энергозатраты ($\Theta_{\text{раб}}$) на производство работ на объектах, используя формулу (1).

При определении коэффициентов оптимальности по формулам (5), (6) были выбраны характеристики V и $\Theta_{\text{раб}}$. На основании данных таблицы 1 была составлена таблица 2, учитывающая коэффициенты оптимальности. Также в данной таблице представлен показатель эффективности $Z_{\text{эф}}$, который определяется следующим образом: среди полученных коэффициентов оптимальности k_i^* находим минимальное значение и соответствующей ячейке присваиваем индекс 1 (в нашем примере это машина m_4), который показывает наивысшую эффективность. Далее, по значениям коэффициентов k_i^* , по каждой машине в направлении от минимума до максимума определяем менее эффективные

машины и ячейкам присваиваем индексы: 2 (машина m_3); 3 (машина m_3); 4 (машины m_1 и m_2) соответственно.

Таким образом, проанализировав данные, представленные в таблице 2, можно сделать однозначный вывод о том, что наиболее эффективной с точки зрения выполнения наибольшего объема работ с наименьшими энергозатратами является машина m_4 [11].

Необходимо отметить, что представленная авторами математическая модель разрабатывалась непосредственно для мелиоративного производства и будет справедлива для других типов машин (экскаваторов, скреперов), а также при выполнении других видов работ (например, для кусторезов), и в этом случае суммарные энергозатраты будут иметь размерность кВт·год/м² [12].

В нашем случае целевая функция подразумевает сокращение суммарные годовых энергозатрат на производство работ по эксплуатации, ремонту и реконструкции мелиоративных систем. Решение задачи происходит от общего к частному, то есть авторы сначала рассматривают всю совокупность техники, а затем переходят к решению конкретной задачи определения эффективной машины среди бульдозеров (табл. 1).

Чтобы парк машин был оптимальным по критерию минимума суммарных годовых

Таблица 1. Таблица соответствия пяти машин выбранным характеристикам $N_{\text{дв}}$, Π_r , Φ , V с целевой функцией $\Theta_{\text{раб}}$

Table 1. Table of correspondence of five machines to selected characteristics $N_{\text{дв}}$, Π_r , Φ , V with objective function $\Theta_{\text{раб}}$

M	χ	$N_{\text{дв}}$, кВт	Π_r , м ³ /ч	Φ , маш.-ч	V , м ³	$\Theta_{\text{раб}}$, кВт·год/м ³
m_1		59	290	2270	658300	461,8
m_2		55	280	2270	635600	445,9
m_3		59	300	2270	681000	446,4
m_4		118	850	2270	1929500	315,1
m_5		250	1000	2100	2100000	525

Таблица 2. Таблица учета коэффициентов оптимальности и индексов эффективности для выбора машины

Table 2. Table of optimality coefficients and efficiency indices for machine selection

M	χ	V , м ³	$\Theta_{\text{раб}}$, кВт·год/м ³	k_i^* , %	$Z_{\text{эф}}$
m_1		658300	461,8	0,070	4
m_2		635600	445,9	0,070	4
m_3		681000	446,4	0,066	3
m_4		1929500	315,1	0,016	1
m_5		2100000	525	0,025	2

энергозатрат, он должен быть изначально сформирован из техники, имеющей наименьшие энергозатраты. В интерпретации авторов он был сформирован из единиц техники, имеющих наилучший показатель эффективности $Z_{эф}$, определенный по значению коэффициента оптимальности k_i^* . Парк бульдозеров использован в качестве примера из имеющихся марок бульдозеров в хозяйствах Саратовской области. Марки для расчета в принципе могут быть любые, алгоритм проведения расчетов при этом не изменится. Год выпуска и срок службы машин в рассматриваемом случае учитывает годовой фонд рабочего времени, то есть чем больше срок службы машины, тем больше времени необходимо ей на проведение ремонтных работ.

Список использованных источников

1. Абдразаков Ф.К. Оптимизация формирования парков машин и распределения техники по производственным объектам / Ф.К. Абдразаков, Д.Г. Горюнов // Строительные и дорожные машины. 2002. № 3. С. 12-14. EDN: YKPMVH.
2. Чумакова С.В. Применение математического моделирования к задачам прикладного характера / С.В. Чумакова, Я.Р. Абдразакова // Современная интеллектуальная трансформация социально-экономических систем: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Саратов: СГАУ. 2020. С. 147-150.
3. Соловьев Д.А. Математическая модель аналитического подхода сравнительного анализа производительности сельскохозяйственной техники при использовании технологии визуализации / Д.А. Соловьев, С.В. Чумакова, Р.Д. Гончаров // Helix. 2021. № 10 (5). С. 114.
4. Френкель А.А., Бар-Хиллел И. Основания теории множеств: Пер. с англ. Ю.А. Гастева / Под ред., вступ. ст. А.С. Есенина-Вольпина. Изд. 3-е, стер. М.: URSS, 2010. 554 с.
5. Solovev D.A., Chumakova S.V., Goncharov R.D. Mathematical model of analytical approach of comparative analysis of productivity of agricultural machinery when using visualization technology // Vavilov readings-2021. Dedicated to the 101st anniversary of the discovery of the law of homological series and the 134th anniversary of the birth of N.I. Vavilov. Saratov, 2022. С. 59.
6. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы: Пер. с франц., предисл. А.И. Штерна. М.: Наука, 1990. 485 с.
7. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: В 2 кн. Кн. 2. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. М.: Мир, 1986. 320 с.
8. Рогачев Д.А. Оптимизация мероприятий технической эксплуатации оросительных систем методами искусственного интеллекта // Природообустройство. 2024. № 4. С. 12-19.
9. Журавлева Л.А. Развитие материально-технической базы мелиоративного комплекса на инновационной основе / Л.А. Журавлева, Алдияб Анас // Природообустройство. 2024. № 2. С. 21-27.

Выводы

При формировании парка машин, предназначенного для мелиоративного производства, необходимо стремиться к тому, чтобы он по возможности был сформирован из единиц техники, имеющих наилучший показатель эффективности $Z_{эф}$, определенный по значению коэффициента оптимальности k_i^* (5). В работе авторами представлена валидная методика по отбору машин, соответствующих наименьшим энергозатратам $\mathcal{E}_{\text{раб}}$ (а значит, и соответствующих наилучшему индексу эффективности), описана при помощи разработанной универсальной математической модели, имеющей прикладной характер, и подтверждена практическими исследованиями.

References

1. Abdrazakov F.K., Goryunov D.G. Optimisation of machine park formation and machinery distribution to production facilities. *Stroitel'nye i rozhnye mashiny*. 2002. N3. 12-14. EDN YKPMVH.
2. Chumakova S.V., Abdrazakova Y.R. Application of mathematical modeling to applied tasks. Modern intellectual transformation of socio-economic systems: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Saratov: SSAU. 2020. pp. 147-150.
3. Solov'ev D.A.; Chumakova S.V.; Goncharov R.D. Mathematical model of the analytical approach of the comparative analysis of the agricultural machinery productivity using the visualisation technology. *Helix*. 2021. N10 (5). 114.
4. Frenkel A.A.; Bar-Hillel I. Foundations of Set Theory. Translated from English by Y.A. Gastev; edited by A.S. Eсенин-Volpin. – 2nd ed. 2006-554 p.
5. Solovev D.A., Chumakova S.V., Goncharov R.D. Mathematical model of analytical approach of comparative analysis of productivity of agricultural machinery when using visualisation technology. *Vavilov readings-2021. Dedicated to the 101st anniversary of the discovery of the law of homological series and the 134th anniversary of the birth of N.I. Vavilov*. Saratov. 2022. 59.
6. Minu M. Mathematical Programming. Theory and algorithms. M. Nauka. 1990. 485 s.
7. Reckleitis G., Reivindran A., Ragsdell K. Optimization in engineering: in 2 books, Moscow: Mir. 1986. 485 s.
8. Rogachev D.A. Optimization of measures for the technical operation of irrigation systems by artificial intelligence methods. // *Prirodoobustrojstvo*. 2024;(4): 12-19.
9. Zhuravleva L.A., Aldiab Anas. Development of the material and technical base of the melioration complex on an innovative basis // *Prirodoobustrojstvo*. 2024. No. 2. P. 21-27.
10. Karimxodjayev N., Almatayev T., Odilov X. Main factors causing the deterioration of automobile parts which are used in various natural-climate conditions. *Universum: technical sciences*. 2020. N5 (74). 68-71
11. Zagoruiko M.G. Reducing the energy intensity of irrigation during operation of multi-support irrigation machines "Cascade" / M.G. Zagoruiko, D.A. Soloviev, N.F. Ryzhko,

10. Каримходжаев Н., Алматаев Т., Одилов Х. Основные причины, вызывающие износ деталей автоотранспортных средств, эксплуатирующихся в различных природно-климатических условиях / Н. Каримходжаев, Т. Алматаев, Х. Одилов // *Universum: технические науки*. 2020. № 5 (74). С. 68-71.

11. Загоруйко М.Г. Снижение энергоемкости полива при эксплуатации многоопорных дождевальных машин «Каскад» / М.Г. Загоруйко, Д.А. Соловьев, Н.Ф. Рыжко, С.Н. Рыжко // *Мелиорация и водное хозяйство*. № 1. 2024. С. 39-42.

12. Абдразаков Ф.К. Технологии и технические средства проведения эксплуатационно-ремонтных работ на оросительных каналах / Ф.К. Абдразаков, В.С. Егоров, Р.Н. Бахтиев. Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. 152 с.

Об авторах

Светлана Валентиновна Чумакова, канд. техн. наук, доцент кафедры, SPIN-код: 4454-5770, AuthorID: 713475; ch-sv@yandex.ru

Дмитрий Геннадьевич Горюнов, канд. техн. наук, доцент кафедры, SPIN-код: 3886-9988, AuthorID: 302111; md111@bk.ru

Михаил Геннадьевич Загоруйко, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, SPIN-код: 2738-5137, AuthorID: 323776; zagorujko.misha2013@yandex.ru

Критерии авторства / Author shipcriteria

Чумакова С.В., Горюнов Д.Г., Загоруйко М.Г. выполнили экспериментальные 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 interest

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 17.04.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 10.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 10.01.2025

S.N. Ryzhko // *Land Reclamation and Water Management*. – No. 1. – 2024. – P. 39-42.

12. Abdrazakov F.K. Technologies and technical means for carrying out operational and repair work on irrigation canals / F.K. Abdrazakov, V.S. Egorov, R.N. Bakhtiev. – *Saratov: Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Saratov State Agrarian University"*, 2008. 152 p.

About the authors

Svetlana V. Chumakova, CSc (Eng.), associate professor of the department; SPIN-код: 4454-5770, AuthorID: 713475; ch-sv@yandex.ru

Dmitry G. Goryunov, CSc (Eng.), associate professor of the department; SPIN-код: 3886-9988, AuthorID: 302111; md111@bk.ru

Mikhail G. Zagoruiko, CSc (Eng.), associate professor, senior researcher; SPIN-код: 2738-5137, AuthorID: 323776; zagorujko.misha2013@yandex.ru

Chumakova S.V., Goryunov D.G., Zagoruiko M.G. carried out experimental and 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.

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-63-72>

УДК 627.8: 69.059: 624(075.8)

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДОПРОЯВЛЕНИЯ
В ЗОНЕ КОНСТРУКЦИЙ ШАХТ ТУРБИН РЫБИНСКОЙ
И УГЛИЧСКОЙ ГЭС****О.Д. Рубин^{1,2✉}, Ю.А. Ильин³, А.Л. Шевкин³, И.В. Евдокимова³**¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия² АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт Гидропроект им. С.Я. Жука»; 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, Россия³ Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт Гидропроект им. С.Я. Жука» – «НИИ энергетических сооружений»; 125362, г. Москва, Строительный проезд, 7А, Россия

Аннотация. На внутренних конструкциях гидротехнических сооружений ряда ГЭС отмечается водопроявление, то есть появление следов влаги вне пределов водопропускного тракта, что может привести к изменению эксплуатационного состояния конструкции или повреждению дорогостоящего оборудования. При этом процессы, вызывающие подобное проявление, крайне разнообразны. Образование очагов фильтрации может быть обусловлено: постепенным изменением состояния блочных швов; деградацией цементного камня вследствие коррозии или под воздействием нагрузок, превышающих проектные; повышением фильтрационных расходов; особенностями возведения сооружений. В качестве примера сооружений, для которых характерно водопроявление, необходимо привести Рыбинскую и Угличскую ГЭС, для которых в течение всего периода эксплуатации наблюдается наличие водопроявления вблизи шахт турбин гидроагрегатов и на поверхностях стаканов спиральных камер. В 2019-2021 гг. с целью установления причин данных явлений специалистами филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» проведено обследование бетонных конструкций Угличской и Рыбинской ГЭС, в ходе которого установлено, что основные причины появления воды на рассматриваемых участках для каждой станции во многом схожи, но не являются идентичными.

Ключевые слова: водопроявление, очаги фильтрации, обследование бетонных конструкций, состояние блочных швов, деградация цементного камня, Рыбинская и Угличская ГЭС

Формат цитирования: Рубин О.Д., Ильин Ю.А., Шевкин А.Л., Евдокимова И.В. Анализ результатов исследований водопроявления в зоне конструкций шахт турбин Рыбинской и Угличской ГЭС // Природообустройство. 2025. № 1. С. 63-72. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-63-72>

Scientific article

**ANALYSIS OF THE RESULTS OF STUDIES OF WATER MANIFESTATION
IN THE ZONE OF TURBINE SHAFT STRUCTURES OF THE RYBINSK
AND UGLICH HPPS****O.D. Rubin^{1,2✉}, Yu.A. Ilyin³, A.L. Shevkin³, I.V. Evdokimova³**¹National Research Moscow State University of Civil Engineering; 129337, Moscow, Yaroslavl'skoye shosse, 26, Russia²Design, Survey and Research Institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk; 125080, Moscow, Volokolamskoe shosse, 2, Russia³Branch of JSC "Design, Survey and Research Institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk" – "Research Institute of Power Structures"; 125362, Moscow, Stroitelny proezd, 7A, Russia

Abstract. On the internal structures of hydraulic structures of a number of HPPs, water manifestations are noted, that is, the appearance of traces of moisture outside the culvert, which can lead to a change in the operational condition of the structure or damage to expensive equipment. At the same time, the processes that cause such manifestations are extremely diverse. The formation of filtration foci can be due to a gradual change in the condition of block joints; degradation of cement stone due to corrosion or

under the influence of loads exceeding the design ones; increase in filtration costs, as well as the features of the construction of structures. As an example of structures that are characterized by water manifestation, it is necessary to cite the Rybinsk and Uglich hydroelectric power plants, for which during the entire period of operation there is a water manifestation near the turbine shafts of hydroelectric units and on the surfaces of the barrels of spiral chambers. In 2019-2021, in order to establish the causes of these phenomena, specialists of the branch of JSC Institute Hydroproject-NIIES conducted a survey of the concrete structures of the Uglich and Rybinsk hydroelectric power plants, during which it was found that the main causes of water in the areas under consideration for each station are largely similar, but not identical.

Keywords: water inflows, filtration foci, inspection of concrete structures, condition of block joints, degradation of cement stone, Rybinsk and Uglich HPPs

Format of citation: Rubin O.D., Ilyin Yu.A., Shevkin A.L., Evdokomova I.V. Analysis of the results of studies of water manifestation in the zone of turbine shaft structures of the Rybinsk and Uglich HPPs // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. № 1. P. 63-72. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-63-72>

Введение. С целью обеспечения долгосрочной эксплуатации появление следов влаги на внутренних конструкциях гидротехнических сооружений за пределами водопропускных трактов требует контроля. Процессы, вызывающие подобное проявление, крайне разнообразны: образование очагов фильтрации может свидетельствовать: о строительных неточностях при монтаже гидроизоляционных шпонок в блочных швах; о постепенном изменении состояния самих блочных швов; о деградации цементного камня вследствие коррозии или под воздействием нагрузок, превышающих проектные; о повышении фильтрационных расходов, а также о возникновении состояний, постепенное развитие которых может привести к изменению эксплуатационного состояния конструкции или повреждению дорогостоящего оборудования. Вместе с тем в некоторых случаях присутствие влаги во внутренних помещениях гидроэлектростанций обуславливается особенностями их возведения (1935-1950 гг.): при необходимости проведения строительных работ в сжатые сроки в условиях нехватки цемента и недоступности качественного инертного заполнителя неизбежно принимались некоторые допущения, сделавшие наличие фильтрационных проявлений неизбежным, однако одновременно в период строительства разрабатывались меры, минимизировавшие воздействие таких проявлений на окружающие конструкции. Проведение мероприятий по снижению объема водопроявления для подобных участков зачастую было нерациональным ввиду высокой стоимости работ и их потенциальной невысокой эффективности, поскольку за подавлением фильтрации в определенной зоне можно ожидать ее появления в зоне, сопряженной с рассматриваемой. В качестве примера сооружений, при возведении которых были приняты подобного рода допущения, необходимо привести Рыбинскую и Угличскую ГЭС, для которых

в течение всего периода эксплуатации наблюдается наличие водопроявления вблизи шахт турбин гидроагрегатов и на поверхностях стаканов спиральных камер. Для Рыбинской ГЭС скопление воды вокруг шахт турбин на отметке 92,50 м наблюдается преимущественно в холодное время года, для Угличской ГЭС на отметке 107,80 м – в холодное время года и при высоких уровнях воды в верхнем бьефе. В 2019-2021 гг. с целью установления причин данных явлений специалистами филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» проведено обследование бетонных конструкций Угличской и Рыбинской ГЭС, в ходе которого установлено, что основные причины появления воды на рассматриваемых участках для каждой станции во многом схожи, но не являются идентичными. При этом был использован опыт проведения обследования бетонных и железобетонных конструкций ГЭС/ГАЭС [1-6].

Материалы и методы исследований. *Особенности конструкций шахт турбин ГЭС.* Поскольку в случае и Угличской, и Рыбинской ГЭС наблюдающиеся процессы водопроявления в зоне шахт турбин неразрывно связаны с особенностями существовавшей сырьевой базы, начать обсуждение причин их возникновения следует с краткого обсуждения материалов, применявшихся при проведении бетонных работ. При возведении обеих станций применялись портландцементы и пуццолановые портландцементы различных заводов. В бетон подводных частей плотины и здания ГЭС при замесах вводили мокрым путем трепел активностью 180-250 мг/г СаО в количестве не менее 20% от массы цемента. Во всех составах бетона применялся речной песок с модулем крупности 1,9-2,85. В качестве крупного заполнителя применялся в основном аллювиальный гравий фр. 5-40 и 5-120. Водоцементное отношение для всех типовых составов было не ниже 0,45. Укладка бетона в блоки бетонирования производилась с использованием

ручного уплотнения виброиглами и вибробулавами. В основном используемыми марками бетона были марки М110, М130 и М170, марка бетона плит оболочек – М250 [7].

Введение в состав бетонной смеси дополнительного количества гидравлически активной добавки – трепела – позволило снизить стоимость строительства, добиться значительного снижения термических напряжений, неизбежных в массивных блоках (однако не подавить их полностью), и в итоге получить материал, в значительной степени устойчивый к коррозии выпелачивания и сульфатной коррозии. При этом, однако, при производстве бетонных работ подобного вида бетонная смесь не отличалась удобоукладываемостью: мелкие частицы трепела способны оттягивать на себя часть воды затворения, образуя на поверхности гидратные оболочки, что приводит к значительному снижению осадки нормального конуса.

Как указано, водоцементные отношения для всех типовых составов были выше 0,45 (при этом реальные значения В/Ц при укладке материала на месте проведения работ наверняка были выше ввиду сложности укладки жесткой смеси с применением ручного виброинструмента). В свою очередь, это не могло не привести к возникновению в теле затвердевшего камня развитой системы капиллярных пор – образование сети капилляров всегда происходит на начальном этапе формирования цементного камня, но со временем, по мере перехода коагуляционной структуры цементного камня в кристаллизационную, капиллярная сеть распадается на отдельные сегменты, однако при высоких водоцементных отношениях этого может не произойти. Также следует отметить более низкую скорость достижения проектной марки бетоном на пуццолановом портландцементе, его повышенную ползучесть и склонность к значительным деформациям усадки-набухания при смене циклов сушки-увлажнения [8, 9].

На момент возведения как Угличской, так и Рыбинской ГЭС подобные особенности твердения пуццолановых цемента уже были хорошо известны, что привело, с одной стороны, к широкому использованию изготавливаемых на заводе плит оболочек, а с другой стороны – включению в схему обоих зданий конструкций и элементов, призванных сделать неизбежные фильтрационные проявления со стороны водопропускного тракта менее заметными и гарантировать безопасную эксплуатацию. В случае и Угличской, и Рыбинской ГЭС мероприятия по исключению фильтрации воды со стороны водопропускного

тракта во внутренние помещения включали в себя создание дренажных слоев в перекрытиях спиральных камер и устройство диафрагм в массиве бетона шахт турбин. Схема устройства противофильтрационных элементов Угличской ГЭС приведена на рисунке 1 (а, б), Рыбинской ГЭС – на рисунке 2 (а, б).

На Угличской ГЭС для сбора профильтровавшейся воды по верху монолитной плиты перекрытия устроена стяжка из тощего бетона прочностью 30 кгс/см², поверх которой устроена песчаная отсыпка. Поверх песчаной отсыпки уложен слой цементной бумаги, затем – стяжка из бетона прочностью 90 кгс/см². Стяжка из тощего бетона имеет уклон к водосточным канавкам, дренирующимся со стороны верхнего бьефа в смотровой колодец, расположенный в раздельном бычке между двумя агрегатами, со стороны нижнего бьефа – через трубы диаметром 107 мм (5 дюймов), выходящие на внешнюю сторону стакана спиральной камеры и выпущенные в дренаж перекрытия на отметке 96,00 м (по проекту, на сегодняшний день данные элементы отсутствуют и разгрузка перекрытия происходит непосредственно на внешние конструкции стакана спиральной камеры). Стенки уложенных в перекрытие каналов выполнены из бетона М110, в стенках каналов, пересекающих путь дренажей, предусмотрены отверстия. Для предотвращения поднятия капиллярной влаги из перекрытия в конструкции шахты турбины устроен строительный шов, плоские части которого прикрыты битумной мембраной толщиной 2 см, а наклонная мембрана пропитана битумной краской.

Конструкция дренажа в перекрытии спиральной камеры Рыбинской ГЭС несколько иная: по верху монолитной плиты перекрытия устроена стяжка из тощего бетона, поверх которой устроены призмы гравийного дренажа. Поверх призм дренажа нанесены слой бетонной подготовки и напольное покрытие. Стяжка имеет уклон к водосточным канавкам, дренирующимся со стороны верхнего бьефа в смотровой колодец, расположенный в раздельном бычке между двумя агрегатами в секции, со стороны нижнего бьефа – через выпуски на внешнюю сторону стаканов спиральных камер на отметке 82,0 м. Отвод воды также возможен через слой крупного песка в осадочный шов. Уложенные в перекрытие кабельные каналы изолированы от бетона слоем асфальтовой облицовки толщиной 1 см. Для предотвращения поднятия капиллярной влаги из перекрытия в конструкции шахты турбины предусмотрена битумная мембрана (рис. 1). Для стока конденсата, образующегося вблизи

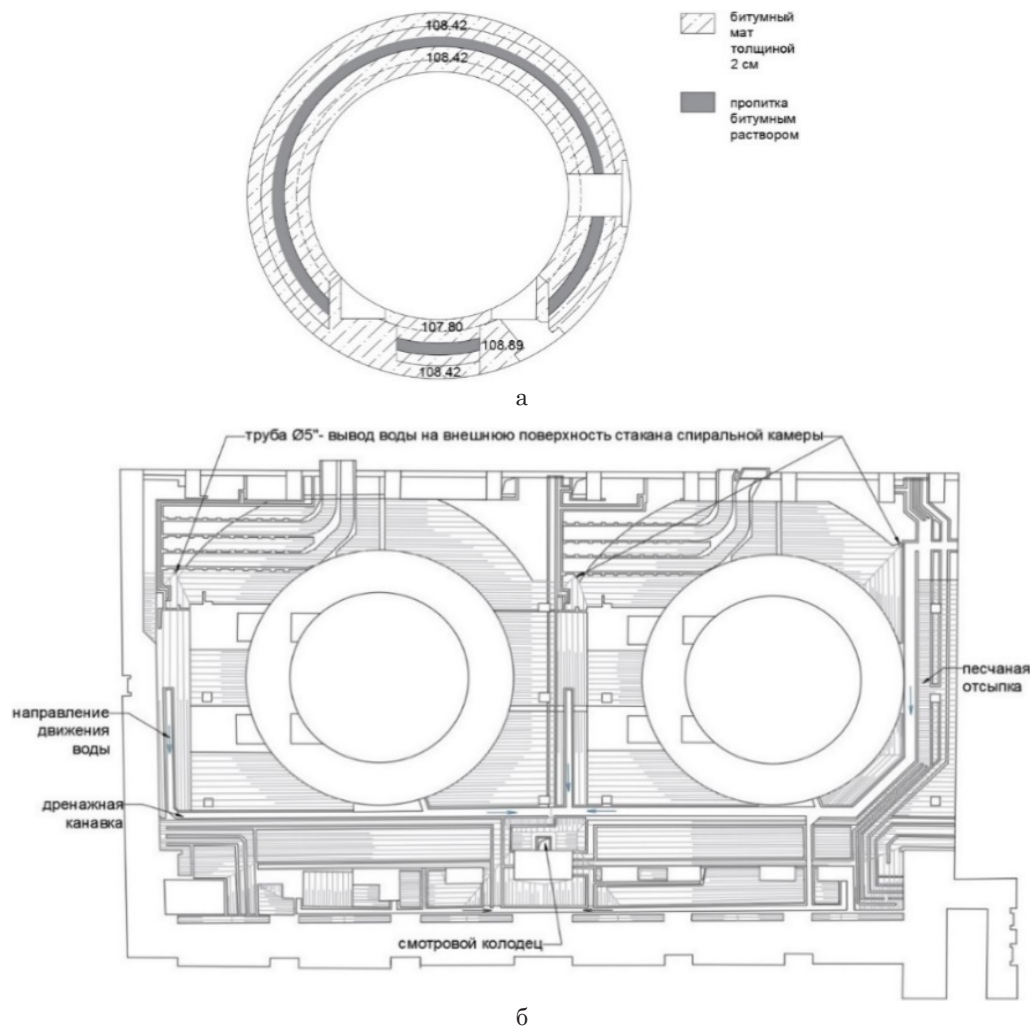


Рис. 1. Система противофильтрационных элементов на Угличской ГЭС:

- а) противофильтрационная мембрана шахты турбины;
б) устройство дренажа в перекрытии на отметке 92,50 м

Fig. 1. A system of impervious elements at the Uglich HPP:

a) impervious membrane of the turbine shaft, b) drainage device in the ceiling at an elevation of 92.50 m

опорных колонн статора в стены шахты турбины, встроены дренажные трубы, выведенные в перекрытие на отметке 92,5 м.

Таким образом, на этапе анализа данных проектной и исполнительной документации становится понятно, что появление воды вокруг шахт турбин и Рыбинской, и Угличской ГЭС вполне может быть прямым следствием решений, принятых при возведении станций. Однако при этом не следует упускать из внимания то, что за годы эксплуатации могла произойти деградация цементного камня под действием динамической нагрузки от работающих гидроагрегатов, постепенного разрушения конструкций вследствие некачественной укладки отдельных блоков при возведении либо коррозии. С целью исключения возможности протекания данных процессов был проведен визуальный осмотр строительных конструкций, а также осуществлены

мероприятия инструментального контроля, включавшие в себя отбор кернов из бетона спиральных камер, основного бетона и штрабного бетона омоноличивания шахт турбин Рыбинской ГЭС, основного бетона и бетона омоноличивания шахт турбин Угличской ГЭС.

Результаты и их обсуждение. Анализ данных выполненных исследований строительных конструкций. При проведении осмотра бетонных конструкций спиральных камер Рыбинской ГЭС на отметке 82,00 м в декабре 2019 г. установлено, что наблюдаемые на этой отметке водопроявления связаны с разгрузкой дренажа перекрытия на отметке 92,50 м. Согласно рисунку 2.б вода на этой отметке должна была отводиться на внешнюю сторону спиральных камер через специально организованные дренажные выпуски. Однако это происходит лишь отчасти: по всей видимости, по причине спешки

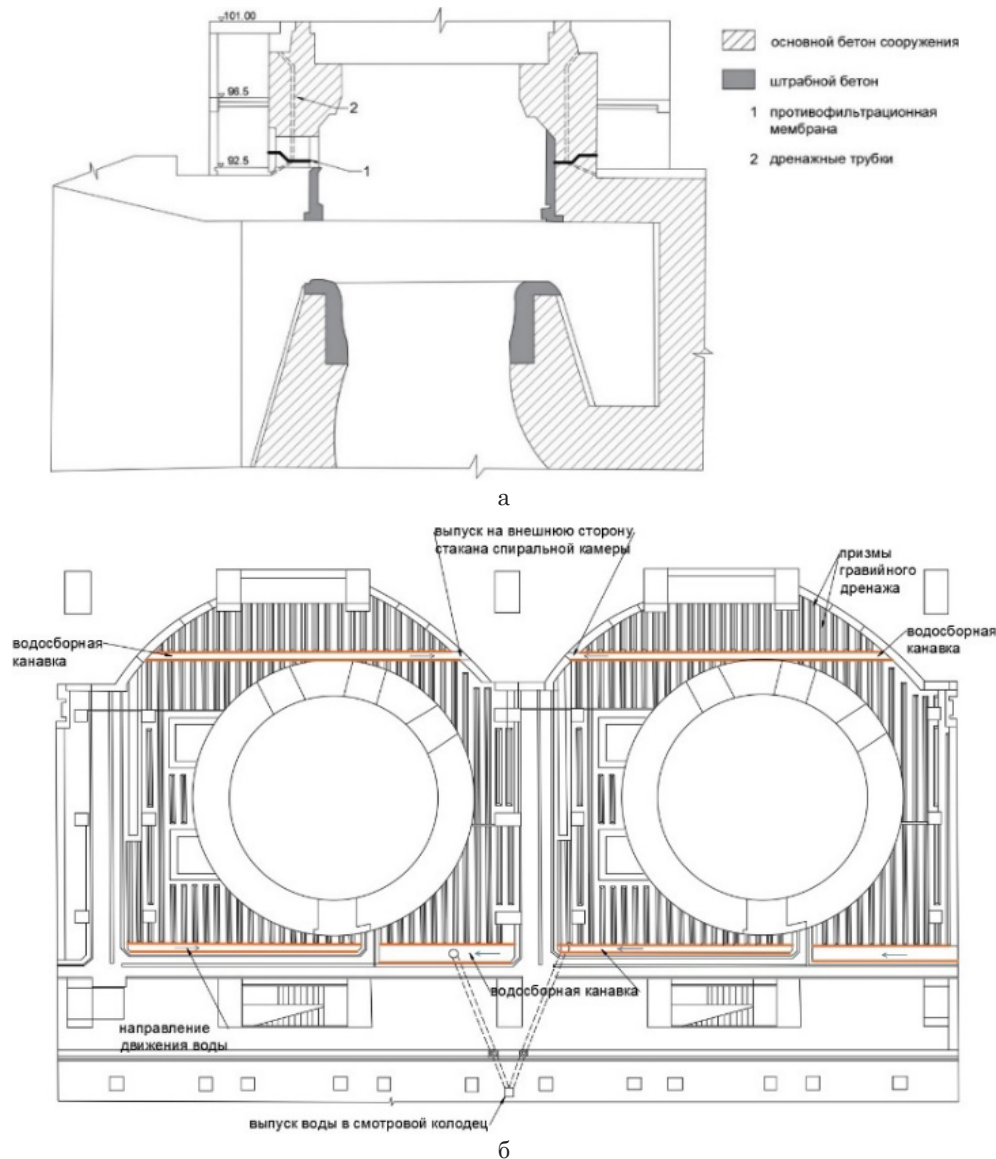


Рис. 2. Система противофильтрационных элементов на Рыбинской ГЭС:

а) противофильтрационная мембрана шахты турбины; б) устройство дренажа в перекрытии на отметке 92,50 м

Fig. 2. A system of impervious elements at the Rybinsk HPP:

a) impervious membrane of the turbine shaft, b) drainage device in the ceiling at an elevation of 92.50 m

при возведении конструкции строительные швы внутри перекрытия в месте стыков водосборной канавки и плит-оболочек гидроагрегата не были достаточно проработаны. Помимо этого, не было до конца удалено деревянное уплотнение, использовавшееся при монтаже плит-оболочек, вследствие чего разгружающаяся из перекрытий вода имеет возможность растекаться по строительным швам и примыкающим к ним дефектам плит и создавать видимость наличия фильтрации со стороны спиральной камеры.

Визуальный осмотр бетона спиральной камеры гидроагрегата 5 со стороны водопропускного тракта, проведенный в мае 2021 г., показал наличие на стенках спиральной камеры участков аккумуляции продуктов коррозии бетона

в месте примыкания стен камеры к конструкциям перекрытия, особенно выраженных в местах пролегания в перекрытии дренажных канавок. Наличие данных участков аккумуляции также отмечалось при обследовании на данном участке в 1972 г., проведенном сотрудниками ВНИИГ им. Веденеева [10]. Также в ходе визуального осмотра обнаружены трещины в бетоне перекрытия спиральной камеры, образование которых связано с промерзанием верхнего строения здания ГЭС в зимнее время, незаваренные швы в металлических облицовках шахты турбины раскрытием до нескольких миллиметров. Данные дефекты при определенных условиях могут способствовать поступлению воды в перекрытие. При простукивании металлических облицовок

шахты турбины гидроагрегата 5 бухтение отмечалось для всех участков конструкции, однако это могло быть связано со значительной усадкой пуццоланового цемента в отсутствие воды: на момент осмотра производились работы по замене гидросилового оборудования гидроагрегата 5, и проточный тракт был осушен на протяжении длительного времени.

Осмотр шахт турбин Рыбинской ГЭС был произведен 19-20 мая 2021 г. сразу после окончания весеннего паводка. При осмотре на отм. 92,50 м отмечалось образование луж, разливающихся от шахт турбин на расстояние до 50 см (присутствовавшие, однако, на поверхности перекрытия следы высыхания свидетельствовали о том, что объем фиксируемых проявлений может быть и больше). На участках перекрытия, примыкающих к шахтам турбин (в особенности внутри вентиляционных отверстий), наблюдалось отслоение полимерного наливного пола. На стороне, обращенной к нижнему бьефу, отмечался рост белых вытянутых кристаллов: под поперечным микроскопом с 50-кратным увеличением были различимы единичные двойниковые кристаллы гипса и скопления тонких нитяных кристаллов мирабиллита $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$, постепенно разрушающихся вследствие снижения влажности окружающей среды с образованием белого порошка тенардита Na_2SO_4 . Для всех шахт турбин отмечалось наличие следов стока воды из технологических отверстий в перекрытии на отм. 96,50 м, в некоторых случаях стекающая по конструкции шахты турбины вода растекалась по горизонтальным строительным швам. При осмотре строительных конструкций на отм. 96,50 м установлено, что образование данных участков водопроявления связано с образованием конденсата в местах ввода системы водяного охлаждения между опорами статора генератора. Также при осмотре на отм. 92,50 м отмечается наличие повреждений лакокрасочного покрытия шахт турбин, вызванное капиллярным подъемом влаги по штукатурному слою: для машин 2, 3, 4 высота наблюдаемых участков повреждений лежит в пределах 50-70 см, для машины 6 высота капиллярного подъема влаги по штукатурному слою составляла до 2,5 м. В ходе проведения осмотра с использованием тепловизора следов аккумуляции продуктов коррозии бетона вблизи гидроизоляционной мембраны не обнаружено, также отсутствуют и следы протечек воды из-под мембраны. Для блока агрегата 4 отмечался застой воды в перекрытии (рис. 3).

Осмотр конструкций шахт турбин гидроагрегатов 1 и 2 Угличской ГЭС на отметке 107,80 м

был произведен в конце мая 2021 г. При этом так же, как и для Рыбинской ГЭС, отмечались следы стока конденсата с отметкой 111,00 м, приуроченные к местам ввода в шахту турбины системы водяного охлаждения генератора. В отличие от Рыбинской ГЭС при проведении обследования конструкций шахт гидроагрегатов с использованием тепловизора отмечались следы протечек из-под гидроизоляционной мембраны, под мембраной отмечалась аккумуляция продуктов выноса (рис. 4). Основная концентрация следов водопроявления для обоих гидроагрегатов приходилась на участок на отметке 107,80 м, ограниченный с двух сторон шахтами сервоприводов, а сверху – противофильтрационной мембраной. На данном участке наблюдался рост кристаллов сульфатов натрия и кальция. Визуальный осмотр внутренних конструкций спиральной камеры гидроагрегата 1 Угличской ГЭС показал наличие плотного слоя глинистых отложений толщиной до 1 см, надежно прикрывающего все дефекты.

Измерение параметров влажного воздуха производилось на отметке 92,50 м; 96,5 м; 101,0 м Рыбинской ГЭС (табл. 1) и 107,80 м; 111,00 м; 116,00 м Угличской ГЭС (табл. 2).

Как следует из таблиц 1 и 2, образования конденсата на конструкциях Рыбинской ГЭС следует ожидать при снижении температуры ниже 11°C , для конструкций Угличской ГЭС на отм. 107,80 м – ниже $10-13^\circ\text{C}$. Следует отметить, что при проведении тепловизионной съемки в мае 2021 г. для Рыбинской ГЭС на поверхностях перекрытия, прилегающих к шахтам турбин на отметке 92,50 м, присутствовали участки, температура поверхности которых была ниже 11°C . Это подтверждалось при проведении замеров с использованием контактного термометра, что

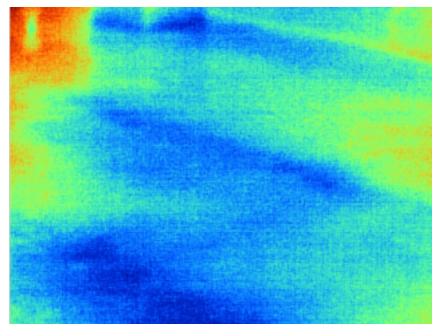


Рис. 3. Подтопление гравийных дренажных призм, уложенных в перекрытие блока ГА4 Рыбинской ГЭС (по данным тепловизионной съемки)

Fig. 3. Flooding of gravel drainage prisms laid in the ceiling of Unit GA4 of the Rybinsk HPP (according to thermal imaging data)

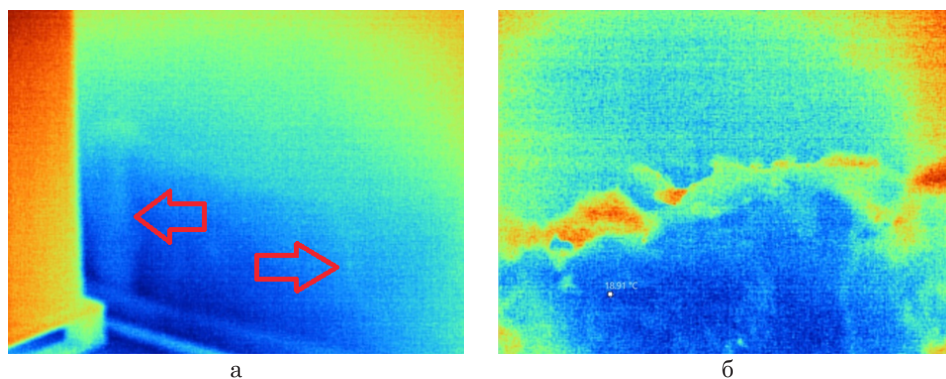


Рис. 4. Следы протечек из-под гидроизоляционной мембраны на конструкциях шахты ГА1:
а) участок аккумуляции продуктов выноса в строительном шве, содержащем мембрану;
б) (по данным тепловизионной съемки)

Fig. 4. Traces of leaks from under the waterproofing membrane on the structures of the shaft GA1
a) and the area of accumulation of removal products in the construction joint containing the membrane
b) (according to thermal imaging data)

Таблица 1. Параметры рабочей среды для машинного зала Рыбинской ГЭС

Table 1. Operating environment parameters for the turbine hall of the Rybinsk HPP

Отметки, м Marks, m	Диапазон изменения температур воздуха, °C Air temperature range, °C	Диапазон изменения влажности воздуха, % Air moisture change range, %	Влагосодержание сухого воздуха, г/кг Dry air moisture content, g / kg	Температура точки росы, °C Dew point temperature, °C
92,50	11,67-15,28	92,96-74,84	8,2-8,4	10,5-11
96,50	16,28-20,42	73,86-53,52	8,4	11
101,00	20,65-23,01	51,63-44,42	8,4	11

Таблица 2. Параметры рабочей среды для машинного зала Угличской ГЭС

Table 2. Operating environment parameters for the turbine hall of the Uglich HPP

Отметки, м Marks, m	Номер агрегата Unit number	Температура воздуха при обследовании, °C Air temperature during inspection, °C	Влажность воздуха при обследовании, % Air moisture during inspection, %	Влагосодержание сухого воздуха, г/кг Dry air moisture content, g / kg	Температура точки росы, °C Dew point temperature, °C
107,80	1	17,4	72,1	8	10
107,80	2	18,35	70,56	9,5	13
111,00	1	20,53	55,2	8,7	11,5
111,00	2	21,58	36,0	5,5	5
116,00	1	18,61	36,07	5,2	4,5
116,00	2	18,91	40,02	5,2	4,5

говорит о возможности появления конденсата на данных конструкциях и в теплое время года. Для Угличской ГЭС полученные на отм. 111,00 м результаты объяснялись возведением на момент проведения обследования гипсокартонной перегородки между агрегатами 1 и 2, вследствие чего шахта турбины гидроагрегата 2 оказалась изолированной в сравнительно небольшом объеме с хорошим воздухообменом, обеспечиваемым вытяжным вентилятором.

При возведении конструкций спиральной камеры Рыбинской ГЭС для укладки за плиты-оболочки использовался основной бетон марки М170, для промежуточных и направляющих

бычков – марки М110. Проектная марка по прочности бетона плит-оболочек составляла М250. При возведении шахт турбин гидроагрегатов также использовались основной бетон марки М170 и штабной бетон омоноличивания металлических облицовок, данные о проектной марке которого отсутствуют. Определение в настоящее время прочностных характеристик бетона проводилось неразрушающими методами: ультразвуковым и методом упругого отскока. Получены данные о среднем классе бетона в конструкциях Рыбинской ГЭС:

– основной бетон спиральных камер (отм. 82,00) – В27,7 МПа;

– бетон плит-оболочек спиральных камер (отм. 82,00) – В38,4 МПа;

– бетон шахты турбин (выше отм. 92,50) – В30,1 МПа.

Таким образом, фактический класс прочности бетона обследованных конструкций водопропускного тракта Рыбинской ГЭС превышает проектные значения (В13,6 для марки М170). Понижение прочности бетона (18,4 МПа) отмечается для конструкций плит-оболочек внутренней части спиральной камеры гидроагрегата 5 (проектная марка М200, что соответствует классу прочности В20). Однако следует отметить, что снижение содержания СаО в пробах цементного камня, отобранных из плит-оболочек, находящихся в контакте с водой, наблюдалось уже на ранних этапах эксплуатации [11], что могло быть вызвано его вымыванием из поверхностного слоя мягкой водой водохранилища. По данным обследования 1972 г., прочность бетона плит-оболочек соответствовала классу В14,1 при определении ультразвуковым методом, классу В16,1 – при определении по методу пластической деформации [10]. Это позволяет сделать вывод о том, что состояние бетона конструкций на этом участке за прошедшие 50 лет эксплуатации не менялось.

Определение марки по водонепроницаемости бетона проводилось по образцам, отобранным из конструкций для штрабного бетона и бетона омоноличивания шахт турбин гидроагрегатов 4 и 5 по методу мокрого пятна и неразрушающим способом по воздухопроницаемости по ГОСТ 12780.5 для конструкций плит-оболочек внутренней части спиральной камеры гидроагрегата 5. Полученные результаты представлены в таблице 3.

При возведении Угличской ГЭС на рассматриваемом участке применялся бетон марки М170 для зоны спиральной камеры и в качестве основного бетона шахт турбин, для омоноличивания металлических облицовок шахт турбин применялся литой бетон марки М200, состав которого в документации отсутствует. Определение прочности бетона конструкций производилось неразрушающими методами: ультразвуковым по ГОСТ 17624 и по методу упругого отскока по ГОСТ 22690, а также по образцам, отобранным из конструкции шахты турбины, по ГОСТ 28570. Отбор образцов-кернов из конструкций шахты турбины производился на участке, локализованном между шахтами сервоприводов и характеризовавшимся наибольшим водопроявлением, и на смежном участке, для которого подобные явления отсутствовали. На поверхности керна, извлеченного на участке наибольшего водопроявления, присутствовало большое количество округлых воздушных пор, что говорило об использовании пластифицирующей добавки пептизатора (типа омыленного древесного пека) или пенообразователя (типа серной кислоты). Это позволяет сделать вывод о том, что участок шахты турбины между сервоприводами до противофильтрационной мембраны выполнен из литого бетона марки М200, использованного для омоноличивания металлических облицовок турбин и шахт сервоприводов несмотря на то, что проектом в этом месте был предусмотрен обычный бетон марки М170. Данное решение было принято, возможно, в связи со значительным армированием на данном участке: в ходе определения параметров армирования магнитным способом было установлено, что расстояние между арматурными стержнями составляет здесь 7-10 см.

Таблица 3. Результаты определения водонепроницаемости бетона конструкций Рыбинской ГЭС

Table 3. Results of determining the concrete waterproofness of the Rybinsk HPP structures

Конструкция <i>Structure</i>	Марка по водонепроницаемости <i>Waterproofness brand</i>
Гидроагрегат 4, штрабной бетон омоноличивания шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 4, strained concrete for sealing hydraulic unit shaft</i>	W2
Гидроагрегат 4, основной бетон шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 4, the main concrete of the hydroelectric unit shaft</i>	не обладал маркой по водонепроницаемости <i>did not have a waterproof brand</i>
Гидроагрегат 5, штрабной бетон омоноличивания шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 5, strained concrete for sealing hydraulic unit shaft</i>	W4
Гидроагрегат 5, штрабной бетон омоноличивания шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 5, strained concrete for sealing hydraulic unit shaft</i>	W2
Плиты-оболочки внутренней зоны спиральной камеры <i>Shell plates of the inner zone of the spiral chamber</i>	W2

Полученные данные о среднем классе бетона в конструкциях Угличской ГЭС:

– основной бетон спиральных камер (отм. 82,00) – 24,2 МПа;

– бетон шахты турбин (выше отм. 107,80) – 31,1 МПа.

Таким образом, фактический класс прочности бетона обследованных конструкций водопропускного тракта Угличской ГЭС превышает проектные значения (В13,6 для марки М170).

Определение марки по водонепроницаемости бетона проводилось по образцам, ото-

бранным из конструкций для штрабного бетона и бетона омоноличивания шахты турбины гидроагрегата 1 по методу мокрого пятна, и неразрушающим способом по воздухопроницаемости по ГОСТ 12780.5 для бетонных конструкций внутренней части спиральной камеры гидроагрегата 1. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Следует отметить, что при проведении испытаний на водонепроницаемость серии штрабного бетона протечка воды происходила мгновенно после включения установки по воздушным порам.

Таблица 4. Водонепроницаемость бетона конструкций Угличской ГЭС

Table 4. Concrete waterproofness of the Uglich HPP structures

Конструкция <i>Structure</i>	Марка по водонепроницаемости <i>Waterproofness grade</i>
Гидроагрегат 1, штрабной бетон омоноличивания шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 1, strained concrete for sealing hydraulic unit shaft</i>	не обладал маркой по водонепроницаемости <i>did not have a waterproof brand</i>
Гидроагрегат 1, основной бетон шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 1, the main concrete of the hydroelectric unit shaft</i>	W2
Гидроагрегат 1, бетон внутренних конструкций спиральной камеры <i>Hydroelectric unit 1, concrete of the inner structures of the spiral chamber</i>	W2

Выводы

1. Определены причины наблюдаемых процессов водопроявления вокруг шахт турбин гидроагрегатов Рыбинской и Угличской ГЭС:

– образование конденсата в холодное время года вследствие отсутствия систем поддержания температурно-влажностного режима зданий;

– для Рыбинской ГЭС – сезонное раскрытие строительных швов и трещин бетонных конструкций потолка спиральной камеры;

– для Угличской ГЭС – фильтрация через штрабной бетон омоноличивания металлических облицовок шахт турбин и ниш сервоприводов.

2. Выявлено, что источник водопроявления (единный для обеих станций) также связан со склонностью цементного камня на пуццолановом портландцементе и цементного камня, полученного при высоком соотношении В/Ц, к значительным деформациям набухания-усадки при изменении влажностного режима. Вместе с тем, к примеру, при неработающем

гидроагрегате с осушенным проточным трактом возможно повышенное поступление воды через раскрывшиеся в результате усадки при высыхании межблочные швы и через пространство между бетоном омоноличивания и металлическими облицовками.

3. Отмечается, что несмотря на длительный срок эксплуатации, дренажные системы (рис. 1б, 2б) в перекрытиях и Рыбинской, и Угличской ГЭС в целом выполняют свое функциональное назначение. При этом возможно улучшение их работы посредством инъектирования примыканий к конструкциям стакана спиральной камеры низковязкими эластичными полиуретановыми смолами.

4. Рекомендуется при возникновении водопроявления вблизи конструкций шахт-турбин создание штукатурного слоя с использованием цементных шпатлевок типа Бирсс С-З и Bergauf Finish Zement. Для окраски следует использовать паропроницаемые силикатные краски: например, Рунит или Rezolux Silicate.

Список использованных источников

1. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Lyapin O.B., Nefedov A.V. Research of concrete and reinforced-concrete power-generating structures // Hydrotechnical Construction Consultants bureau. New York: August-September, 1999. February. Vol. 33, № 8-9. Pp. 459-466.

2. Рубин О.Д. Инструментальные и расчетные исследования низовых подпорных стен Загорской ГАЭС

References

1. Lisichkin S.E., O.D. Rubin, O.B. Lyapin, A.V. Nefedov "Research of concrete and reinforced-concrete power-generating structures" // Hydrotechnical Construction Consultants bureau. Vol. 33., No. 8-9, New York, August-September, 1999, February, 2000 pp. 459-466.

2. Rubin O.D., Instrumental and computational studies of the bottom retaining walls of the Zagorskaya PSPP

/ О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, И.В. Баклыков, А.С. Антонов, К.Е. Фролов // Природообустройство. 2019. № 2. С. 80-88.

3. Беллендир Е.Н. Проведение обследований фундаментной плиты водоприемника в проточной части водоводов № 5 и № 6 эксплуатируемой Загорской ГАЭС / Е.Н. Беллендир, О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, А.С. Антонов, А.Н. Катунин // Природообустройство. 2019. № 4. С. 61-68.

4. Рубин О.Д. Особенности состояния бетонных сооружений Богучанской ГЭС / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, А.Н. Волынчиков, А.Л. Воробьев, В.П. Гребенщиков // Гидротехническое строительство. 2007. № 11. С. 26-30.

5. Рубин О.Д. Исследования бетонных и железобетонных энергетических сооружений / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, О.Б. Ляпин, А.В. Нефедов // Гидротехническое строительство. 1999. № 8/9. С. 22-28.

6. Рубин О.Д. Осуществление контроля за безопасностью шлюзовых и подпорных сооружений путем оценки их фактического состояния на основе расчетных и натурных исследований / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, Ю.А. Ильин // 5-й Международный конгресс ЭКВАТЭК-2002. Вода: экология и технология: сборник материалов конгресса / Под общ. ред. проф. Л.И. Эльпьера. М., 2002. 948 с.

7. Технический отчет по работе «Научно-технический анализ и обобщение проектно-строительного опыта Волгостроя». Л.: ВНИИГ, 1952.

8. Штарк И., Вихт Б. Долговечность бетона. Киев: Обратна, 2004. 294 с.

9. Бутт Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. М.: Высшая школа, 1980. 472 с.

10. Технический отчет «Проведение изыскательских работ по определению состояния бетона конструкций спиральной камеры агрегата № 6 Рыбинской ГЭС и разработка рекомендаций по его ремонту». Л.: ВНИИГ, 1972.

11. Евко А.В. Опыт гидрохимических исследований бетонных сооружений Верхневолжских ГЭС / А.В. Евко П.Ф., Кузьмищев П.А. Михалевич. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1958. 85 с.

Об авторах

Олег Дмитриевич Рубин, д-р техн. наук, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; директор по научной деятельности²; SPIN-код: 2720-6627, AuthorID:423001, Scopus 7004427140, ResearcherID AAE-6688-2022, ORCID0000-0002-0630-3251; rubinOD@mgsu.ru

Юрий Алексеевич Ильин, канд. техн. наук, заместитель директора филиала; yu.ilin@hydroproject.ru

Александр Леонидович Шевкин, инженер, начальник отдела; a.shevkin@hydroproject.ru

Ирина Владимировна Евдокимова, инженер, главный специалист; evdokimova@hydroproject.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Ханов Н.В., Черных О.Н., Шукин С.Н., Жукова Т.Ю., Алексеев Д.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

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

Вклад авторов / Contribution of authors

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 06.08.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 21.10.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 25.10.2024

/ Lisichkin S.E., Baklykov I.V., Antonov A.S., Frolov K.E. // Prirodoobustroystvo. 2019. No. 2, P. 80-88.

3. Bellendir E.N. Conducting surveys of the foundation plate of the water intake in the flowing part of the pipelines No. 5 and No. 6 of the operated Zagorskaya PSPP / Rubin O.D., Lisichkin S.E., Antonov A.S., Katunin A.N. // Prirodoobustroystvo. 2019. No. 4. P. 61-68.

4. Rubin O.D. Features of the state of concrete structures of the Boguchanskaya HPP / Lisichkin S.E., Volynchikov A.N., Vorobyov A.L., Grebenshchikov V.P. // Hydrotechnical construction. 2007. No. 11, pp. 26-30.

5. Rubin O.D. Research of Concrete and Reinforced Concrete Power Structures / Lisichkin S.E., Lyapin O.B., Nefedov A.V. // Hydrotechnical Construction. 1999. № 8/9, P. 22-28.

6. Rubin O.D. Control over the Safety of the Sluice and Retaining Structures by Evaluating Their Actual State on the Basis of the Calculation and Field Studies / Lisichkin S.E., Ilyin Yu.A. // 5th International Congress ECWATEC – 2002 Water: Ecology and Technology. Proceedings of the Congress. Proceedings of the Congress // under the general editorship of Prof. L.I. Elpierre. L.I. Elpierre, Moscow, 2002, 948 p.

7. Technical report on the work “Scientific and technical analysis and generalization of the design and construction experience of “Vologostroy”. L.: VNIIG, 1952.

8. Stark I, Viht B. Durability of concrete. Kiev: Reverse, 2004. 294 p

9. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binding materials. Moscow: Higher School, 1980. 472 p.

10. Technical report “Conducting survey work to determine the condition of concrete structures of the spiral chamber of unit No. 6 of the Rybinsk HPP and developing recommendations for its repair”, L.; VNIIG, 1972.

11. Evko A.V., Kuzmishchev P.F., Mikhalevich P.A. Experience of hydrochemical studies of concrete structures of Verkhnevolzhsky HPPs. M. – L.: Gosenergoizdat, 1958. 85 p.

About the authors

Oleg D. Rubin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; Director of Scientific Activity²; SPIN code: 2720-6627, AuthorID:423001, Scopus 7004427140, ResearcherID AAE-6688-2022, ORCID0000-0002-0630-3251; rubinOD@mgsu.ru

Ilyin Yu. Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Deputy Branch directors yu.ilin@hydroproject.ru

Alexander L. Shevkin, Engineer, Head of Department a.shevkin@hydroproject.ru

Irina V. Evdokimova, Engineer, Chief Specialist; evdokimova@hydroproject.ru

Khanov N.V., Chernykh O.N., Shchukin S.N., Zhukova T.Y., Alekseev D.A., carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Khanov N.V., Chernykh O.N., Shchukin S.N., Zhukova T.Y., Alekseev D.A. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-73-80>

УДК 626.823.54: 532.533



ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНОГО ОФОРМЛЕНИЯ НИЖНЕГО БЬЕФА МАЛОПРОЛЕТНОГО ВОДОПРОПУСКНОГО СООРУЖЕНИЯ

О.Н. Черных^{1✉}, А.В. Бурлаченко², Я.Ю. Бурлаченко¹

¹ 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

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64, Россия

Аннотация. На примере Курского гидроузла комплексного назначения в статье приведены предложения по обеспечению безаварийной и надежной работы водосбросных малопролетных сооружений, характерных для мелиоративных водоемов агропромышленного комплекса России. Рассмотрены результаты лабораторного проектирования устройств нижнего бьефа на выходном участке открытого трехпролетного водосброса. Цель исследований заключалась в отыскании технических решений оптимальных схем системы гашения энергии, предотвращающих либо уменьшающих сбойность течения ввиду несимметричных сбросов воды при реновации водопропускного сооружения. В результате исследований установлен вариант расположения растекателей, обеспечивающий благоприятное растекание потока при всех открытиях пролетов водосброса и безопасное сопряжение с нижним бьефом без образования сбоя потока по сравнению с проектной и существующей конструктивными схемами водобойного участка. За растекателями в зоне максимума дефицита давления для оптимизации параметров плит крепления рекомендовано устроить специальные дренажные колодцы.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-29-00928, <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>

Ключевые слова: малопролетный водосброс, крепление нижнего бьефа, система гасителей и растекателей потока, пульсация и дефицит давления

Формат цитирования: Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. Оптимизация конструктивного оформления нижнего бьефа малопролетного водопропускного сооружения // Природообустройство. 2025. № 1. С. 73-80. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-73-80>

Scientific article

OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF THE DOWNSTREAM OF A LOW-SPAN CULVERT STRUCTURE

O.N. Chernykh^{1✉}, A.V. Burlachenko², Ya.Yu. Burlachenko¹

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskayast., 49, Russia

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64, Russia

Abstract. On the example of the Kursk hydraulic unit of a complex purpose, proposals are given to ensure the accident-free and reliable operation of spillway low-span structures typical for reclamation reservoirs of the agro-industrial complex of Russia. The results of laboratory design of downstream devices at the outlet section of an open three-span spillway are considered. The purpose of the research is to find technical solutions for optimal schemes of the energy damping system that prevent or reduce flow failure due to asymmetrical water discharges during the renovation of the culvert. As a result of the research, a variant of the spreading arrangement was established, which provides a favorable flow spreading at all openings of the spillway spans and safe connection with the downstream without the formation of a flow failure in comparison with the design and existing structural schemes of the culvert section. Behind the spreaders in the zone of maximum pressure deficit, it is recommended to arrange special drainage wells to optimize the parameters of the fastening plates.

The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-00928, <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>

Keywords: low-span spillway, downstream support, flow damper and spreader system, pressure pulsation and deficit

Format of citation: Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. Optimization of the design of the downstream of a low-span culvert structure // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1 P. 73-80. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-73-80>

Введение. Пропуск максимальных расходов воды через гидроузлы является одним из основных факторов, определяющих безопасность и надежность как водопропускных гидротехнических сооружений, так и напорного фронта гидроузлов. Устройства нижнего бьефа за водосбросом должны не только создавать благоприятные режимы сопряжения, но и быть достаточно устойчивыми и прочными при воздействии на них знакопеременных нагрузок от потока, льда, кавитации и наносов [1, 2]. Треть всех зарегистрированных аварийных ситуаций и инцидентов на гидроузлах комплексного назначения связана с различными нарушениями и отказами на водосбросных сооружениях [3]. К факторам риска, помимо стихийных, можно отнести и такие антропогенные ошибки, как недостаточность полноты гидравлических экспериментальных исследований или неучет их рекомендаций для сооружений высокого класса ответственности [4-6]. Например, при проектировании и расчетном обосновании малопролетных водосбросных сооружений ввиду невысокого их класса опасности и отсутствия приемлемых рекомендаций в основу конструирования и расчетов устройств нижнего бьефа ошибочно положены те же принципы, что и для многопролетных водосливных плотин. Анализ опыта эксплуатации таких сооружений показал, что они работают как при симметричном, так и при несимметричном режиме пропуска расходов. В нижних их бьефах весьма часто наблюдается движение потока со сбойным течением, приводящее в отводящем русле к размывам и деформациям береговых зон.

Цель исследований. Поиск технических решений оптимальных схем системы гашения энергии, предотвращающих или уменьшающих сбойность течения ввиду несимметричных сбросов воды при реновации водопропускного сооружения.

Материалы и методы исследований. С такой проблемой столкнулись гидростроители при реновации Курского гидроузла – самого значимого водного объекта в регионе. Строительство водохранилища на р. Тускарь с гидротехническими сооружениями было начато еще в 1977 г. По проекту предусматривалось его наполнение до отметки 165,5 м. Распад СССР, сложная экономическая ситуация в стране, ограниченность средств не позволили реализовать проект в полном объеме. С 1995 г. финансирование строительства было прекращено, стройка заморожена.

Для решения проблем водоснабжения Курского региона, сокращения дефицита технической и питьевой воды, увеличения в меженный период водности главной реки Сейм и ее правого притока р. Тускарь, протекающего через г. Курск, а также для сокращения затопления части заселенной территории Курска и Курского района весенними паводками правительством Курской области в 2005 г. было принято решение возобновить строительство водохранилища. В 2010 г. объект был передан из федеральной собственности в областную. В декабре 2013 г. пусковой комплекс «Курского моря» с возможностью наполнения до отметки 162,0 м, средней глубиной примерно 3,3 м, объемом воды 17,7 млн м³, площадью водной поверхности 950 га был введен в эксплуатацию. Весной 2015 г. водохранилище впервые было заполнено до отметки 162,0 м. При таком наполнении более половины акватории составили мелководья (с глубиной воды до 1,5...2,0 м), которые зарастают водной растительностью (рис. 1), а в теплое время года наблюдается интенсивное цветение сине-зеленых водорослей. Через 5 лет планировалось поднять уровень до отметки 165,5 м.

С 2014 г. этот гидроузел находится в оперативном надзоре ОКУ «Управление по эксплуатации гидротехнических сооружений Курской области», подведомственного департаменту экологической безопасности и природопользования. Земляная намывная плотина состоит из левобережной (высота 12 м, ширина гребня 10 м, заложение откосов $m_h = 3,0$, $m_i = 3,5$) и правобережной частей. Тело намыта из песков средней крупности, полученных при дноуглублении ложа водохранилища. Отметка гребня плотины – 168,9 м. Движение по гребню является несанкционированным. С плотины 10 лет назад незаконно были устроены съезды к верхнему и нижнему бьефу, а дренажные каналы, сделанные при строительстве в соответствии с проектом, замусорены, заросли или засыпаны населением. Наслонный дренаж закольцован и разрушен. Это привело к сильному заболачиванию приплотинных участков.

Сейчас разрабатывается проектная документация для пуска второй очереди водохранилища с повышением уровня на 3,5 м (до отметки 166 м), роста площади акватории более чем в 4 раза (до 37 тыс. км²), запаса воды – с 21,1 до 100 млн м³. При этом предстоит расселить более 4,5 тыс. жителей 12 населенных пунктов

Курского и Золотухинского районов, подготовить зону затопления водохранилища, провести мероприятия по очистке и освоению прибрежной территории, создать инженерную защиту прилегающих объектов.

Водосброс с расчетным расходом $Q = 1020 \text{ м}^3/\text{с}$ был разработан в виде трехпролетной водосливной плотины с порогом практического профиля, сопрягающейся с левобережной и правобережной частями грунтовой плотины (рис. 2). Ширина пролетов в свету – $b = 12 \text{ м}$, удельный расход по плотине – $28,4 \text{ м}^2/\text{с}$. В нижнем бьефе водосброса был запроектирован бетонный водобойный колодец глубиной $1,3 \text{ м}$ и длиной $24,7 \text{ м}$, сопрягающийся с короткой рисбермой длиной $20,5 \text{ м}$. В конце рисбермы предусмотрен ковш, заполненный каменной наброской. Колодец и рисберма имеют расширение в плане под углом 7° к оси потока. В конце водобойного колодца по рекомендации первого этапа модельных исследований при строительстве была установлена прорезная стенка (рис. 2а) [1, 6]. В основании

водосброса залегают аллювиальные отложения, представленные разнородными песками.

Речь о модернизации всего гидроузла ведется уже в течение более 10 последних лет. От водосброса ранее был сделан отводящий канал длиной 1100 м , который идет вдоль автодороги Курск-Поныри и впадает в быстро мелеющую р. Тускар. За 30 лет эксплуатации он ни разу не был расчищен, зарос кустарниками и деревьями, обмелел и был занесен илом. На сегодня канал находится в стадии незавершенного строительства и очистки. Планируется за 338 млн руб. восстановить его пропускную способность к концу 2025 г. Ремонт канала позволит также повысить безопасность эксплуатации грунтовой плотины и восстановить нормальный режим работы открытой дренажной системы. В ноябре 2021 г. были завершены работы по техническому обслуживанию и текущему ремонту затворов водосброса. В настоящее время частично устаревший проект реконструкции сооружений гидроузла для завершения второй очереди ввода Курского водохранилища к 2027 г.



Рис. 1. Типичное состояние прибрежных зон Курского водохранилища на р. Тускар, июнь 2024 г.

(фото пресс-службы правительства Курской области)

Fig. 1. Typical state of the coastal zones of the Kursk reservoir on the Tuskar River, June 2024 (photo: press service of the government of the Kursk region)



а



б

Рис. 2. Вид выходного (а) и входного (б) участков водосбросной трехпролетной плотины Курского гидроузла, июнь 2024 г.

Fig. 2. View of the outlet (a) and inlet (b) sections of the three-span spillway dam of the Kursk hydraulic unit, June 2024

реанимируется. В соответствии с планами Росводресурсов в рамках нацпроекта «Экологическое благополучие», стартовавшего 1 января 2025 г., планируется выделить на это 9,5 млрд руб. (сюда входят также углубление водохранилища, очистка берегов и расчистка р. Тускарь).

Гидравлические исследования водосбросного сооружения проводились на пространственной модели, выполненной в масштабе 1:45, который был выбран из условий соблюдения основных закономерностей подобия при преобладающем действии сил тяжести и обеспечения автомодельности по числу Рейнольдса, изменяющемуся в опытах от 20000 до 100000. При всех режимах пропуска расходов через водосброс фиксировалось сопряжение бьефов в плане. Уровни воды, глубины и отметки определялись шпигтценмасштабами [7]. При исследованиях в зоне нижнего бьефа измерялись осредненные и пульсационные характеристики потока: скорости – микровертушками Х-6 и тензометрическими датчиками; давление – пьезометрами и датчиками давления индуктивного типа ДДМ-6 [8, 9]. Определялась пропускная способность сооружения треугольным мерным водосливом, и регистрировались гидродинамические нагрузки на плиты крепления площадочной плитой-датчиком консольного типа. Исследования выполнялись в широком диапазоне изменения возможных

схем маневрирования затворами во всех трех пролетах водосброса.

Было установлено, что при пропуске расчетного расхода через три пролета водобойный колодец не обеспечивает приемлемые условия сопряжения бьефов и равномерного растекания потока на рисберме. Наблюдается концентрация потока на оси водосброса непосредственно за коловодом: ковш не оказывает существенного влияния на его растекание (рис. 3). Скорости течения были распределены неравномерно: так, на расстоянии 90 м от конца колодца средние скорости у левого берега в 3 раза меньше, чем у правого. Придонные скорости в створе за ковшом в 4 раза превышали допустимые на размыв.

Неравномерное распределение скоростей наблюдалось при всех вариантах маневрирования затворами на рисберме и в отводящем канале. Уже на первом этапе исследований было ясно, что для улучшения гидравлических условий работы нижнего бьефа необходимо или снабдить водобой растекателями [10], пашечными гасителями [5], дополнительной водобойной стенкой, или удлинить бычки на всю длину водобоя. Примерами таких конструкций являются водосбросы Итаицу (Бразилия), Каруюна (Иран), Тарбела (Пакистан), Шамхирский гидроузел (Азербайджан), Подольский и Крапивинский гидроузлы (Россия) [5, 11, 12]. При строительстве

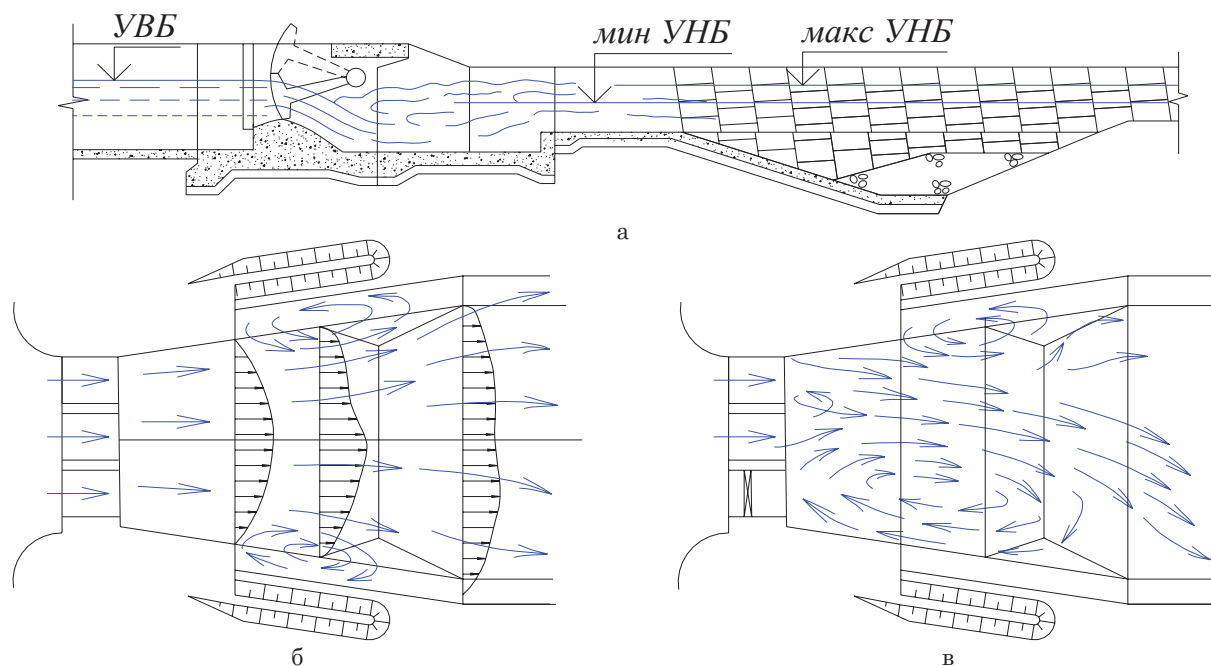


Рис. 3. Результаты исследования проектного варианта водосброса Курского гидроузла: а – разрез по оси водосброса; б – схема течения в нижнем бьефе при всех открытых пролетах, $Q = 1020 \text{ м}^3/\text{с}$; в – то же при работе двух открытых затворов, $Q = 680 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 3. Results of the study of the design variant of the Kursk hydraulic unit spillway:

a – section along the axis of the spillway; b – downstream flow scheme for all open spans, $Q = 1020 \text{ m}^3/\text{s}$; c – the same with the operation of two open gates, $Q = 680 \text{ m}^3/\text{s}$

Курского гидроузла рекомендации были учтены лишь частично: был установлен только второй ряд гасителей в конце водобоя (рис. 2а).

Результаты и их обсуждение. Одна из основных причин неудовлетворительной работы проектного варианта заключается в том, что вместо ожидавшегося сопряжения несовершенным гидравлическим прыжком на выходном участке водосброса происходит сопряжение несовершенным прыжком типа прыжка-волны. Такой прыжок обычно возникает при небольших числах Фруда (менее 9) [1], отличается высоким гребнем первой волны и медленно затухающей по длине потока цепью малых волн. При этом за обратными стенками в конце водобоя возникают водоворотные зоны, имеющие непосредственное сообщение с зоной гидравлического прыжка на водобое. Эти водовороты способствуют сжатию транзитного потока в плане и боковому натеканию на него нетранзитных масс жидкости. Особенно отчетливо сбойное течение проявлялось при работе водосброса по схеме несимметричного сброса одним или двумя пролетами (рис. 3с). Анализ гидравлических условий работы нижнего бьефа водосброса при всех расходах и схемах маневрирования показал, что водобойный колодец, как и рисберма, не обеспечивает требуемые условия сопряжения бьефов и нуждается в существенной конструктивной доработке. Было отмечено, что боковые крепления дамбы заметно не влияют на сопряжение бьефов, и растекание потока при пропуске расходов меньше расчетного. Они вступают в работу лишь при пропуске расходов обеспеченностью 0,1% и ниже. Основные недостатки проектного варианта для исследуемого водосброса были вызваны прежде всего тем, что при разработке его конструкции проектировщики использовали элементы нижнего бьефа, хорошо зарекомендовавшие себя в практике проектирования и эксплуатации многопролетных водосливных плотин.

Для ликвидации в пределах крепления прыжка-волны был рассмотрен ряд вариантов устройства в конце водобойного колодца стенки с наклонной зубчатой или сплошной лобовой гранью. Эти исследования позволили установить, что наиболее эффективно работает стенка с зубчатой наклонной лобовой гранью (рис. 4). В дополнение к стенке подбирали системы гасителей и растекателей потоков, аналогичные использованным в конструкции водосброса Подольского и Шамхирского гидроузлов [1]. Кроме того, изучали следующие системы гасителей: комбинацию гасителей В.И. Кузьменкова; растекатели

с различными углами поворота, шашечные гасители и водобойную стенку (сплошную и зубчатую); растекатели, водобойный порог и стенку; растекатели, узкие водобойные порожки и стенку; растекатели, прорезную стенку и криволинейную в плане стенку за колодцем; и др. [2, 4-7].

Установлено, что угол поворота растекателей и расстояние между ними значительно влияют на условия растекания потока. Наиболее рациональной оказалась схема расположения растекателей, изображенная на рисунке 4. Установлено, что лучшие результаты показывают варианты с заложением верховой грани стенки около 2, высотой до $0,3h_z$, h_z – глубина в нижнем бьефе, располагающейся на выходе из колодца, при котором отсутствует явление разделения потока на две струи со значительными скоростями вдоль откосов отводящего участка. Полученные результаты полностью согласуются с данными Бюро мелиорации США [5, 13]. Однако приходится признать, что предлагаемые конструкции являются немного громоздкими для практического применения. Удлинение раструбной части колодца за водобойную стенку и некоторое увеличение центрального угла расширения подпорных стенок (хотя бы до 10°) улучшают условия растекания потока за креплением.

При открытии всех пролетов или одного среднего увеличиваются скорости течения в зоне левостороннего откоса отводящего канала, и возникает сбойное течение. В случае пропуска расчетного расхода водосброса наблюдались стоячие волны за стенкой на осевой части потока. Высота волн, распространяющихся до середины ковша, достигала 1 м, а длина – 10...15 м.

Возникновение волн усложнило условия работы плит рисбермы. Для ликвидации этого явления была уменьшена высота стенки в средней части колодца, где рекомендовано выполнить ее непрорезной. Анализ эпюр скоростей показал, что окончательная схема расположения растекателей (рис. 4) обеспечивает хорошее растекание потока при всех открытиях. Даже при увеличении коэффициента несимметрии входа струи на водобой до 0,459...0,591, то есть при открытии двух левых смежных или одного левого пролетов, в отводящем канале растекание потока было вполне благоприятным (рис. 5а, б).

Из графика изменения относительных скоростей на оси водосброса V_{max}/V , где V_{max} – максимальная придонная скорость, V – средняя скорость на оси (рис. 6), следует, что предлагаемый вариант конструкции водосброса практически при всех схемах маневрирования работает лучше, чем проектный.

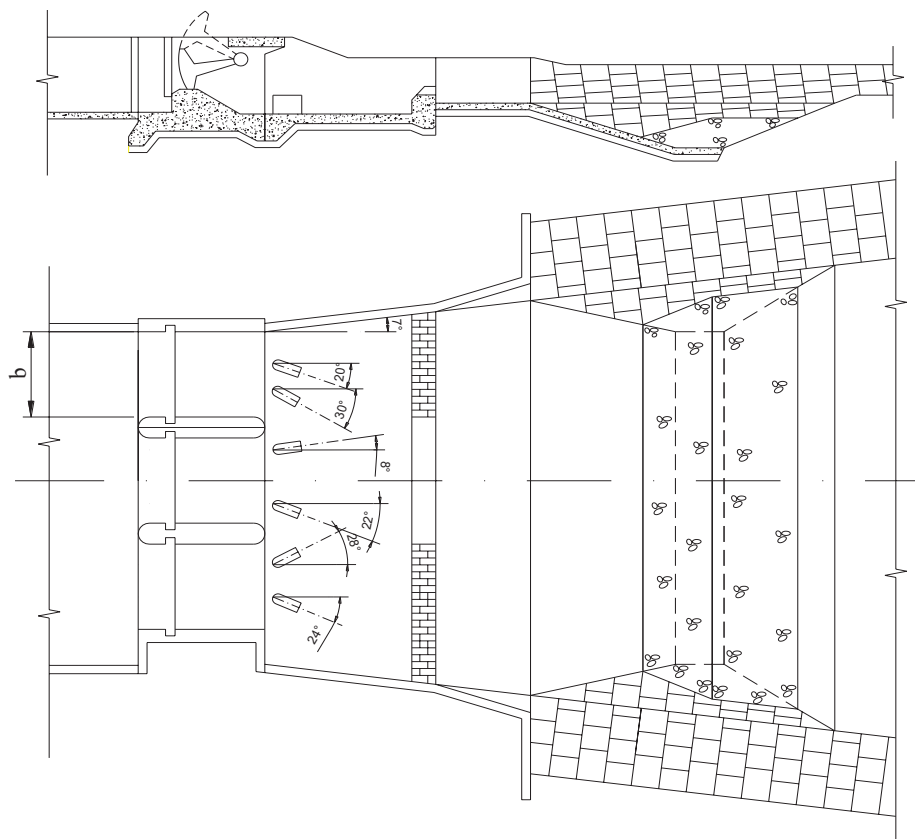


Рис. 4. Продольный разрез и план конструктивного оформления устройств нижнего бьефа Курского гидроузла, разработанного на основании результатов модельных гидравлических исследований

Fig. 4. Longitudinal section and plan of structural design of downstream devices of the Kursk hydraulic unit, developed on the basis of the results of model hydraulic studies

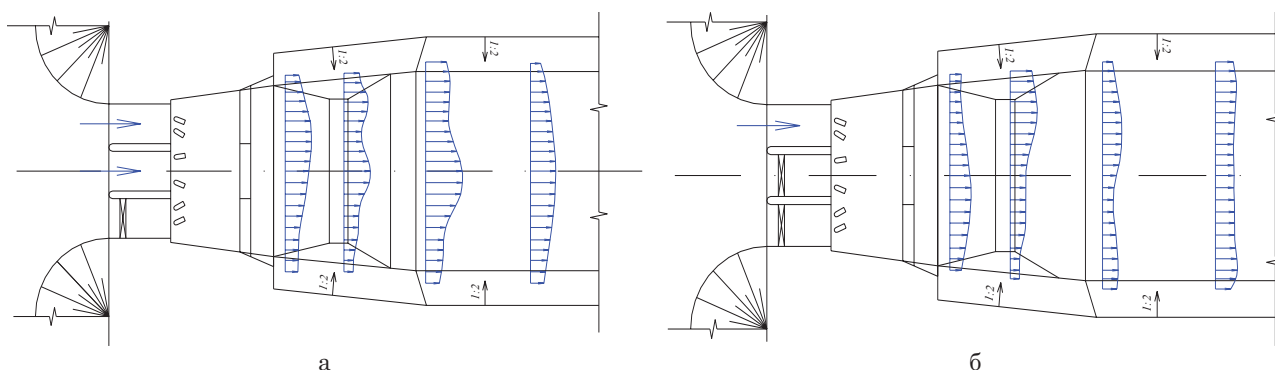


Рис. 5. Схемы плановых эпюр скоростей потока в отводящем канале при работе двух (а) и одного (б) пролетов водосброса с предлагаемой схемой гасящих устройств на водобое Курского гидроузла

Fig. 5. Schemes of planned diagrams of flow velocities in the diversion channel during the operation of two (a) and one (b) spans of the spillway with the proposed scheme of damping devices at the baffle of the Kursk hydraulic unit

Анализ результатов измерения гидродинамических нагрузок на плиты крепления позволил установить, что для повышения устойчивости плит водобоя и рисбермы и обеспечения под ними минимального фильтрационного давления необходимо сделать за растекателями дренажные колодцы в зоне максимума дефицита давления [9]. Для исключения

проникновения пульсаций давления через эти колодцы под плиты водобоя рекомендуется выполнять колодцы из пористого экобетона [4]. В существующем реконструируемом водосбросе растекатели и дренажные колодцы в настоящее время отсутствуют. Это в значительной мере и ограничивает дальнейшую эксплуатацию всего водосброса.

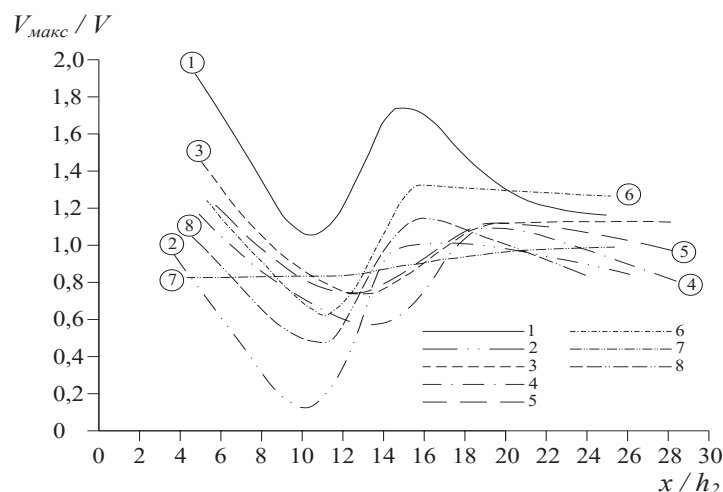


Рис. 6. Графики изменения относительных максимальных придонных скоростей V_{max}/V по оси водосброса при разных режимах его работы:

1, 2 – открыты все пролеты; 3 – открыт первый пролет; 4 – открыт второй пролет; 5 – открыт третий пролет; 6 – открыты два крайних пролета; 7 – открыты первый и второй пролеты; 8 – открыты второй и третий пролеты

Fig. 6. Graphs of changes in the relative maximum bottom velocities V_{max}/V along the axis of the spillway at different modes of its operation:

1 and 2 – all spans are open; 3 – the first span is open; 4 – the second span is open; 5 – the third span is open; 6 – two outermost spans are open; 7 – the first and second spans are open; 8 – the second and third spans are open

Таким образом, при проектировании креплений за малопролетными сооружениями следует учитывать, что отдельные конструктивные элементы крепления, хорошо зарекомендовавшие себя при работе многопролетных сооружений (например, расширяющиеся водобойные колодцы с простейшими типами гасящих устройств, ковши за рисбермой), в конкретном случае могут оказаться малоэффективными, а при сравнительно больших удельных расходах вообще неприемлемыми, особенно в тех случаях, когда при ремонте могут быть засыпаны полностью каменной наброской [14]. Для дальнейшего совершенствования конструкций устройств креплений открытых малопролетных сооружений, а также для разработки новых методов расчетного обоснования параметров гасящих устройств необходимо продолжить лабораторные и натурные исследования гидравлических и динамических условий работы их нижних бьефов.

Выводы

Восстановление Курского водохранилища будет способствовать повышению качества жизни населения, обеспечит г. Курск необходимым запасом воды и позволит защитить прилегающие

территории от затопления и подтопления в период половодья или чрезвычайной ситуации.

На основании лабораторных исследований установлено, что проектный вариант устройства выходного участка нижнего бьефа и существующая конструктивная схема гашения энергии за водосбросом Курского гидроузла не позволяют исключить сбойность потока в отводящем канале даже при работе водосбросного сооружения полным фронтом.

Экспериментально подобран и апробирован вариант установки дополнительных растекателей потока на водобое. Предложенный вариант оптимизации устройств нижнего бьефа поможет решить проблему повышения надежности работы водосброса и гидроузла при его реновации, связанной с необходимостью поднятия отметки уровня воды в водохранилище до проектной после нескольких десятилетий временной эксплуатации. Это позволит обеспечить снижение суммарной гидродинамической нагрузки на плиты крепления, равномерное распределение скоростей в конце укрепленного участка за водосбросом и минимизировать риск значительного перестроения отводящего русла водотока.

Список использованных источников

1. Розанов Н.П. Устройства нижнего бьефа водосбросов: Монография / Н.П. Розанов, Н.Т. Кавешников, В.И. Китов. Под ред. проф. Н.П. Розанова. М.: Колос, 1984. 269 с.
2. Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Saraeva M. (2020). Hydrodynamic loads on a water drain with

References

1. Rozanov N.P. et al. Spillway tailrace devices: monograph / N.P. Rozanov, N.T. Kaveshnikov, V.I. Kitov; Ed. by prof. N.P. Rozanov. Moscow: Kolos, 1984. 269 p.
2. Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Saraeva M. (2020) Hydrodynamic loads on a water drain with

cavitation quenchers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 883. Pp. 012011.

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

4. Burlachenko A.V., Burlachenko Y.Y., Brakeni A., Chernykh O.N. Ensure the stability of the water retention plates of hydraulic structure // Larhyss Journal. 2004. № 58. Pp. 73-87.

5. Волков В.И. Открытые береговые водосбросы: учебник / В.И. Волков, О.Н. Черных, А.Г. Журавлёва, И.С. Румянцев, В.И. Алтушин. М.: МГУП, 2012. 244 с.

6. Гидравлический расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие / Под ред. Д.Д. Лаппо. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.

7. Черных О.Н. Экспериментальные и аналитические исследования нагрузок на элементы крепления за водосбросами водных объектов АПК / О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко, Я.Ю. Бурлаченко // Природообустройство. 2023. № 4. С. 12-20.

8. Chernykh O.N., Komelkov L.V. Hydrodynamic loads and stability of the lower-pool apron of hydraulic structures // Hydrotechnical Construction. 1983. Vol. 17 (8). Pp. 410-416.

9. Burlachenko A.V., Chernykh O.N., Brakeni A. Operation evaluation of water discharge end sections in the conditions of narrow downthrow // Larhyss Journal. 2023. № 56. Pp. 25-38.

10. Водопропускные гидротехнические сооружения (водосбросные, водоспускные и водовыпускные). Правила проектирования. Свод правил. СП 290.1325800, п. 4.11. 2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074911>.

11. Черных О.Н. Обеспечение надежности крепления из плит за водопропускными сооружениями мелиоративных систем АПК // О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко, Я.Ю. Бурлаченко // Природообустройство. 2023. № 5. С. 41-46.

12. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселёв, А.Д. Алтшуль, Н.В. Данильченко и др. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 312 с.

13. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов: Монография. М.: Стройиздат, 1969. 464 с.

14. Алсадек Е.С. Крепления в нижнем бьефе шахтного водосброса гидроузла «16 Тишрин» // Природообустройство. 2024. № 3. С. 63-70.

Об авторах

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

Алёна Владимировна Бурлаченко, канд. техн. наук, доцент; WoS ResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID: 0000-0003-2617-9515, SPIN-код: 3155-2490; AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru

Ярослав Юрьевич Бурлаченко, соискатель; yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. выполнили теоретические и экспериментальные 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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 10.12.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 19.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 19.01.2025

cavitation quenchers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 883. P. 012011.

3. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Ensuring the safety of hydraulic structures of a melioration hydroelectric complex with an earth dam: Tutorial. M.: RGAU-MSHA, 2022. 172 p.

4. Burlachenko A.V., Burlachenko Y.Y., Brakeni A., Chernykh O.N. (2024). Ensure the stability of the water retention plates of hydraulic structure, Larhyss Journal, No 58, pp. 73-87.

5. Volkov V.I. et al. Open coastal spillways: Textbook / V.I. Volkov, O.N. Chernykh, A.G. Zhuravleva, I.S. Rumyantsev, V.I. Altunin. M.: MGUP, 2012. 244 p.

6. Hydraulic calculations of spillway hydraulic structures: Reference manual / Ed. D.D. Lappo. M.: Energoatomizdat, 1988. 624 p.

7. Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. Experimental and analytical studies of loads on fastening elements behind spillways of water bodies of the agro-industrial complex // Prirodoobustroystvo. 2023. No. 4. P. 12-20.

8. Chernykh O.N., Komelkov L.V. Hydrodynamic loads and stability of the lower-pool apron of hydraulic structures // Hydrotechnical Construction. 1983. Vol. 17 (8). Pp. 410-416.

9. Burlachenko A.V., Chernykh O.N., Brakeni A. Operation evaluation of water discharge end sections in the conditions of narrow downthrow // Larhyss Journal. 2023. No. 56. P. 25-38.

10. Culvert hydraulic structures (spillways, water outlets and water discharges). Design rules. Code of rules. SP 290.1325800, p. 4.11. 2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074911>.

11. Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. Ensuring the reliability of fastening from slabs behind culverts of melioration systems of the agro-industrial complex // Prirodoobustroystvo. 2023. No. 5. P. 41-46.

12. Handbook of hydraulic calculations / P.G. Kiselev, A.D. Altshul, N.V. Danilchenko et al. Moscow: EKOLIT, 2011. 312 p.

13. Chou V.T. Hydraulics of open channels: monograph. M.: Stroyizdat, 1969. 464 p.

14. Alsadek E.S. Fastenings in the lower pool of the mine spillway of the "16 Tishrin" hydroelectric complex // Prirodoobustroystvo. 2024. No. 3. P. 63-70.

About the authors

Olga N. Chernykh, CSc (Eng), associate professor WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-code: 7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Alena V. Burlachenko, CSc (Eng), associate professor: WoS ResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID: 0000-0003-2617-9515, SPIN-code: 3155-2490; AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru

Yaroslav Yu. Burlachenko, the applicant; yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru

Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. carried out theoretical and experimental 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/10.26897/1997-6011-2025-1-81-89>

УДК 532.5:532.533:627.844



ИНЖЕКЦИОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ РАСХОДА С ПЛОСКИМИ ДИФFUЗОРАМИ

В.Л. Снежко¹✉, А.А. Гайсин², М.С. Палиивец³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия

² Московский фонд реновации жилой застройки: 109012, г. Москва, ул. Ильинка, 13, Россия

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Инжекционные регуляторы расхода являются водопропускными сооружениями, устанавливаемыми на каналах оросительных систем. Отличительной особенностью этих гидроавтоматов является отсутствие подвижных элементов. Для проектирования сооружений и оценки возможности установки на канале инжекционного водовыпуска с конкретной формой исполнения проточной части служат расходные характеристики. Большинство инжекционных водовыпусков имеет сопло в конце транзитной части, необходимое для увеличения скорости потока, поступающего в нижний бьеф, то есть его инжектирующей способности. Концевой участок оборудуется внезапным расширением или диффузором. Материалом исследований стали данные физического моделирования работы регулятора с плоским диффузором при отсутствии сопла. В качестве методов численного моделирования определены положения границы раздела потоков в камере смешения. Построена расходная характеристика регулятора и подтверждена приемлемость существующих расчетных зависимостей для определения инжектирующего и инжектируемого расходов водовыпуска. Сравнение расходных характеристик показало, что при прочих равных условиях отсутствие сопла снижает как коэффициент инжекции, так и относительный напор регулятора. Впервые изучено образование гидравлического прыжка на крышке плоского диффузора в промежуточном бьефе. Впервые приведены расчетные зависимости, позволяющие связать сопряженные глубины в промежуточном бьефе с точностью регулирования, а также даны рекомендации по изменению геометрических параметров промежуточного бьефа из условий точной подачи инжектируемого расхода.

Ключевые слова: гидравлика, гидротехнические сооружения, инжекция, регуляторы расхода, гидравлический прыжок

Формат цитирования: Снежко В.Л., Гайсин А.А., Палиивец М.С. Инжекционные регуляторы расхода с плоскими диффузорами // Природообустройство. 2025. № 1. С. 81-89. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-81-89>

Research article

INJECTION FLOW REGULATORS WITH FLAT DIFFUSERS

V.L. Snezhko¹✉, A.A. Gaisin², M.S. Paliivets³

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering: 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia

² Moscow Housing Renovation Fund: 13 Ilyinka St., Moscow, 109012, Russia

³ Russian State Agrarian University Moscow State Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127434, Russia

Abstract. Injection flow controllers are culverts installed on the canals of irrigation systems. A distinctive feature of these hydraulic automatics is the absence of movable elements. For the design of structures and assessment of the possibility of installation on the channel of the injection outlet with a specific form of the flow part, flow characteristics are used. Most injection outlets have a nozzle at the end of the transit portion necessary to increase the velocity of the flow entering the downstream pool, i.e. its injection capacity. The end section is equipped with a sudden expansion or diffuser. The material of the study was the data of physical modeling of the operation of the regulator with a flat diffuser in the absence of a nozzle. The positions of the interface between the streams in the mixing chamber were determined using numerical modeling methods. The flow characteristic of the regulator was built and the acceptability of the existing design relationships for determining the injected and injected flow rates of the water outlet was confirmed. Comparison of flow characteristics showed that, all other things being equal, the absence of a nozzle reduces both the injection coefficient and the relative head of the regulator. For the first time, the formation of a hydraulic jump on the cover of a flat diffuser in the intermediate pool was studied. For the first time, design relationships are given that make it possible to associate the conjugate depths in the intermediate

pool with the accuracy of control, as well as recommendations are given for changing the geometric parameters of the intermediate pool based on the conditions for accurate injection of the injected flow rate.

Keywords: hydraulics, hydraulic structures, injection, flow regulators, hydraulic jump

Format of citation: Snezhko V.L., Gaisin A.A., Paliivets M.S. Injection flow regulators with flat diffusers // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 81-89. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-81-89>

Введение. По данным службы Государственной статистики, ежегодно на нужды орошения и сельскохозяйственного водоснабжения используется порядка 6,5 млрд м³ свежей воды, что составляет 13% от общего объема водозабора. Внедрение водо- и энергосберегающих технологий в орошении является актуальной задачей развития мелиоративного комплекса Российской Федерации. Одним из направлений снижения потерь воды в оросительных каналах и непроизводительных сбросов является внедрение средств гидравлической автоматизации, не использующих электрическую энергию для осуществления процесса управления. В работе [1] в качестве основных конструктивных недостатков автоматических регуляторов расхода указана низкая надежность подвижных частей сооружений, повреждения которых приводят к возникновению постепенных отказов.

Одними из автоматических регуляторов расхода, в проточной части которых отсутствуют любые подвижные элементы, являются инжекционные водовыпуски. Инжекционные водовыпуски-регуляторы используются на оросительных каналах для дискретного регулирования расхода в случае снижения водопотребления в нижнем бьефе, которое может быть вызвано, в том числе, внезапной остановкой дождевальных машин. Расходная характеристика регуляторов, имеющих различную форму исполнения проточной части, позволяет оценить возможность использования сооружения в условиях конкретного канала.

Расходная характеристика инжекционного регулятора без диффузорного выходного участка приведена в исследованиях [2]. Регулятор имел сопло и камеру смешения постоянной площади. При построении расходной характеристики в расчет включались полные гидравлические потери в пределах проточного тракта регулятора: местные потери и потери на трение по длине. Аналогичные исследования были выполнены в работе [3] для инжекционного регулятора с соплом и пирамидальным диффузором, расположенным за камерой смешения. Диффузор имел угол горизонтального расширения 10° и угол расширения в вертикальной плоскости 5° при степени расширения, равной двум.

Результаты исследований инжекционных регуляторов без сопла с пирамидальным

диффузором приведены в работе [4]. Конструкция имела камеру смешения длиной $3d$ и диффузор с расширением в трех плоскостях (угол расширения в горизонтальной плоскости составлял 20°, в вертикальной плоскости – 5°). Степень расширения диффузора равна 3, сбойность течения предотвращали укороченные разделительные стенки. Полученные теоретические зависимости не включали в себя сопротивление на трение по длине. Кроме того, при вычислении напоров между верхним, нижним и промежуточным бьефами использовали определенные допущения при учете потерь напора на местных сопротивлениях.

Один из методов расчета струйных насосов, основанный на теории смешения потоков в тройниках, был предложен П.Н. Каменевым. Этот метод был использован для расчетного обоснования проточной части гидродинамических регуляторов расхода, изученных в работе [5]. Проточная часть регуляторов включала в себя диафрагму и пирамидальный диффузор.

Анализ картины течения потоков в пределах проточного тракта позволил сделать вывод о том, что в основе работы сооружения также лежит эффект инжекции. Для гидравлического расчета автор рассматривал узел слияния потоков как вытяжной тройник. Применительно к особенностям конструкции регулятора это являлось определенным допущением и требовало дальнейшего уточнения местных сопротивлений с учетом отсутствия участка стабилизации течения за местом слияния.

Внесение сопла в проточную часть инжекционных регуляторов способствует увеличению скоростей инжектирующего потока, но одновременно делает более жесткими требования, предъявляемые к строительству и последующей эксплуатации сооружений. При строительстве необходима тщательная затирка бетонных поверхностей вблизи камеры слияния, при эксплуатации необходимо предотвращение попадания в транзитную часть водовыпуска сора, который может попасть в узкую часть сопла, и т.д. Тем не менее эффект инжекции может быть использован в регуляторах, выходная часть которых выполнена в форме диффузора, но сопло в конце трубчатой части отсутствует. Трубчатый водовыпуск-регулятор с плоским диффузором, размещенный в канале, приведен на рисунке 1.

Работа сооружения может быть рассмотрена как процесс инъекции, возникающий при снижении водопотребления в нижнем бьефе. Рост уровня нижнего бьефа формирует поток, переливающийся через водослив 5 и поступающий в промежуточный бьеф 7. При этом расход, проходящий по трубе 2, инжектирует поток из промежуточного бьефа через отверстие 3, и суммарный расход поступает в диффузор 6, имеющий две разделительные стенки для выравнивания скоростного поля, препятствующие возникновению сбойных течений, так как степень расширения диффузора равна 4 при угле расширения 30° . На крышке диффузора 7 после водослива может возникать гидравлический прыжок, так как она имеет нулевой уклон, то есть диффузор является плоским, расширяющимся только в горизонтальной плоскости. Для регулирования расхода с заданной точностью необходимо, чтобы между нижним бьефом и выходной частью регулятора циркулировал расход, соответствующий излишкам водоподачи.

Существующие теоретические методы расчета (рис. 1) регулятора были основаны на рассмотрении потерь, возникающих в зоне слияния потоков, как потеря в вытяжных тройниках. При достаточной универсальности решений эти методы не позволяли в явном виде получить зависимости для каждого из расходов и связать уровень промежуточного бьефа с точностью регулирования, дать рекомендации по требуемым конструктивным параметрам промежуточного бьефа. При рассмотрении течения в регуляторе как инъекционного указанные проблемы могут быть решены.

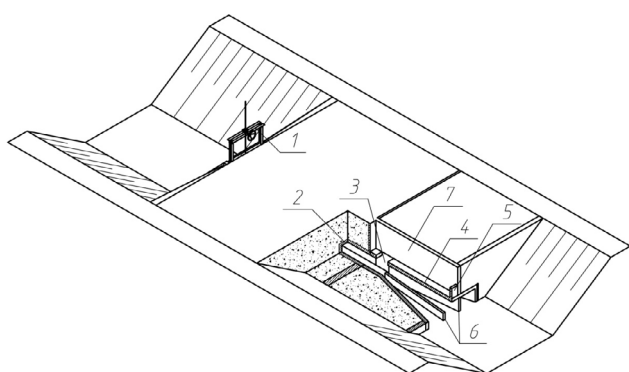


Рис. 1. Водовыпуск-регулятор с плоским диффузором:

- 1 – затвор; 2 – трубчатая часть; 3 – отверстие;
- 4 – крышка диффузора; 5 – водослив;
- 6 – диффузор с разделительными стенками;
- 7 – промежуточный бьеф

Fig. 1. Water outlet-regulator with flat diffuser:

- 1 – gate valve; 2 – tubular part;
- 3 – hole; 4 – diffuser cover; 5 – weir;
- 6 – diffuser with separating walls; 7 – intermediate pool

Исследований, посвященных гидравлической картине течения в промежуточном бьефе инъекционных регуляторов, в настоящее время нет.

Цель исследований: получение расходной характеристики инъекционного регулятора расхода с плоским диффузором без сопла, учитывающей гидравлические потери в пределах проточного тракта, верификация теоретических зависимостей данными физического и численного моделирования, а также разработка методики гидравлического расчета течения в промежуточном бьефе регулятора.

Материалы и методы исследований. Материалом исследований стали данные гидравлических испытаний физической модели инъекционного регулятора с плоским диффузором (рис. 2).

Модель сооружения была выполнена из органического стекла в линейном масштабе 1:10 и испытана в зеркальном гидравлическом лотке кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Лоток имел общую длину 15 м и был разделен напорной стенкой 3 на бьефы, между которыми расположена модель водовыпуска. При рассмотрении регулятора как своеобразного струйного насоса, расположенного между верхним и нижним бьефами, можно выделить следующие особенности модели: длина трубчатой части для подачи инжектирующего потока – $5.3d$; длина камеры смешения (инъекционной камеры) – d ; длина диффузора – $5.5d$; длина промежуточного бьефа, из которого поступал инжектируемый поток, – $6.8d$; максимальная высота промежуточного бьефа была равна высоте водосливного порога над крышкой диффузора и составляла d .

Эксперимент включал в себя 90 опытов, выполненных в условиях повторяемости. Числа Рейнольдса $1,01 \cdot 10^5 \div 1,45 \cdot 10^5$ обеспечивали проведение эксперимента в зоне автомодельности. Масштаб моделирования распространялся на шероховатость материала стенок модели. Точность экспериментальных данных была оценена суммарными относительными ошибками как для непосредственно, так и для косвенно измеряемых величин: глубина – 3,1%; расход – 2,3...4%; давление – 1,8%; скорость потока со свободной поверхностью – 3,4%; коэффициенты местных гидравлических сопротивлений – 2,5%.

К данным физического эксперимента применены методы гибридного моделирования, включающие в себя численное моделирование течения в пределах проточного тракта инъекционного регулятора в пакете STAR-СМ с граничными условиями, полученными на физической

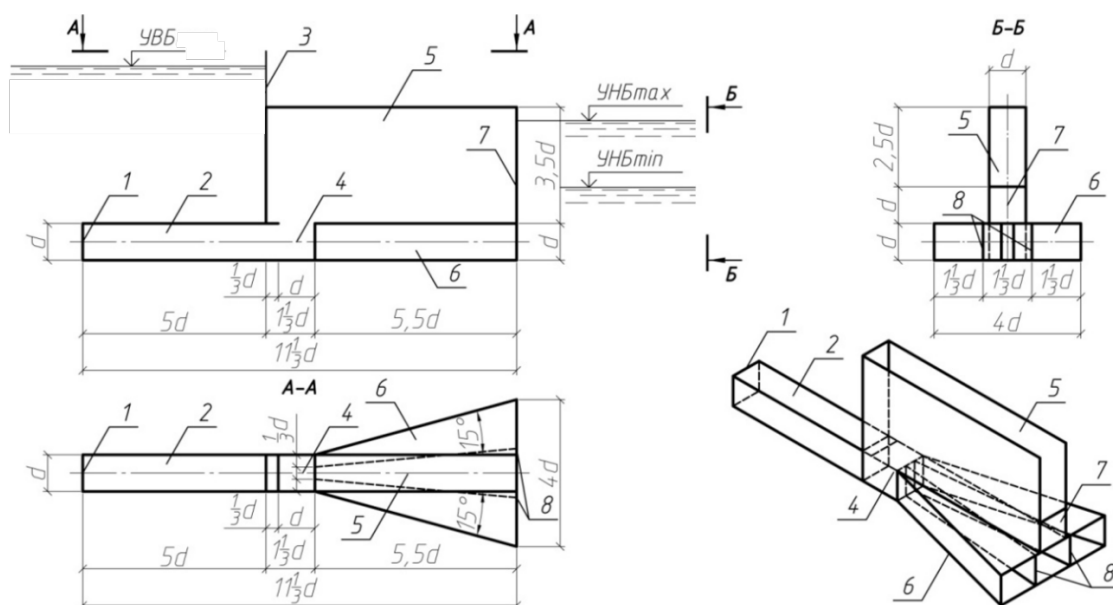


Рис. 2. Модель инжекционного водовыпуска-регулятора:

1 – входной оголовок; 2 – транзитная труба; 3 – напорная стенка; 4 – камера смешения; 5 – промежуточный бьеф; 6 – плоский диффузор; 7 – водослив; 8 – разделительные стенки

Fig. 2. Model of injection water outlet-regulator:

1 – inlet tip; 2 – transit pipe; 3 – pressure wall; 4 – mixing chamber; 5 – intermediate pool; 6 – flat diffuser; 7 – weir; 8 – separation walls

модели. Вид модели с расчетной сеткой приведен на рисунке 3.

В качестве теоретических методов исследований, позволивших получить зависимости для определения гидравлических параметров регулятора, использованы методы классической гидродинамики, в том числе теории струйных насосов.

В теории и проектировании водоструйных насосов, к которым можно отнести инжекционные регуляторы расхода, используются универсальные гидравлические характеристики, предложенные в свое время Л.Г. Подвидзом и Ю.Л. Кирилловским. Такими характеристиками являются безразмерные параметры: относительный напор h' , коэффициент инжекции u и относительная площадь k' . В принятых обозначениях относительный напор определяется как

$$h' = \frac{H_2}{H_1 - H_2}, \quad (1)$$

где H_1 – разность отметок между уровнем воды в верхнем бьефе и промежуточном бьефе, м; H_2 – разность отметок между уровнем воды в нижнем бьефе и промежуточном бьефе, м.

Очевидно, что напор на регулятор будет равен разности относительных напоров $H = H_1 - H_2$.

Коэффициент инжекции регулятора –

$$u = \frac{Q_0}{Q_1}, \quad (2)$$

где Q_0 – расход инжектируемого потока, м³/с; Q_1 – расход инжектирующего потока, м³/с.

Коэффициенты инжекции, значения которых не превосходят 1, считаются малыми. Относительная площадь вычисляется для входного сечения камеры смешения по зависимости:

$$k' = \frac{\omega_0}{\omega_1}, \quad (3)$$

где ω_1 – площадь инжектирующего потока, м²; ω_0 – площадь инжектируемого потока, м².

Для определения величины инжектируемого Q_0 и инжектирующего Q_1 потоков использовались методы, изложенные в работе [3]:

$$Q_1 = \omega_1 \cdot \left(\frac{-2gH_1B^2 - 2AC}{2 \cdot (B^2\zeta_{V_1} - A^2)} + \sqrt{\frac{(2gH_1B^2 + 2AC)^2 + 4 \cdot (B^2\zeta_{V_1} - A^2) \cdot C^2}{2 \cdot (B^2\zeta_{V_1} - A^2)}} \right)^{0.5}; \quad (4)$$

$$Q_0 = \omega_0 \cdot \left(\frac{\zeta_{V_1}V_1^2}{\zeta_{V_0}} - \frac{2gH_1}{\zeta_{V_0}} \right)^{0.5}, \quad (5)$$

где A, B, C – константы, зависящие от формы исполнения проточной части и уровней воды в верхнем, нижнем и промежуточном бьефах; ω_0, ω_1 – площадь поперечного сечения инжектируемого и инжектирующего потоков в камере смешения, м²; H_1 – разность отметок в верхнем и промежуточном бьефах; ζ_{V_1} – приведенный коэффициент сопротивления инжектирующего потока между сечением на входе в трубчатую часть и сечением в камере смешения; ζ_{V_0} – приведенный коэффициент сопротивления инжектируемого потока при поступлении из промежуточного бьефа до сечения в камере смешения.

В свою очередь, значения констант зависят от отношений площадей инжектируемого потока w_0 , инжектирующего потока w_1 и камеры смешения w_2 , приведенных коэффициентов сопротивлений ζ_{V_1} , ζ_{V_0} и коэффициента сопротивления диффузора ζ_d . Константа C включает в себя также напор верхнего и нижнего бьефов над промежуточным бьефом H_1 и H_2 .

Результаты и их обсуждение. Гибридное моделирование течений в инжекционных насосах успешно применяется в ряде исследований [6, 7]. К примеру, в работе [8] методами физического и численного моделирования в пакете StarCD CFD было изучено влияние размеров сопла и камеры смешения, в модели использована модель турбулентности k- ϵ . Для моделирования течения в пределах проточной части инжекционного регулятора также была использована модель турбулентности k- ϵ . Примеры трехмерных моделей приведены на рисунке 4.

Сопло является обязательным элементом струйных насосов. Оно стесняет выходное сечение трубчатой части и служит для увеличения скоростей инжектирующего потока перед слиянием. В этом случае в уравнениях 4 и 5 площадь инжектирующего потока w_1 определялась бы как площадь сопла в свету, а площадь инжектируемого потока w_0 представляла бы собой разность между площадью камеры смешения w_2 и площадью инжектирующего потока. Поскольку проточная часть регулятора (рис. 2) не имела жесткого сопла, в качестве сопла предложено рассматривать границу раздела инжектирующего и инжектируемого потоков в камере смешения.

Определение граничной линии тока было выполнено методами численного моделирования. Линия раздела потоков имела различное

положение во всем диапазоне работы модели инжекционного регулятора и зависела от величины сливающихся расходов. Моделирование показало, что в зависимости от величины сливающихся расходов инжектирующий поток может занимать до 20% камеры смешения, максимум достигается при максимальном значении коэффициента инжекции. При этом в зависимости от уровней воды в бьефах относительная площадь k' для каждого коэффициента инжекции u в экспериментах изменялась от 0,15 до 0,21, с ростом коэффициента инжекции происходило увеличение относительной площади.

Уравнение безразмерной характеристики инжекционного регулятора являлось функцией от коэффициента инжекции u и относительного напора h' , в которой потери удельной энергии в пределах проточного тракта учитывались гидравлическими сопротивлениями, вычисленными по формуле Дарси-Вейсбаха. В относительных величинах уравнение расходной характеристики имело вид $u = f(H_2/H)$, где коэффициент

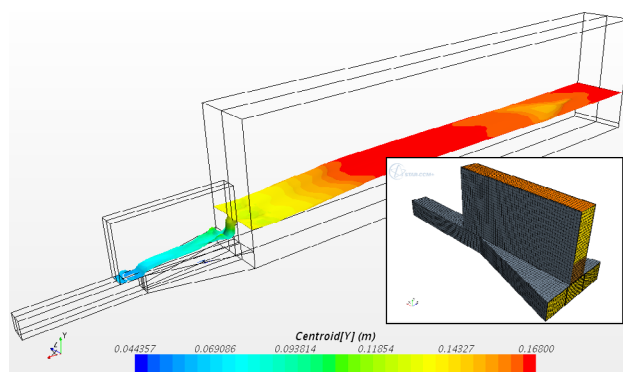


Рис. 3. Модель регулятора и расчетная сетка в пределах проточного тракта сооружения
Fig. 3. Regulator model and design grid within the flow path of the structure

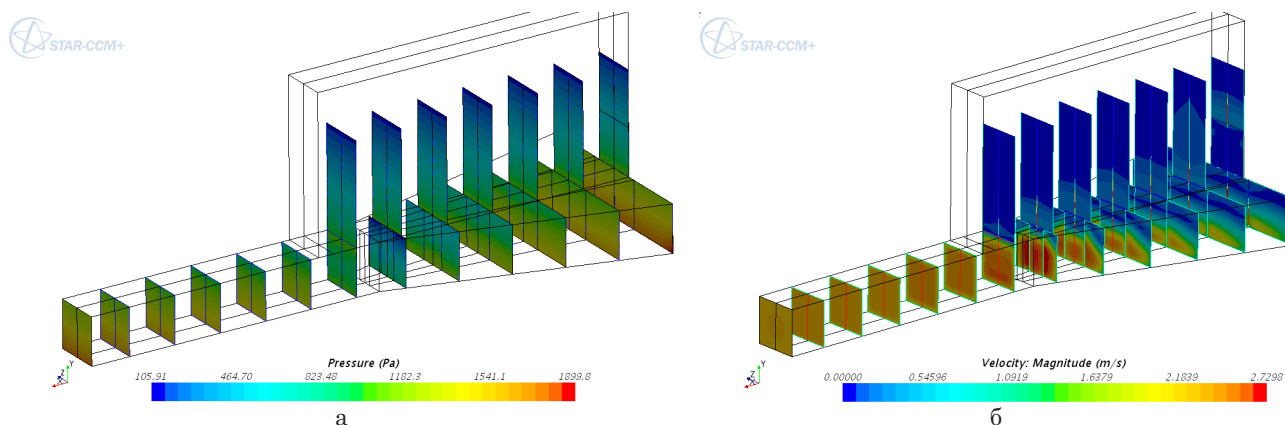


Рис. 4. Пример моделирования гидравлических параметров регулятора:
а – распределение давления; б – распределение скорости

Fig. 4. Example of modeling the hydraulic parameters of the regulator:
a – pressure distribution; b – speed distribution

инъекции вычислялся по ф.2, а значения расходов: инжектируемого Q_0 и инжектирующего Q_1 – вычислялись по ф.4 и ф.5 для различных положений верхнего, нижнего и промежуточного бьефов. Для каждого значения коэффициента инъекции u было построено поле точек, которое условно может быть названо расходной характеристикой регулятора без сопла (рис. 5).

Условность объясняется тем, что в струйных насосах или инжекционных регуляторах с жестким соплом расходная характеристика имеет вид кривой, соответствующей единственному значению относительной площади, при этом площадь инжектирующего потока в ф.3 принимается равной площади сопла. Пунктирная кривая (рис. 5) построена при изменяющихся значениях k' . Максимальный коэффициент инъекции порядка 0,16 достигается при минимальном относительном напоре. При максимальном относительном напоре порядка 0,4 коэффициент инъекции будет минимальным и равным 0,02. Меньшие значения коэффициента инъекции при существующей форме исполнения проточной части инжекционного регулятора получить невозможно вследствие захвата воздуха в отверстие 3 (рис. 1). Более высокие значения получить невозможно, так как происходит полное затопление промежуточного бьефа и выравнивание уровня воды в нем с уровнем воды в отводящем канале.

Сравнение расходной характеристики (рис. 5) с характеристикой инжекционных регуляторов с соплом и диффузором [3] для пирамидального диффузора со степенью расширения 2 при относительной управляющей площади $k' = 1$ показывает, что внесение сопла увеличивает максимально возможный коэффициент инъекции почти в 3 раза и относительный напор – в 2 раза. Форма расходной кривой для инжекционных регуляторов без сопла аналогична форме

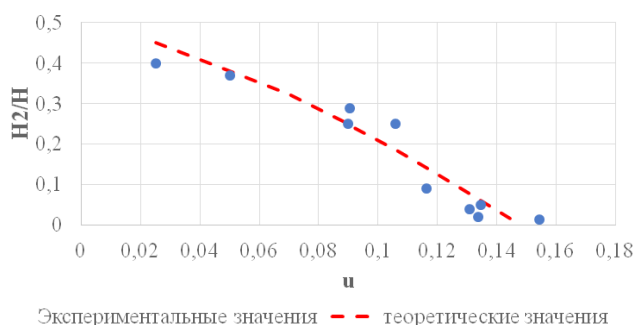


Рис. 5. Расходная характеристика инжекционного регулятора без сопла с плоским диффузором

Fig. 5. Flow characteristic of injection regulator without nozzle with flat diffuser

кривой с соплом. Из теории струйных насосов известно, что при одинаковых коэффициентах инъекции при прочих равных условиях относительный напор устройств без диффузора может быть на 40...70% ниже, чем при наличии диффузора.

При сравнении расходной характеристики (рис. 5) с характеристикой [2], полученной для инжекционного регулятора с соплом и камерой смешения в виде внезапного расширения при $k' = 1$, также можно отметить, что бездиффузорные конструкции с соплом имеют максимальный коэффициент инъекции – выше в 2,5 раза, а максимальный относительный напор – больше в 1,7 раза. Устройство диффузора или камеры смешения в виде внезапного расширения приводит к существенному росту относительного напора. Другими словами, при установке инжекционного регулятора в каналах, имеющих достаточно большой перепад в створе перегородающего сооружения, под которым расположен регулятор, предпочтение следует отдавать формам исполнения проточной части, включающим в себя сопло. При малых перепадах уровня воды можно применять конструкции без сопла с диффузорными выходными участками.

Изучение режима течения в промежуточном бьефе было выполнено на модели при различных значениях коэффициента инъекции. Схема для гидравлического расчета и пример течения приведены на рисунке 6.

Промежуточный бьеф формировался в призматической области с длиной $5,5d$ и с постоянной шириной d , высота водосливного порога над крышкой диффузора составляла d . Для всех экспериментов была определена критическая глубина в промежуточном бьефе:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{a q^2}{g}}, \quad (6)$$

где a – коэффициент Кориолиса; q – удельный расход, м²/с, $q = Q/b$ (здесь b – ширина промежуточного бьефа в направлении, перпендикулярном течению потока, м); Q_0 – инжектируемый расход, определяемый по зависимости (5), м³/с.

Значения критической глубины во всех экспериментах составляли $h_{кр} = (0,6...0,8) p$, где p – высота водосливного порога (рис. 6а). Поток в промежуточном бьефе за водосливом находился в бурном состоянии, так как соответствующие значения сжатой глубины h_c были меньше, чем критические. Известно, что создание внезапной преграды по течению стационарного сверхкритического потока (бурного потока) приводит к возникновению обратной положительной волны, распространяющейся вверх по течению и представляющей собой гидравлический прыжок [9].

При этом сжатая глубина будет являться первой сопряженной глубиной, то есть $h_c = h'$.

Под точностью регулирования инъекционных водовыпусков понимается обеспечение циркуляции расхода Q_0 (излишков водоподачи) при известном уровне нижнего бьефа в отводящем канале, возникающем при сокращении водопотребления ниже створа перегораживающего сооружения. Другими словами, уровню нижнего бьефа должен соответствовать конкретный инжектируемый расход. Для инъекции расхода Q_0 необходимо, чтобы в конце промежуточного бьефа был обеспечен напор, равный H_2 . Вторая сопряженная глубина гидравлического прыжка в промежуточном бьефе (рис. 6а) –

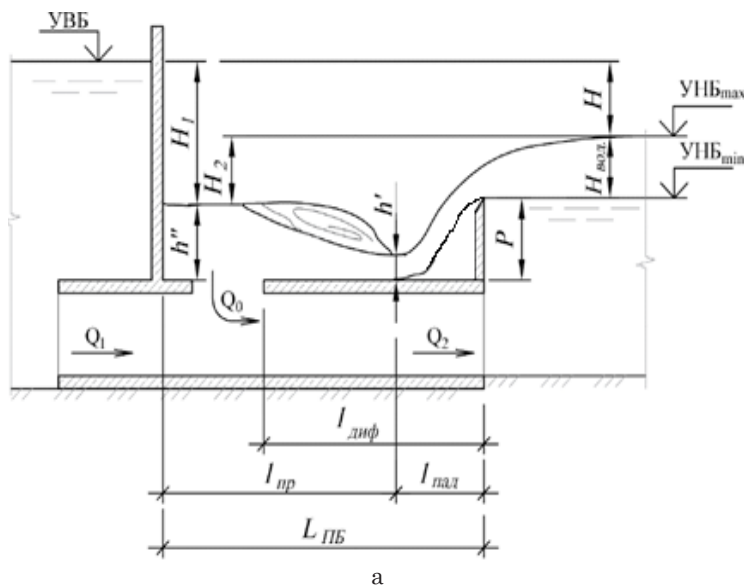
$$h'' = H_{\text{вод}} + p - H_2, \quad (7)$$

где $H_{\text{вод}}$ – напор над водосливом, м; p – высота водосливного порога над крышкой диффузора, м.

Напор на водосливе в нижнем бьефе $H_{\text{вод}}$ определяется как расход воды обратной волны, которая возникает при снижении водопотребления в отводящем канале от максимального до минимального значений:

$$H_{\text{вод}} = \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{B_{\text{кан}} \cdot \sqrt{\frac{g \omega_{\text{кан}}}{B_{\text{кан}}}}}, \quad (8)$$

где Q_{max} – расход при максимальном водопотреблении, м³/с; Q_{min} – расход при минимальном водопотреблении, м³/с; $B_{\text{кан}}$ – ширина канала по урезу воды, м; $\omega_{\text{кан}}$ – площадь поперечного сечения канала, м².



Первая сопряженная глубина определяется по зависимости:

$$h' = 0.5h'' \cdot \sqrt{1 + 8 \left(\frac{h''}{h'} \right)^3} - 1, \quad (9)$$

где h'' – вторая сопряженная глубина, м.

При возникновении гидравлического прыжка на крышке диффузора в промежуточном бьефе возможны следующие виды прыжка: прыжок в предельном состоянии, образующийся непосредственно за водосливом; надвинутый гидравлический прыжок; отогнанный гидравлический прыжок (рис. 6б). Отогнанный гидравлический прыжок является менее предпочтительным.

Полученное по ф.9 значение первой сопряженной глубины необходимо обеспечить, исходя из условий поступления расхода Q_0 через водослив. В этом случае значение первой сопряженной глубины может быть получено при рассмотрении течения за водосливом в результате решения кубического уравнения [9]:

$$(p - H_{\text{вод0}}) \cdot (h')^2 - (h')^3 = \frac{q^2}{\phi^2 2g}, \quad (10)$$

где $H_{\text{вод0}}$ – напор над водосливом с учетом скорости подхода, м; p – высота водосливного порога над крышкой диффузора, м; j – коэффициент скорости.

Напор на водосливе с учетом скорости подхода $H_{\text{вод0}}$ можно определить, приближенно приняв скорость потока перед водосливом



б

Рис. 6. Промежуточный бьеф инжекционного регулятора:

а – схема для гидравлического расчета; б – гидравлический прыжок на крышке диффузора

Fig. 6. Intermediate pool of the injection regulator discharge:

а – diagram for hydraulic calculation; б – hydraulic jump on the diffuser cover

равной скорости обратной волны, возникающей в отводящем канале при снижении водопотребления:

$$H_{\text{вод0}} = H_{\text{вод}} + \frac{v_{\text{вод}}^2}{2g}, \quad (11)$$

где $v_{\text{вод}}$ – скорость потока перед водосливом, $v_{\text{вод}} \approx (g\omega_{\text{кан}} \cdot B_{\text{кан}}^{-1})^{0.5}$.

Основным условием, обеспечивающим точность регулирования, должна быть такая привязка инжекционного регулятора к уровням бьефов в створе перегораживающего сооружения, которая обеспечит равенство значений первой сопряженной глубины h' , полученных по уравнениям (9) и (10). Это может быть достигнуто изменением геометрических параметров промежуточного бьефа. К таким величинам относятся: ширина водосливного фронта b ; ширина промежуточного бьефа в направлении, перпендикулярном течению инжектируемого потока по крышке диффузора $b_{\text{пб}}$; длина промежуточного бьефа $L_{\text{пб}}$.

При варьировании высоты водосливного порога p следует иметь в виду, что кромка водослива должна располагаться на отметке, соответствующей уровню воды в отводящем канале при максимальном водопотреблении, а выходное сечение диффузора необходимо заглубить под этот уровень как минимум на 2...3 скоростных напора.

В общем случае длина промежуточного бьефа $L_{\text{пб}}$ состоит из длины падения струи $l_{\text{пад}}$, поступающей через водослив, и длины гидравлического прыжка $l_{\text{пр}}$ на крышке диффузора (рис. 6а). Длина падения струи за водосливной стенкой $l_{\text{пад}}$ может быть определена по формуле:

$$l_{\text{пад}} = 0.33 \cdot H_{\text{вод0}} + 1.38 \sqrt{H_{\text{вод0}} \cdot (p + 0.45 \cdot H_{\text{вод0}})}.$$

Для определения длины гидравлического прыжка существуют как классические, так

и новые зависимости [11, 12]. Она может быть определена по формуле М.Д. Чертоусова:

$$l_{\text{пр}} = 10.3h' \cdot \left(\sqrt{\frac{h_{\text{кр}}^3}{h'}} - 1 \right)^{0.81}.$$

В случае, когда длина промежуточного бьефа превышает длину крышки диффузора, возможно сопряжение нижнего и промежуточного бьефов в виде надвинутого гидравлического прыжка. При исполнении промежуточного бьефа с расширением в направлении течения инжектируемого потока (повторяющим форму крышки диффузора) возможно использование зависимостей для затопленного гидравлического прыжка в расширяющемся прямоугольном русле с центральным углом роспуска $15^\circ \div 45^\circ$ на гладком горизонтальном дне [13].

Выводы

В результате выполненных исследований подтверждена приемлемость расчетных зависимостей, применяемых для определения расходов в инжекционных водовыпусках, для гидравлического расчета регуляторов без сопла с плоским диффузором на концевом участке.

Построена расходная характеристика инжекционного водовыпуска с плоским диффузором и выполнено ее сравнение с регуляторами, имеющими сопло, внезапное расширение или диффузор. При прочих равных условиях отсутствие сопла снижает как коэффициент инжекции, так и относительный напор регулятора.

Впервые изучено образование гидравлического прыжка на крышке плоского диффузора в промежуточном бьефе. Впервые приведены расчетные зависимости, позволяющие связать сопряженные глубины в промежуточном бьефе с точностью регулирования, а также даны рекомендации по изменению геометрических параметров промежуточного бьефа из условий точной подачи инжектируемого расхода.

Список использованных источников

1. Круглова В.В. Классификация и анализ отказов автоматизированных водовыпускных сооружений на каналах оросительных систем // Вестник КРСУ. 2012. Т. 12, № 6. С. 33-35.
2. Снежко В.Л. Расходные характеристики инжекционных водовыпусков-регуляторов / В.Л. Снежко, Д.Д. Кобозев // Природообустройство. 2023. № 5. С. 111-117. DOI: 10.26897/1997601120235-111-117.
3. Снежко В.Л. Расходная характеристика инжекционных регуляторов с соплом и диффузором / В.Л. Снежко, Д.Д. Кобозев // Гидротехническое строительство. 2024. № 11. С. 52-57.
4. Кобозев Д.Д. Сравнение гидравлических характеристик инжекционных регуляторов с различной формой исполнения выходного участка / Д.Д. Кобозев, В.Л. Снежко // Гидротехническое строительство. 2023. № 2. С. 29-33.

References

1. Kruglova V.V. Classification and analysis of failures of automated water outlet facilities on irrigation system channels // Bulletin of the KRSU. 2012. Vol. 12, No. 6. pp. 33-35.
2. Snezhko V.L. Consumption characteristics of injection water outlets / regulators / V.L. Snezhko, D.D. Kobozev // Prirodobustroystvo. 2023. No. 5. pp. 111-117. DOI: 10.26897/1997601120235-111-117.
3. Snezhko V.L. Consumption characteristics of induction regulators with nozzle and diffuser / V.L. Snezhko, D.D. Kobozev // Hydraulic engineering. 2024. No. 11. pp. 52-57.
4. Kobozev D.D., Snezhko V.L. Comparison of hydraulic characteristics of injection regulators with various forms of output section design // Hydraulic engineering construction. 2023. No. 2. pp. 29-33.

5. Гайсин А.А. Способ совершенствования гидродинамических регуляторов расхода // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 3 (19). С. 159-170.
6. Omidvar A., Ghazikhani M., Modarres Razavi SMR. Entropy analysis of a solar driven variable geometry ejector using computational fluid dynamics. *Energy Convers Manage*. 2016. № 119. Pp. 435-43. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.090.
7. Wu H., Liu Z., Han B., Li Y. Numerical investigation of the influences of mixing chamber geometries on steam ejector performance. *Desalination*. 2014. № 353. Pp. 15-20. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.002.
8. Flow Analysis for Single and Multi-Nozzle Jet Pump / T. Narabayashi, Y. Yamazaki, H. Kobayashi, T. Shakouchi // *JSME International Journal Series B*. 2006. Vol. 49, № 4. Pp. 933-940.
9. Букреев В.И. Внезапное перекрытие сверхкритического потока в открытом канале / В.И. Букреев, А.В. Гусев // *Прикладная механика и техническая физика*. 2004. Т. 45, № 4 (266). С. 58-63.
10. Гурьев А.П. Влияние конструктивных параметров водобойного колодца на гашение энергии потока / А.П. Гурьев, Н.В. Ханов, Н.А. Волгин // *Природообустройство*. 2015. № 4. С. 48-51.
11. Мамедов А.Ш. Гидравлический прыжок на гладком и шероховатом дне // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2023. Т. 308. С. 67-82.
12. Сухов А.Д. Гидравлический прыжок для прямолинейного и осесимметричного течения жидкости / А.Д. Сухов, А.Г. Петров // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2023. Т. 164, № 5. С. 839-846. DOI: 10.31857/S0044451023110147.
13. Беглярова Э.С. Экспериментальные исследования затопленного гидравлического прыжка в непрямоугольном русле прямоугольного сечения при гладком горизонтальном дне / Э.С. Беглярова, А.М. Бакштанин, А.В. Дмитриева, С.А. Соколова, Д.П. Михайлец // *Природообустройство*. 2018. № 3. С. 51-58. DOI: 10.26897/19976011/2018-3-51-58.

Об авторах

Вера Леонидовна Снежко, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; SPIN-код: 9528-8890; AuthorID: 696880; Scopus Author ID: 57209333075; ResearcherID: ABG-5645-2020; <https://orcid.org/0000-0002-3968-0563>; vl_snejko@mail.ru

Айнурт Альбертович Гайсин, канд. техн. наук, руководитель службы Управления цифрового развития и информационных технологий Московского фонда реновации жилой застройки; SPIN-код: 2628-2649, AuthorID: 780440; <https://orcid.org/0000-0001-5607-4728>; ainurt.g@yandex.ru

Максим Сергеевич Палиивец, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов; SPIN-код: 7783-7503, AuthorID: 705251; Scopus Author ID: 57217030624; ResearcherID: AAE-5800-2022; <https://orcid.org/0000-0002-2518-2141>; maxim6663@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteri

Снежко В.Л., Гайсин А.А., Палиивец М.С. 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 interes

Авторы заявляет об отсутствии конфликтов интересов / The authors declares that there are no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of authors

Гайсин А.А. выполнил физическое и численное моделирование; Снежко В.Л. и Палиивец М.С. выполнили расчетную часть исследований.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 05.01.2025

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 29.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 29.01.2025

5. Gaisin A.A. A method for improving hydrodynamic flow regulators // *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2015. No. 3 (19). pp. 159-170.

6. Omidvar A., Ghazikhani M., Modarres Razavi SMR. Entropy analysis of a solar driven variable geometry vector using computational fluid dynamics. *Energy Converse Manage*. 2016. No. 119. Pp. 435-43. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.090.

7. Wu H., Liu Z., Han B., Li Y. Numerical investigation of the influence of mixing chamber geometries on steam ejector performance. *Desalination*. 2014. No. 353. Pp. 15-20. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.002.

8. Flow Analysis for Single and Multi-Nozzle Jet Pump / T. Nakabayashi, Y. Yamazaki, H. Kobayashi, T. Shakouchi // *ASME International Journal Series B*. 2006. Vol. 49, No. 4. Pp. 933-940.

9. Bukreev V.I. Sudden occlusion of supercritical flow in an open channel / V.I. Bukreev, A.V. Gusev // *Applied mechanics and technical physics*. 2004. Vol. 45, No. 4 (266). pp. 58-63.

10. Guryev A.P. The influence of the design parameters of a downhole on the damping of flow energy / A.P. Guryev, N.V. Khanov, N.A. Volgin // *Prirodoobustrojstvo*. 2015. No. 4. pp. 48-51.

11. Mammadov A.Sh. Hydraulic jump on a smooth and rough bottom // *Izvestiya VNIIG named after B.E. Vedeneev*. 2023. Vol. 308. pp. 67-82.

12. Sukhov A.D. Hydraulic jump for rectilinear and axisymmetric fluid flow / A.D. Sukhov, A.G. Petrov // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2023. Vol. 164, No. 5. pp. 839-846. DOI: 10.31857/S0044451023110147.

13. Beglyarova E.S. Experimental studies of a flooded hydraulic jump in a non-prismatic channel of rectangular cross-section with a smooth horizontal bottom / E.S. Beglyarova, A.M. Bakshtanin, A.V. Dmitrieva, S.A. Sokolova, D.P. Mikhaylets // *Prirodoobustrojstvo*. 2018. No. 3. pp. 51-58. DOI: 10.26897/19976011/2018-3-51-58.

About the authors

Vera L. Snezhko, DSc (Eng), professor, professor of the department of hydraulics and hydro engineering construction; SPIN-code: 9528-8890; AuthorID: 696880; Scopus Author ID: 57209333075; ResearcherID: ABG-5645-2020; <https://orcid.org/0000-0002-3968-0563>; vl_snejko@mail.ru

Ainurt A. Gaisin, CSc (Eng); Head of the service of the Department of digital development and information technologies of the Moscow fund for the renovation of residential development; SPIN-code: 2628-2649, AuthorID: 780440; <https://orcid.org/0000-0001-5607-4728>; ainurt.g@yandex.ru

Maxim S. Paliivets, CSc (Eng); associate professor, associate professor of the department of the systems of automated designing and engineering calculations; SPIN-code: 7783-7503, AuthorID: 705251; Scopus Author ID: 57217030624; ResearcherID: AAE-5800-2022; <https://orcid.org/0000-0002-2518-2141>; maxim6663@mail.ru

Snezhko V.L., Gaisin A.A., Paliivets M.S. conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they summarized and wrote the manuscript, have copyright to the article and are responsible for plagiarism.

Gaisin A.A. performed physical and numerical modeling; Snezhko V.L. and Paliivets M.S. performed the calculated part of the research.

Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-90-96>

УДК 556.332.042:628.11

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
НА ВОДОЗАБОРАХ НАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ****Н.П. Карпенко**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»; 127434, г. Москва, Б. Академическая ул., 44, корп. 2, Россия

Аннотация. Цель исследований – обоснование и установление зон санитарной охраны подземных водозаборов Нарского месторождения в условиях изменения гидродинамического и гидрохимического режимов на основе количественных оценок защищенности основного водоносного горизонта от поверхностного потенциального загрязнения. Рассматриваются результаты проведенных исследований по изучению гидролого-гидрогеологических условий Нарского месторождения, расположенного на территории Наро-Фоминского городского округа Московской области, которое откачивает подземные воды для городского питьевого водоснабжения. Проведен анализ динамики показателей гидродинамического и гидрогеохимического режимов основных водоносных горизонтов месторождения и выявлены особенности их формирования. По данным многолетних исследований установлено изменение качества отбираемых подземных вод, в которых зафиксировано повышенное по отношению к предельно-допустимым концентрациям (ПДК) природное содержание отдельных компонентов, связанное с литологическими особенностями водосодержащих отложений. Выполнена количественная оценка защищенности подземных вод от поверхностного загрязнения. Установлено, что исследуемый водозабор каширского горизонта не имеет достаточной защищенности подземных вод от поверхностного загрязнения. Предложен состав необходимых мероприятий и технических приемов различного назначения (технических, технологических и природоохранных), которые позволят сохранить и обеспечить качество подземных вод на Нарском месторождении.

Ключевые слова: водоносные горизонты, водоснабжение, режим эксплуатации, подземные воды, качество, защищенность, мероприятия

Формат цитирования: Карпенко Н.П. Обеспечение качества подземных водных ресурсов на водозаборах Нарского месторождения // Природообустройство. 2025. № 1. С. 90-96. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-90-96>

Scientific article

**ENSURING THE QUALITY OF GROUNDWATER RESOURCES
AT THE WATER INTAKES OF THE NARSKOYE DEPOSIT****N.P. Karpenko**

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov»; 127434, Moscow, B. Akademicheskaya str., 44, building 2, Russia

Abstract. The purpose of the research is to substantiate and establish sanitary protection zones for ground water intakes of the Nara field in conditions of changing hydrodynamic and hydrochemical regimes based on quantitative assessments of the protection of the main aquifer from surface potential pollution. The results of the conducted research on the study of the hydrological and hydrogeological conditions of the Nara deposit, located on the territory of the Naro-Fominsk urban district of the Moscow region and which pumps groundwater for urban drinking water supply, are considered. The analysis of the dynamics of the hydrodynamic and hydrogeochemical regimes of the main aquifers of the deposit is carried out and the features of their formation are revealed. According to the data of long-term studies, a change in the quality of selected groundwater has been established, in which the natural content of individual components increased in relation to maximum permissible concentrations (MPC) is recorded, associated

with the lithological features of water-containing sediments. A quantitative assessment of the protection of groundwater from surface pollution has been carried out. It has been established that the studied intake of the Kashirsky horizon does not have sufficient protection of groundwater from surface pollution. The composition of necessary measures and techniques for various purposes (technical, technological and environmental) that will preserve and ensure the quality of groundwater at the Nara deposit is proposed.

Keywords: aquifers, water supply, operating mode, groundwater, quality, security, measures

Format of citation: Karpenko N.P. Ensuring the quality of ground water resources at the water intakes of the Narskoye deposit // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 90-96. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-90-96>

Введение. Развитие различных отраслей народного хозяйства требует использования больших объемов поверхностных и подземных водных ресурсов, при эксплуатации которых вопросы их рациональной эксплуатации, охраны от истощения и загрязнения имеют первостепенное значение. Проблема сохранения качества воды является на данный момент актуальной. В настоящее время достаточных объемов воды, пригодных для питьевого водоснабжения, промышленного производства, орошения и т.д., не хватает во многих районах мира, поэтому вопросы обеспечения качеством подземных водных ресурсов являются актуальными и особенно востребованными. Для урбанизированных территорий Центральной части России эта проблема является особенно актуальной, поскольку длительная эксплуатация месторождений подземных вод для удовлетворения нужд населения и промышленных объектов сопряжена с негативными процессами загрязнения окружающей среды. Поэтому вопросы разработки природоохранных мероприятий по снижению антропогенной нагрузки на природную среду и мероприятий по обеспечения качества воды на водозаборах имеют большую практическую значимость.

Цель исследований: обоснование и установление зон санитарной охраны подземных водозаборов Нарского месторождения в условиях

изменения гидродинамического и гидрохимического режимов на основе количественных оценок защищенности основного водоносного горизонта от поверхностного потенциального загрязнения.

Материалы и методы исследований.

Объектом исследований являются водозаборы Нарского месторождения, расположенного на восточной окраине города Наро-Фоминска Московской области. По данным исследований была выполнена переоценка эксплуатационных запасов пресных подземных вод для Центральной части Московского артезианского бассейна, что было связано с существенными изменениями гидрогеологической обстановки, которая сформировалась в результате техногенного воздействия и длительного отбора подземных вод на этой территории [1-3].

Территория исследований входит в состав Нарского месторождения подземных вод, запасы подземных вод которого переоценивались по основным водоносным комплексам (табл. 1).

Интенсивный отбор подземных вод создал неблагоприятные экологические условия: напоры пьезометрических уровней эксплуатируемых водоносных комплексов сильно снизились до абсолютных отметок – от 152...160 (C_{2pd-mc}) до 66...92 м (C_{1al-pr}). За длительный период наиболее интенсивного освоения подземных вод

Таблица 1. Балансовые запасы подземных вод Нарского месторождения (по состоянию на 09.10.2015)

Table 1. Balance reserves of groundwater of the Narskoye deposit (as of 09.10.2015)

Водоносные горизонты и комплексы <i>Aquifers and complexes</i>	Индекс водоносного горизонта и комплекса <i>Index of aquifers and complexes</i>	Эксплуатационные запасы по категориям, тыс. м³/сут <i>Operational reserves on categories, ths m³ / day</i>			
		A	B	C ₁	Bcero / Total
Всего по месторождению / Total on the deposit		42,2	45,601	16,9	104,701
	C ₂	21,1	—	—	21,1
	C _{2pd-mc}	—	6,004	9,1	15,104
	C _{2ks+pd+mc}	—	3,388	—	3,388
	C _{2ks}	21,1	32,121	—	53,221
	C _{1ok-tr}	—	1,7	7,8	9,5
	C _{1ok-pr}	—	1,928	—	1,928
	C _{1al-pr}	—	0,46	—	0,46

на территории месторождения сформировалась локальная депрессионная воронка.

Максимальные от начала эксплуатации понижения фиксировались в начале 2000-х гг. на городских водозаборах северной и северо-восточной частей г. Наро-Фоминска. Характеристика качества подземных вод района исследований определяется особенностями его гидродинамического и гидрогеохимического режимов. Специфика геолого-гидрогеологических условий связана с природной неоднородностью и анизотропией литологического состава водовмещающих пород, степенью защищенности водоносных горизонтов и водоносных комплексов, а также взаимосвязью и характером водообменных процессов.

Исследуемый район исследований входит в состав Московского артезианского бассейна, для которого свойственно глубокое расчленение рельефа местности, а также наличие в осадочном чехле ослабленных тектонических зон повышенной проницаемости с формированием гидравлических окон. Это способствует интенсивной инфильтрации атмосферных осадков в глубокие нижележащие горизонты и определяет условия формирования, питания, распространения и транзита подземных вод.

К зоне активного водообмена, которая включает в себя продуктивные водоносные горизонты каменноугольных отложений, приурочены подземные воды с хорошими гидрохимическими показателями. Воды каменноугольных отложений являются пресными и относятся к гидрокарбонатному кальциевому, магниевому-кальциевому типу. Повышенные (по отношению к ПДК) природные содержания отдельных компонентов связаны в первую очередь с литологическими особенностями водосодержащих отложений. Так, доломиты и доломитизированные известняки являются источником высокой жесткости и магния, прослой глины и мергелей – лития, показателя мутности, а высокие концентрации фтора обусловлены присутствием минералов ратовкита и флюорита. Следует отметить, что природное ожелезнение карбонатных пород в условиях нестабильной окислительно-восстановительной обстановки предопределяет повышенное содержание в подземных водах железа, а с превышением концентраций железа в большинстве случаев связано несоответствие качества подземных вод по показателю цветности. Повышенные содержания стронция обусловлены присутствием целестина, встречающегося в каменноугольных отложениях Московского артезианского бассейна (рис. 1).

Питание водоносного комплекса четвертичных отложений формируется за счет

активной инфильтрации атмосферных осадков на всей площади его распространения. Основная разгрузка этого водоносного комплекса происходит в овражно-балочную эрозионную сеть или в нижележащие водоносные горизонты. Воды четвертичных отложений практически не представляют ввиду низкой водообильности и недостаточной защищенности от поверхностного загрязнения. Общая мощность четвертичных отложений составляет от 20...25 до 55...60 м. Для территории исследований характерно практически сплошное распространение валунных суглинков московской морены мощностью до 40 м. На исследуемом участке четвертичные образования вскрыты до глубины 28,8 м. Верхняя часть разреза (до 13,6 м) представляет собой переслаивание суглинков и песков, нижняя (13,6...28,8 м) сложена плотными моренными суглинками и песчаными глинами с включением гравия и гальки (рис. 2).

Результаты и их обсуждение. Обследование водозаборного узла проводилось с целью оценки технического состояния водозаборных и водопроводных сооружений, ухудшение которого может оказать влияние на экологическую ситуацию в границах зон санитарной охраны (ЗСО). Для характеристики водозабора были проведены:

- режимные наблюдения за динамическим режимом подземных вод, динамикой водоотбора подземных вод;
- гидрохимическое опробование воды в эксплуатационных и наблюдательных скважинах;
- исследования по организации первого пояса ЗСО.

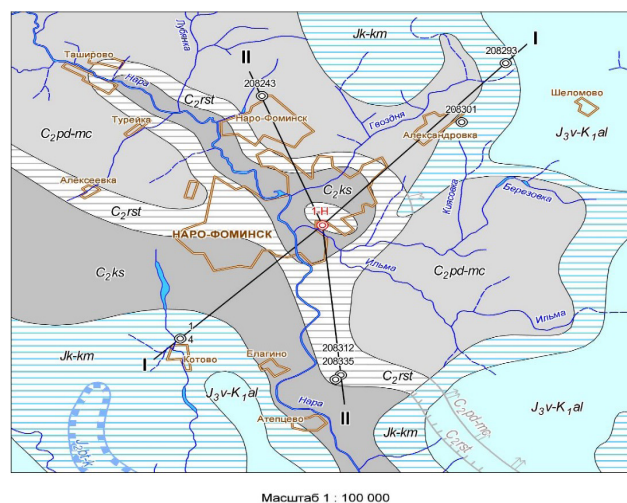


Рис. 1. Схематическая гидрогеологическая карта района работ

Fig. 1. Schematic hydrogeological map of the work area

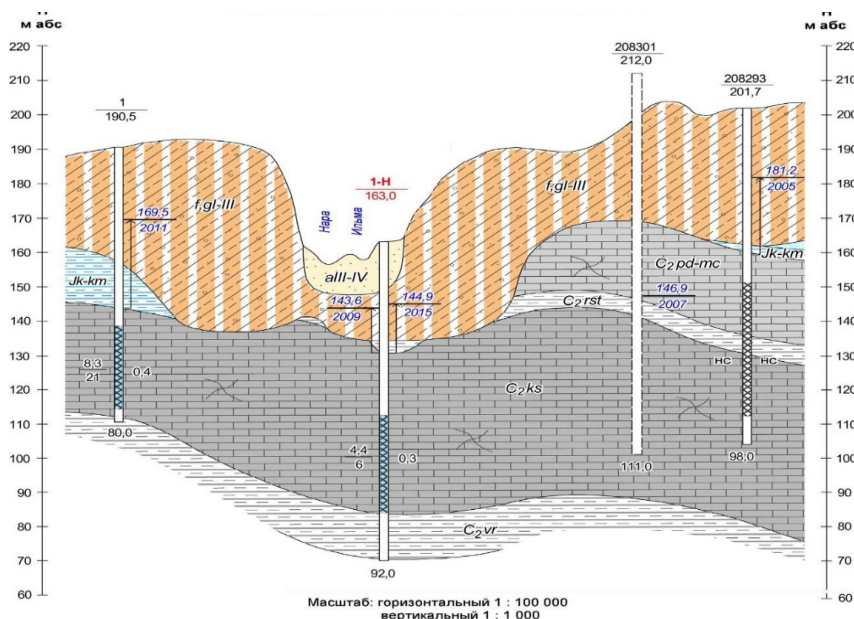


Рис. 2. Гидрогеологический разрез района исследований

Fig. 2. Hydrogeological section of the study area

Согласно гидрогеологической документации разрешенный водоотбор составляет 295 м³/сут., целевое использование подземных вод – питьевое, хозяйственно-бытовое водоснабжение, а режим работы водозабора принимался за круглосуточный круглогодичный.

В нарушенных эксплуатацией условиях, а также при недостаточной защищенности, в зависимости от интенсивности и характера техногенного воздействия с поверхности фоновый гидрокарбонатный тип подземных вод может смениться на гидрокарбонатно-сульфатный, сульфатный либо смешанный трехкомпонентный, при этом, как правило, повышаются минерализация и уровень жесткости. В зависимости от типа загрязнения в воде могут присутствовать в повышенных концентрациях азотсодержащие вещества, фенолы, нефтепродукты и т.д.

Одним из важных факторов, влияющих на качество воды, является вертикальный водообмен между смежными водоносными подразделениями, активность которых зависит от режима и интенсивности эксплуатации подземных вод каменноугольных отложений. Дисбаланс пьезометрических напоров, сформировавшийся под влиянием местного и регионального водоотбора, может стать причиной привноса в продуктивные горизонты и комплексы нехарактерных для них компонентов.

Характеристика качественного состава подземных вод каширского водоносного комплекса на изучаемом участке недр, а также качества воды после водоподготовки была проанализирована по многочисленным скважинам.

Гидрогеохимическая характеристика воды относится к гидрокарбонатному магниево-кальциевому типу. Реакция среды нейтральная и слабощелочная, показатель pH изменяется от 7,1 до 7,9 и в среднем составляет 7,4. По величине сухого остатка (191,0...629,0 мг/л при среднем значении 385,2 мг/л) воды пресные, по уровню общей жесткости (5,1...7,1 мг-экв/л, в среднем – 6,1 мг-экв/л при ПДК 7,0 мг-экв/л) – умеренно жесткие и жесткие. Концентрации хлоридов и сульфатов изменяются в диапазоне 46,0...128,6 мг/л и 22,6-42,9 мг/л соответственно. По органолептическим показателям отмечены превышения уровня мутности (1,1...26,4 мг/л, средний показатель – 14,4 мг/л при ПДК 1,5 мг/л), цветности (5...26 град., в среднем 17 град. при ПДК 20 град.) и запаху (0...4 баллов, среднее значение – 2,3 балла при ПДК 2 балла.). Показатель окисляемости – в пределах нормы. Содержание суммарного железа изменяется в пределах 0,06...2,20 мг/л. Средняя концентрация составляет 1,23 мг/л, то есть превосходит ПДК (0,3 мг/л) в 4,1 раза. Остальные нормируемые санитарно-токсикологические и органические показатели содержатся в количествах, ниже предельно допустимых величин или ниже порога чувствительности методов исследований. В целом геохимический тип и качество выведенных из скважины подземных вод соответствуют природному составу каширского комплекса и обусловлены естественными факторами без признаков техногенного загрязнения. На водозаборе проводится комплексная водоподготовка. После многоступенчатой системы фильтров

и ультрафиолетового облучения качество воды, поступающей в разводящую сеть, соответствует требованиям санитарных норм.

С целью обеспечения нормативного качества подземных вод водозаборов Нарского месторождения были предложены технические решения и мероприятия по сохранению благоприятного качественного состава подземных вод. В состав необходимых мероприятий и технических решений целесообразно включить:

- проведение необходимого учета использования подземных вод;
- установление запрещающих правил на использование подземных вод для технических нужд промышленных объектов;
- строгое соблюдение установленных лимитов на использование воды;
- принятие мер по снижению отбора подземных вод на водозаборах;
- возможную дополнительную переоценку запасов подземных вод там, где не подтвердились их утвержденные запасы;
- закрытие и тампонаж бездействующих водозаборных скважин.
- зарещение сброса загрязненных сточных вод в поглощающие водоносные горизонты, которые имеют тесную гидравлическую взаимосвязь с горизонтами, которые используются для питьевого водоснабжения;
- отвод загрязненного поверхностного стока в специально отведенные накопители;
- устройство гидроизоляции тех сооружений, которые могут явиться потенциальными источниками загрязнения подземных вод;
- организацию геоэкологического мониторинга за гидродинамическими и гидрогеохимическими приоритетными показателями водоносных горизонтов, которые эксплуатируются для питьевых целей.

Для разработки и реализации необходимого комплекса мероприятий и технических решений по обеспечению качества подземных вод на водозаборах Нарского месторождения ставилась задача по оценке защищенности подземных вод каменноугольных отложений от поверхностного загрязнения [4, 5]. В частности, для определения размера ЗСО учитываться должны не только гидрогеологические условия,

но и естественная защищенность подземных вод от источников поверхностного загрязнения.

Защищенность подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта определяется интенсивностью поступления в него загрязненных вод с поверхности земли. В количественном отношении степень защищенности водоносного горизонта оценивается по времени движения загрязнений от поверхности земли до кровли эксплуатируемого водоносного горизонта через толщу перекрывающих пород. Время достижения подземных вод загрязняющих вод зависит от мощности, геофильтрационных свойств, пористости перекрывающих пород, градиента напора при вертикальной фильтрации и т.д. При оценке степени защищенности большое значение имеют вид загрязнений и его масштабы [6, 7].

Для приближенной оценки степени защищенности водоносного горизонта на исследуемом участке водозабора был проведен анализ гидрогеологических условий и выполнены расчеты по оценке времени достижения потенциально опасных и загрязненных поверхностных вод t'_r просачивания потенциально опасного загрязнения в водоносный горизонт по зависимости [8, 9]:

$$t'_r = \frac{n'_r \cdot m_r'^2}{k'_r \cdot \Delta H'},$$

где t'_r – время достижения загрязненных вод в водоносный горизонт, сут.; n'_r – активная пористость водоупорных или слабопроницаемых пород; k'_r – средний коэффициент вертикальной фильтрации водоупорных пород (принимался за 10^{-5} м/сут.); m'_r – мощность защитного водоупора, м.

При оценке защищенности водоносного горизонта и для расчета времени проникновения загрязненных вод в водоносный горизонт каменноугольных отложений принимались следующие исходные данные (табл. 2).

Произведенные расчеты показали, что время просачивания для исследуемой скважины составило 56206 суток. Это позволяет говорить о том, что рассчитанные значения превышают срок выживаемости микробных организмов (около 200 суток), поэтому исключалась возможность их проникновения с поверхности земли. Согласно расчетам по времени просачивания

Таблица 2. Исходные данные для расчета времени проникновения потенциально опасных загрязненных вод

Table 2. Initial data for calculating the time of penetration of potentially hazardous polluted water

№ скважины / Well №	$H', \text{ м} / H', \text{ m}$	$H, \text{ м} / H, \text{ m}$	$\Delta H', \text{ м} / \Delta H', \text{ m}$	$k'_r, \text{ м/сут} / k'_r, \text{ m/day}$	$m'_r, \text{ м} / m'_r, \text{ m}$	n'_r
1-Н	163,0	143,6	19,4	10^{-5}	46,7	0,005

загрязняющих веществ с поверхности земли, превышающего сроки выживаемости микроорганизмов, рекомендуется установить первый пояс зоны санитарной охраны не менее 15 м от скважины. В связи с тем, что исследуемый водозабор менее защищен и существенно зависит от гидрогеологических условий залегания подземных вод, мощности слабопроницаемых отложений, их фильтрационных параметров и литологического состава, были приняты рекомендации по улучшению качества питьевой воды. С этой целью на водозаборе предложено установить комплексную водоподготовку, после которой вода будет отвечать санитарным нормам [10-12].

В ходе исследований было выявлено, что подземные воды Наро-Фоминского района, эксплуатирующие каширский водоносный горизонт, недостаточно защищены в связи с отсутствием региональных выдержанных водоупоров, что сказывается на качестве питьевых вод. В связи с недостаточной защищенностью водоносного горизонта рекомендуется предложить дополнительный комплекс мероприятий для обеспечения хорошего качества воды, в состав которого можно включить следующее:

- отбор воды снизить до $100 \text{ м}^3/\text{сут.}$;
- исключить эксплуатацию подземных вод в непосредственной близости водоемов для недопущения загрязнения подземных вод с проникновением поверхностных вод;
- скважины глубиной менее 100 м в пределах г. Наро-Фоминска использовать исключительно в хозяйственно-бытовых целях, если же воды используются для питьевого водоснабжения, необходимо устанавливать систему водоочистки;
- для целей питьевого водоснабжения использовать скважины менее 100 м, пробуренные на каширский горизонт, только в тех случаях, когда воды защищены келловей-кимериджскими и ростиславльскими глинами;
- для целей питьевого водоснабжения использовать скважины более 100 м, пробуренные на алексинско-протвинский водоносный горизонт.

Таким образом, в связи со строительством новых крупных микрорайонов и жилых комплексов в г. Наро-Фоминске Московской области проблема питьевого водоснабжения становится особенно актуальной. Поэтому обеспечение этой области питьевой водой является

первостепенной задачей, которую можно решать за счет комплекса природоохранного и технического характера. В ходе исследований были детально изучены и проанализированы материалы экологических, геоэкологических, геолого-съемочных, комплексных геолого-гидрогеологических работ и специальных гидрогеологических исследований.

Выводы

На основе анализа проведенных исследований дана характеристика гидродинамического и гидрогеохимического режимов основных эксплуатируемых водоносных горизонтов, в том числе качества подземных вод исследуемого района. Было выявлено повышенное природное содержание отдельных компонентов, которое связано в первую очередь с литологическими особенностями водосодержащих отложений. Природное ожелезнение карбонатных пород в условиях неустойчивой окислительно-восстановительной обстановки предопределяет повышенное содержание в подземных водах железа. С превышением концентраций железа в большинстве случаев связано несоответствие качества подземных вод по показателю цветности. Повышенное содержание стронция обусловлено присутствием целестины, встречающегося в каменноугольных отложениях. Высокие уровни α -радиоактивности являются следствием природного процесса изотопного обмена между водной фазой и водовмещающими породами.

По результатам количественной оценки защищенности выявлено, что исследуемый водозабор каширского горизонта имеет невысокую степень защищенности. Произведенные расчеты показали, что время проникновения загрязненных вод через слабопроницаемые породы составляет больше 200 суток. Это дает возможность отметить, что вероятность проникновения загрязнений с поверхности земли исключается.

С целью наиболее лучшей защищенности от поступления источников загрязнения с поверхности земли рекомендуется устанавливать первый пояс зоны санитарной охраны радиусом не менее 15 м от скважины. Второй пояс санитарной охраны, согласно проведенным подсчетам, составляет радиус 116 м, что позволяет полностью исключить бактериологическое загрязнение. В радиусе третьего пояса (819 м) активные источники химического загрязнения не должны быть выявлены.

Список использованных источников

1. Боровский Б.В., Язвин А.Л. Новые принципы методики оценки эксплуатационных подземных вод в районах интенсивной эксплуатации (на примере Московского региона) // Разведка и охрана недр. 2012. № 11. С. 5-10.
2. Зекцер И.С. Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод. М.: Научный мир, 2012. 374 с.
3. Гавич И.К. Гидрогеодинамика: учебник для вузов. М.: Недра, 1988. 349 с.
4. Карпенко Н.П. Анализ защитных свойств пород зоны аэрации и оценка защищенности грунтовых вод в зоне сброса загрязняющих стоков // Природообустройство. 2014. № 2. С. 70-74.
5. Карпенко Н.П., Ломакин И.М. Экологические особенности использования водных ресурсов для питьевого водоснабжения Московского региона // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 130-летию Н.И. Вавилова, 5-7 декабря 2017 г. Доклады ТСХА. 2018. Вып. 290. Ч. 2. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2018. С. 57-59.
6. Карпенко Н.П., Ломакин И.М., Дроздов В.С. Вопросы управления геоэкологическими рисками при оценке качества подземных вод на урбанизированных территориях // Природообустройство. 2019. № 5. С. 106-111.
7. Карпенко Н.П., Ломакин И.М., Дроздов В.С. Гидрогеология и основы геологии: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2018. 328 с.
8. Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. М.: ВНИИ «ВОДГЕО», 1983. 102 с.
9. Оценка эксплуатационных запасов питьевых и технических подземных вод по участкам недр, эксплуатируемым одиночными водозаборами: Методические рекомендации. М.: ЗАО «ГИДЭК», 2002. 95 с.
10. Классификация запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод. М.: МПР РФ, 2007. 8 с.
11. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Минздрав России, 2001. 156 с.
12. СанПиН 2.1.4.1110-02. Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения. М.: Минздрав России, 2002. 136 с.

Об авторе

Нина Петровна Карпенко, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, SPIN-код: 3054-6462, AuthorID: 532745; <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X>; npkarpenko@yandex.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Карпенко Н.П. 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 20.02.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 01.10.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 01.10.2024

References

1. Borevsky B.V., Yazvin A.L. New principles of the methodology for assessing operational groundwater in areas of intensive exploitation (on the example of the Moscow region) // Exploration and protection of subsoil. 2012. No. 11. P. 5-10.
2. Zektser I.S. Underground runoff and fresh groundwater resources. M.: Scientific world. 2012. 374 p.
3. Gavich I.K. Hydrogeodynamics: Textbook for universities. M.: Nedra. 1988. 349 p.
4. Karpenko N.P. Analysis of the protective properties of rocks in the aeration zone and assessment of the protection of groundwater in the discharge zone of polluting effluents // Prirodoobustroystvo. 2014 No. 2. P. 70-74.
5. Karpenko N.P., Lomakin I.M. Ecological features of the use of water resources for drinking water supply in the Moscow region. – Materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 130th anniversary of N.I. Vavilov, December 5-7, 2017. TLC reports. Issue 290. Part 2.M.: RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev. 2018. P. 57-59.
6. Karpenko N.P., Lomakin I.M., Drozdov V.S. Issues of geoecological risk management in assessing groundwater quality in urbanized territories // Prirodoobustroystvo. 2019. No. 5. P. 106-111.
7. Karpenko N.P., Lomakin I.M., Drozdov V.S. Hydrogeology and fundamentals of geology: textbook, manual. Moscow: INFRA-M. 2018. 328 p.
8. Recommendations on hydrogeological calculations for determining the boundaries of sanitary protection zones for underground sources of household and drinking water supply. M.: VNI VODGEO. 1983. 102 p.
9. Assessment of operational reserves of drinking and technical groundwater for subsurface areas operated by single intakes. Methodological recommendations. M.: CJSC GIDEX. 2002. 95 p.
10. Classification of reserves and forecast resources of drinking, technical and mineral groundwater. Moscow: MPR RF 2007. 8 p.
11. SanPiN 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic requirements for the water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. M.: Ministry of Health of Russia. 2001. 156 p.
12. SanPiN 2.1.4.1110-02 «Zones of sanitary protection of water supply sources and water pipes for household and drinking purposes». Moscow: Ministry of Health of the Russian Federation. 2002. 136 p.

About the author

Nina P. Karpenko, DSc (Eng), leading researcher, SPIN-код: 3054-6462, AuthorID: 532745; <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X>; npkarpenko@yandex.ru

Karpenko N.P. has carried out theoretical and practical research, on the basis of which she summarized and wrote the manuscript, she has copyright on the article and is responsible for plagiarism.

Оригинальная статья
<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-97-103>
УДК 532.542/.551



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ТЕПЛОПРОВОДА ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

М.В. Павлов[✉], Д.Ф. Карпов

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

Аннотация. На стадии проектирования инженерных сетей важным вопросом остается выбор диаметров трубопроводной системы с минимальными капитальными вложениями на транспортировку рабочей среды от источника до потребителей. Цель исследований – определить диаметр теплопровода, при котором достигается максимальная экономия денежных средств на транспортировку теплоносителя для заданных условий. На основе классических законов гидравлики и теплообмена с помощью программных вычислений получено расчетное уравнение, которое позволяет определять диаметр теплопровода при оптимальном соотношении денежных затрат на электрическую и тепловую энергию. Конечная формула учитывает такие важные эксплуатационные параметры, как расход теплоносителя, шероховатость трубопровода и местные гидравлические сопротивления, тарифы на тепловую и электрическую энергию и др. На примере магистрального участка трубопроводов системы централизованного теплоснабжения, расположенной в г. Вологде (Российская Федерация), получено программное решение предложенного в статье уравнения. Установлено, что при массовом расходе теплоносителя 32,9 т/ч оптимальный диаметр стального электросварного трубопровода составляет 76 × 3 мм. С учетом текущих тарифов на тепловую и электрическую энергию денежные затраты на транспортировку теплоносителя за отопительный период года составили 4912 руб. на 1 пог. м трубопровода. Для сравнения при диаметре трубопровода 57 × 3 мм удельные денежные затраты оказались равными 7887 руб., а при 89 × 3,5 мм – 5524 руб. Для рассматриваемого в статье случая получена зависимость между оптимальным диаметром трубопровода и массовым расходом теплоносителя.

Ключевые слова: оптимальный диаметр трубопровода, расход жидкости, теплопровод, теплоноситель, оптимизационная задача

Формат цитирования: Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Определение оптимального диаметра теплопровода путем решения оптимизационной задачи // Природообустройство. 2025. № 1. С. 97-103. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-97-103>

Scientific article

DETERMINATION OF THE OPTIMAL DIAMETER OF THE HEAT PIPE BY SOLVING THE OPTIMIZATION PROBLEM

M.V. Pavlov[✉], D.F. Karpov

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

Abstract. At the design stage of engineering networks, an important issue remains the choice of diameters of the pipeline system with minimal capital investments for transporting the working medium from the source to consumers. The purpose of the study is to determine the diameter of the pipeline, which achieves maximum savings in money for the transportation of heat carrier for specified conditions. Based on the classical laws of hydraulics and heat transfer, a computational equation has been obtained using software calculations, which allows determining the diameter of a heat pipeline with an optimal ratio of monetary costs for electrical and thermal energy. The final formula takes into account such important operational parameters as heat carrier flow, pipeline roughness and local hydraulic resistances, tariffs for thermal and electrical energy, etc. Using the example of the main pipeline section of the district heating system located in the city of Vologda (Russian Federation), a software solution of the equation proposed in the article is obtained. It was found that with a mass flow rate of 32.9 t/h, the optimal diameter of the steel electric-welded pipeline is 76×3 mm. Taking into account the current tariffs for thermal and electric energy, the monetary costs of transporting the heat carrier for the heating period of the year amounted to 4912 rubles per 1 cubic meter of pipeline. For comparison, with a pipeline diameter of 57×3 mm, the unit cash

costs turned out to be 7887 rubles, and with 89×3.5 mm – 5524 rubles. For the case considered in the article, the dependence between the optimal diameter of the pipeline and the mass flow rate of the heat carrier is obtained.

Keywords: optimal diameter of pipeline, flow rate of liquid, heat pipeline, heat carrier, optimization task

Format of citation: Pavlov M.V., Karpov D.F. Determination of the optimal diameter of the heat pipeline by solving the optimization problem // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 97-103. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-97-103>

Введение. В основе проектирования инженерных сетей, по которым движется рабочая среда (водяной пар, горячая вода, природный газ и т.п.), лежит конструкторский гидравлический расчет трубопроводов, одной из целей которого является определение диаметров участков. От размера трубопровода зависят его проходное сечение и площадь боковой поверхности. В первом случае выбор диаметра трубопровода окажет влияние на скорость движения потока, и как следствие – на линейные и местные гидравлические потери напора (давления) на участке трубопровода. Во втором случае, если в качестве рабочей среды выступает теплоноситель, диаметр трубопровода будет напрямую определять величину тепловых потерь в окружающую среду. Ситуация усложняется еще и тем, что это два взаимоисключающих фактора: уменьшение диаметра трубопровода приведет не только к значительному росту гидравлических потерь напора (давления) на участке, но и к снижению тепловых потерь через его боковую поверхность.

Существуют различные подходы и основанные на них методы и методики определения оптимальных диаметров трубопроводов.

Гидравлический расчет трубопроводов может строиться на следующем физическом принципе [1]: при установившемся движении жидкости располагаемый перепад давлений должен полностью расходоваться на преодоление сопротивления движению. В теплоснабжении зарекомендовала себя другая классическая методика гидравлического расчета трубопроводов [2, 3], которая заключается в следующем: 1) предварительно задаются оптимальными удельными потерями давления на трение в главном магистральном кольце (не более 80 Па / м); 2) после определения суммарных гидравлических потерь давления в системе централизованного теплоснабжения внутренний диаметр трубопровода находят по формуле:

$$d_{\text{вн}} = \frac{74G^{0,38}}{R^{0,19}}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где G – массовый расход теплоносителя на расчетном участке, т/ч; R – удельные потери давления на трение, Па/м.

При определении оптимального диаметра газопровода могут учитываться затраты электрической энергии на преодоление гидравлического сопротивления газопроводной системы, амортизационные отчисления и оборотные средства за ремонт и обслуживание [4].

В статье [5], при ссылке на формулу Ф.А. Шевелева для проектирования систем водоснабжения, предлагается осуществлять выбор диаметров трубопроводов с учетом рыночных методов определения эффективности инвестиций. При этом критерием для оценки должен служить приведенный или чистый дисконтированный доход ЧДД (NPV). Метод определения оптимального диаметра трубопровода для систем водоснабжения применительно к полиэтиленовым трубопроводам (ПЭТ) также должен учитывать затраты энергии на работу центробежного насоса [6].

В работе [7] предлагается определять диаметр магистрального паропровода следующим образом (приведены оригинальные обозначения физических величин в уравнении):

$$D_p = \sqrt{\frac{4D\vartheta}{\Pi c}}, \text{ м}, \quad (2)$$

где D – производительность котла, кг/с; ϑ – удельный объем водяного пара, м³/кг, который зависит от среднего давления в паропроводе; Π – число Пн; c – скорость подачи водяного пара, м/с.

Оптимальный диаметр трубопровода тепловой сети, исходя из суммарных энергетических затрат на транспортировку теплоносителя (включают в себя затраты электрической энергии на транспортировку теплоносителя по тепловым сетям и потери тепловой энергии через тепловую изоляцию), может быть рассчитан по эмпирической формуле (приведены оригинальные обозначения физических величин в уравнении) [8]:

$$d = 1,128\sqrt{Q}, \text{ м}, \quad (3)$$

где Q – объемный расход теплоносителя, м³/с.

Способ определения оптимальных диаметров трубопроводов для зависимых систем теплоснабжения, обеспечивающих минимум суммарных потерь энергии и равенство

запаздывания транспортировки теплоносителя по линиям между котельными и теплопередающими станциями, рассмотрен в работе [9]. С помощью компьютерных технологий производится выбор диаметров трубопроводов тепловой сети с минимумом стоимости 1 МДж суммарных потерь энергии в течение отопительного сезона.

Исходя из эксплуатационных энергетических затрат на топливо для нагрева теплоносителя и электрическую энергию для его транспортировки по системе трубопроводов, авторы в статье [10] предлагают следующую формулу для определения оптимального диаметра трубопровода (приведены оригинальные обозначения физических величин в уравнении):

$$d_{\text{опт}} = \sqrt[6.25]{\frac{5,25 A_r G^3 (l + l_{\text{экв}})}{3600 \eta_n q_d \beta}}, \text{ м}, \quad (4)$$

где A_r – коэффициент, зависящий от эквивалентной шероховатости трубопровода, $\text{м}^{0.25}$; G – расход теплоносителя на участке, $\text{м}^3 / \text{ч}$; l – длина участка трубопровода, м; $l_{\text{экв}}$ – эквивалентная длина участка трубопровода, м; η_n – коэффициент полезного действия (КПД) сетевого насоса; q_d – плотность теплового потока через тепловую изоляцию трубопровода, $\text{Вт} / \text{м}^2$; β – коэффициент, учитывающий тепловые потери от запорной арматуры.

С одной стороны, все перечисленные способы определения оптимальных диаметров трубопроводов, в частности, для нужд централизованного теплоснабжения, учитывают как гидравлическую, так и тепловую составляющие при транспортировке теплоносителя. С другой стороны, в расчетных формулах отсутствуют такие важные параметры, как текущие тарифы на тепловую и электрическую энергию, температура теплоносителя и окружающей среды, зависимость их физических свойств от температуры и т.п. Авторы статьи понимают, что при учете не только главных, но и второстепенных факторов конечное уравнение станет громоздким, и как следствие – сложным для выполнения

гидравлических расчетов. С применением систем автоматизированного проектирования подобные расчеты реализуются за максимально короткий срок с получением результата, имеющего высокую точность. При этом вывод подобных уравнений также осуществляется с привлечением систем компьютерной алгебры.

Цель исследований: определить диаметр трубопровода, при котором достигается максимальная экономия денежных средств на транспортировку теплоносителя для заданных условий.

Материалы и методы исследований. Для решения оптимизационной задачи на рисунке 1 представлена расчетная схема теплопровода.

Горизонтальный теплопровод 1 круглого сечения (рис. 1), выполненный из теплопроводного материала (металла), имеет внутренний и наружный диаметры – соответственно $d_{\text{вн}}$ и $d_{\text{н}}$. При этом допустимо принять следующее геометрическое условие: $\frac{0,5(d_{\text{н}} - d_{\text{вн}})}{d_{\text{вн}}} \approx 0$, то есть $d_{\text{н}} \approx d_{\text{вн}}$. Геометрическая длина теплопровода 1 известна и равна l .

Теплоноситель 2, движущийся сплошным потоком по теплопроводу 1, имеет температуру τ и постоянный массовый расход G . Наружная поверхность теплопровода 1 имеет температуру t_c . При этом допустимо считать, что для стенки теплопровода 1 малой толщины с высоким коэффициентом теплопроводности λ справедливо следующее соотношение: $\frac{0,5(d_{\text{н}} - d_{\text{вн}})}{\lambda} \approx 0$, то есть $t_c \approx \tau$.

Между наружной поверхностью стенки теплопровода 1 и окружающей средой, имеющей температуру t_n , происходит конвективный теплообмен при стационарных условиях $t_c > t_n$.

Определение внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}$ теплопровода 1 сводится к решению оптимизационной задачи. Если для заданных условий

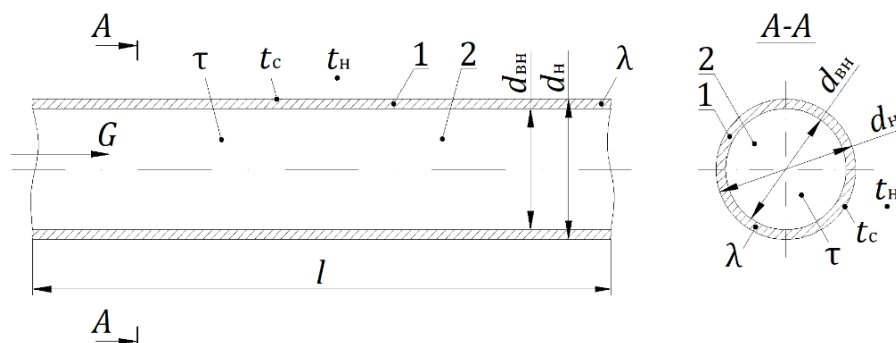


Рис. 1. Расчетная схема теплопровода круглого сечения:

1 – теплопровод; 2 – теплоноситель

Fig. 1. Design diagram of a circular heat pipeline:

1 – heat pipeline; 2 – heat carrier

выбрать теплопровод 1 с большим диаметром $d_{\text{вн}}$, то с увеличением площади поверхности теплообмена возрастут линейные потери тепловой энергии в окружающую среду, имеющую температуру $t_{\text{н}}$. В дальнейшем это скажется на увеличении требуемой толщины тепловой изоляции. С другой стороны, при заданном массовом расходе G скорость теплоносителя 2 должна закономерно уменьшиться, что приведет к снижению гидравлических потерь напора (давления) на участке теплопровода 1. Как следствие, сократятся затраты электрической энергии на работу насоса, предназначенного для транспортировки теплоносителя 2. Рассматривая обратный случай, то есть уменьшение внутреннего диаметра трубопровода $d_{\text{вн}}$, получим противоположный результат.

Исходя из вышеизложенных рассуждений формула для определения денежных затрат на транспортировку теплоносителя 2 по горизонтальному теплопроводу 1 с учетом гидравлической и тепловой составляющих будет иметь следующий вид (рис. 1):

$$Z \approx k_3 \frac{\gamma V \Delta h}{\eta} \Delta z T_{\text{э}} + \pi \alpha d_{\text{вн}} (\tau - t_{\text{н}}) l \Delta z T_{\text{т}}, \text{ руб.},$$

$$d_{\text{н}} \approx d_{\text{вн}}, t_{\text{с}} \approx \tau, \quad (5)$$

где k_3 – коэффициент запаса мощности, учитывающий случайные перегрузки электродвигателя насоса; γ – удельный вес теплоносителя 2, Н/м^3 ; V – объемный расход теплоносителя 2 на участке теплопровода 1, $\text{м}^3/\text{с}$; Δh – гидравлические потери напора на участке теплопровода 1, м вод.ст. ; η – коэффициент полезного действия (КПД) насоса; Δz – продолжительность эксплуатации теплопровода 1, с; $T_{\text{э}}$ – тариф на электрическую энергию, руб./Дж ; α – коэффициент конвективного теплообмена между наружной поверхностью теплопровода 1 и окружающей средой, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр теплопровода 1, м; τ – температура теплоносителя 2, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{н}}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; l – геометрическая длина теплопровода 1, м; $T_{\text{т}}$ – тариф на тепловую энергию, руб./Дж ; $d_{\text{н}}$ – наружный диаметр теплопровода 1, м; $t_{\text{с}}$ – температура наружной поверхности теплопровода 1, $^{\circ}\text{C}$.

После математических преобразований уравнение (5) примет вид:

$$Z \approx \frac{0,88 k_3 G^3}{\pi^2 \rho_{\text{ж}}^2 \eta d_{\text{вн}}^5} \left(\frac{k_3}{d_{\text{вн}}} + \frac{17 \pi \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} d_{\text{вн}}}{G} \right)^{0,25} (1 + \alpha_{\text{м.с}}) l \Delta z T_{\text{э}} +$$

$$+ 0,46 \pi \left(\frac{g \beta_{\text{в}}}{v_{\text{в}}^2} \right)^{0,25} (\tau - t_{\text{н}})^{1,25} d_{\text{вн}}^{1,75} l \Delta z T_{\text{т}}, \text{ руб.}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность теплоносителя 2, кг/м^3 ; G – массовый расход теплоносителя 2 на участке теплопровода 1, кг/с ; k_3 – эквивалентный коэффициент шероховатости теплопровода 1, м; $v_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость теплоносителя 2, $\text{м}^2/\text{с}$; $\alpha_{\text{м.с}}$ – доля местных гидравлических сопротивлений на участке теплопровода 1 относительно линейных гидравлических потерь напора; $\beta_{\text{в}}$ – температурный коэффициент объемного расширения окружающей среды, $1/\text{К}$; $v_{\text{в}}$ – кинематическая вязкость окружающей среды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Как следует из уравнения (6), искомая величина Z при заданных геометрических, гидравлических и тепловых условиях является функцией одной переменной – внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}$. Для нахождения экстремума функции $Z = Z(d_{\text{вн}})$ (минимума или максимума) найдем ее первую производную и приравняем полученный результат к нулю, то есть $\frac{dZ}{d(d_{\text{вн}})} = 0$:

$$2,53 \left(\frac{g \beta_{\text{в}}}{v_{\text{в}}^2} \right)^{0,25} (\tau - t_{\text{н}})^{1,25} d_{\text{вн}}^{0,75} T_{\text{т}} =$$

$$= \left[\frac{0,45 \left(\frac{k_3}{d_{\text{вн}}} + \frac{53,4 \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} d_{\text{вн}}}{G} \right)^{0,25}}{\eta \rho_{\text{ж}}^2 d_{\text{вн}}^6} + \right.$$

$$\left. + \frac{0,022 \left(\frac{k_3}{d_{\text{вн}}} - \frac{53,4 \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}}}{G} \right)}{\eta \rho_{\text{ж}}^2 d_{\text{вн}}^5 \left(\frac{k_3}{d_{\text{вн}}} + \frac{53,4 \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} d_{\text{вн}}}{G} \right)^{0,75}} \right] \times$$

$$\times k_3 G^3 (1 + \alpha_{\text{м.с}}) T_{\text{э}}. \quad (7)$$

Итоговое уравнение (7) записано в неявном виде, так как переменная величина $d_{\text{вн}}$ присутствует как в левой, так и в правой частях выражения.

Рассмотрим решение уравнения (7) на примере магистрального участка трубопроводов системы централизованного теплоснабжения, расположенной в г. Вологде (Российская Федерация).

Исходные данные для выполнения расчета:

1. Параметры теплопровода. С целью определения удельных денежных затрат на транспортировку теплоносителя (на 1 пог.м) условно примем геометрическую длину теплопровода: $l = 1$ м. В соответствии с СП 124.13330.2012 «Тепловые сети» эквивалентная шероховатость внутренней поверхности нового стального электросварного трубопровода для водяных тепловых сетей – $k_3 = 0,5$ мм. В системах централизованного теплоснабжения доля местных гидравлических потерь напора обычно принимается равной $\alpha_{\text{м.с}} = 0,3$.

2. Параметры теплоносителя. В качестве теплоносителя используется горячая вода. Средняя за отопительный период температура сетевой воды в подающем теплопроводе согласно отопительно-бытовому температурному графику ($130^{\circ}\text{C}/70^{\circ}\text{C}$) составляет: $\tau = 72,3^{\circ}\text{C}$. Расчетный массовый расход теплоносителя – $G = 32,9$ т/ч. Плотность и кинематическая вязкость воды, соответственно, $\rho_{\text{ж}} = 976,53$ кг/м^3 и $v_{\text{ж}} = 0,403 \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^2/\text{с}$.

3. Параметры окружающей среды. Средняя за отопительный период температура наружного воздуха для условий г. Вологды согласно данным СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» составляет: $t_n = -4,0^\circ\text{C}$. Кинематическая вязкость и температурный коэффициент объемного расширения воздуха, соответственно, $\nu_v = 13,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\beta_v = 3,715 \cdot 10^{-3} 1/\text{K}$.

4. Параметры эксплуатации. Продолжительность отопительного сезона для г. Вологды, по данным СП 131.13330.2020 «Строительная климатология», $\Delta z = 226$ сут. КПД сетевого насоса марки K45/55 в его рабочей точке $\eta = 59,2\%$. Коэффициент запаса мощности $k_z = 1,25$. Тарифы на тепловую и электрическую энергию (I квартал 2024 г.), соответственно, $T_{тз} = 2182,80 \text{ руб}/\text{Гкал}$ и $T_{эз} = 5,85 \text{ руб}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$.

По результатам программных вычислений внутренний диаметр теплопровода составил: $d_{вн} \approx 68,3 \text{ мм}$. В соответствии с ГОСТ 10704-91 принимаем стальной электросварной трубопровод с ближайшим большим размером: $d_n \times \delta = 76 \times 3 \text{ мм}$ ($d_y = 70 \text{ мм}$).

На рисунке 2 представлен график зависимости денежных затрат на транспортировку теплоносителя по горизонтальному трубопроводу (на 1 пог.м) от выбранного диаметра теплопровода.

Как следует из данных рисунка 2, диаметр теплопровода $d_y = 70 \text{ мм}$ проходит через точку минимума функции $Z = Z(d_y)$ (графическое подтверждение точки минимума). Как показали результаты программных вычислений,

$\frac{d^2 Z}{d(d_{вн})^2} > 0$, что является аналитическим подтверждением точки минимума. Уменьшение внутреннего диаметра теплопровода $d_{вн}$ и, как следствие, площади проходного сечения приведет к значительному росту скорости потока $w \sim \frac{1}{d_{вн}^2}$

и гидравлическим потерям напора $\Delta h \sim w^2$. До точки минимума $d_y = 70 \text{ мм}$ график функции $Z = Z(d_{вн})$ представляет собой гиперболу с высокой скоростью падения, так как согласно уравнению (6), $Z \sim \frac{1}{d_{вн}^5}$. Напротив, после координаты $d_y = 70 \text{ мм}$ начинается медленный подъем линии $Z = Z(d_y)$, что означает постепенное увеличение и впоследствии преобладание относительных денежных затрат $\delta Z_{тз}$, связанных с тепловыми потерями, над величиной $Z_{эз}$.

Для сравнения: при $d_y = 32 \text{ мм}$ – $\delta Z_{тз} = 1,8\%$ и $\delta Z_{эз} = 98,2\%$; при $d_y = 70 \text{ мм}$ – $\delta Z_{тз} = 78,0\%$ и $\delta Z_{эз} = 22,0\%$; при $d_y = 125 \text{ мм}$ – $\delta Z_{тз} = 99,5\%$ и $\delta Z_{эз} = 0,5\%$. Здесь имеет смысл указать примерное соотношение тарифов на электрическую и тепловую энергию $T_{тз} : T_{эз} \approx 1 : 3$, что говорит о преобладающем влиянии гидравлических потерь напора на величину итоговых денежных затрат Z над тепловыми потерями через стенку магистрального трубопровода.

Согласно уравнению (7) оптимальный внутренний диаметр теплопровода $d_{вн}$ зависит от многих факторов (температура и физические свойства теплоносителя и окружающей среды,

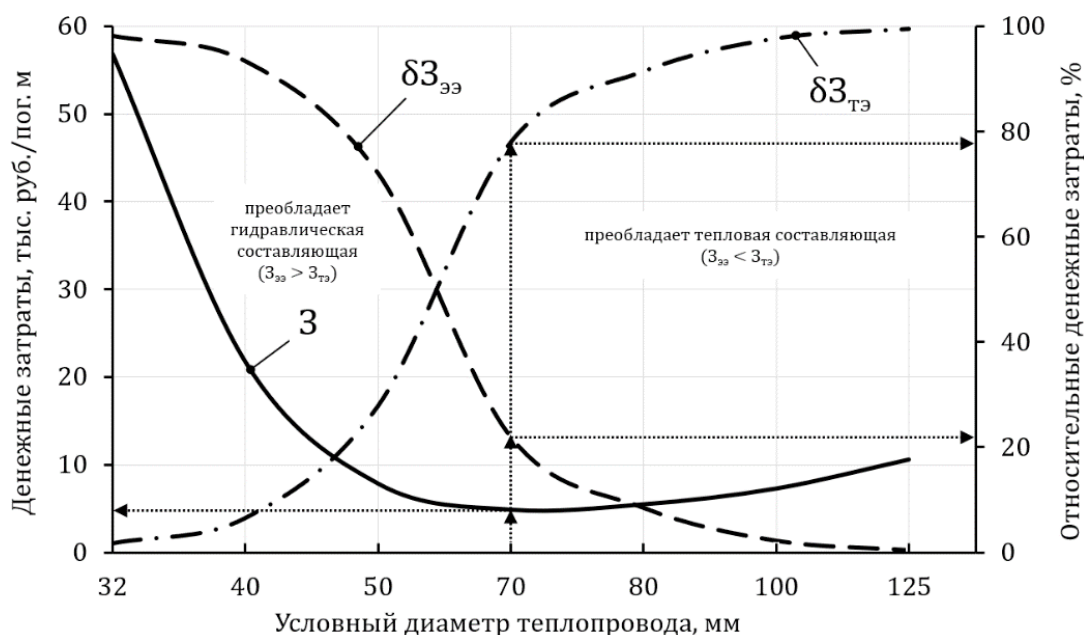


Рис. 2. Изменение денежных затрат на транспортировку теплоносителя в зависимости от диаметра теплопровода

Fig. 2. Change in cash costs for transportation of heat carrier depending on the diameter of the heat pipeline

шероховатость внутренней поверхности стенки трубопровода и т.п.). Тем не менее основным параметром, определяющим размер трубопровода, является массовый G (или объемный V) расход теплоносителя. На рисунке 3 представлен график для определения оптимального внутреннего диаметра теплопровода $d_{\text{вн}}$ при известном массовом расходе теплоносителя G .

Уравнение, соответствующее линии тренда на рисунке 3, является полиномом третьей степени, который имеет вид:

$$d_{\text{вн}} = aG^3 + bG^2 + cG + d, \text{ мм}, R^2 = 0,9866, \quad (8)$$

где $a = 2,087995 \cdot 10^{-4}$, $b = -0,041454$, $c = 3,128319$, $d = 5,435112$ – параметры уравнения; G – массовый расход теплоносителя, т/ч.

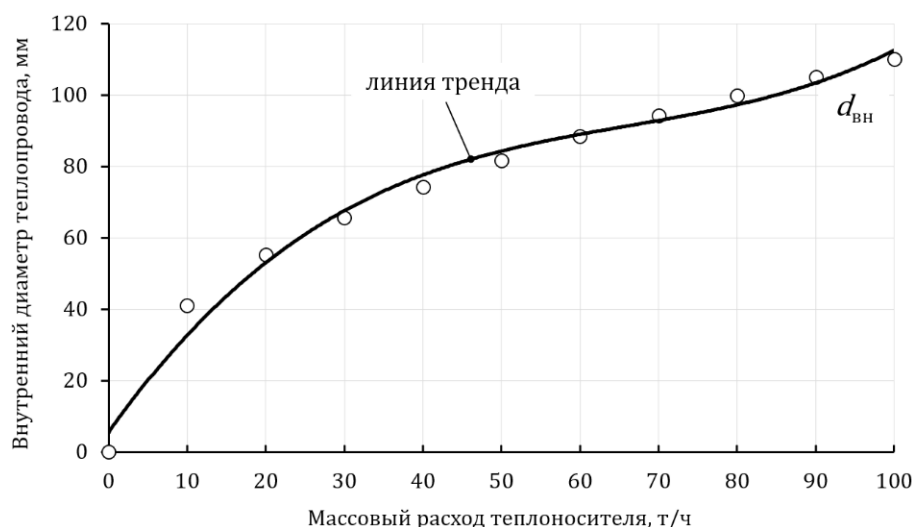


Рис. 3. Зависимость внутреннего диаметра теплопровода от массового расхода теплоносителя
Fig. 3. Dependence of the internal diameter of the heat pipeline on the mass flow rate of the heat carrier

Выводы

Предложенный программный метод определения оптимального диаметра теплопровода позволяет учитывать большое количество факторов: расход теплоносителя; среднюю температуру теплоносителя и окружающей среды за расчетный период; текущие тарифы на тепловую и электрическую энергию и др. При ключевом исходном параметре – массовом расходе теплоносителя $G = 32,9$ т/ч – выбран размер трубопровода $d_{\text{н}} \times \delta = 76 \times 3$ мм ($d_{\text{вн}} = 70$ мм). В этом случае денежные затраты на транспортировку теплоносителя (с энергетической точки зрения) за отопительный период года оказались минимальными

В соответствии с данными рисунка 3 среднее квадратическое отклонение значений оптимального внутреннего диаметра теплопровода $d_{\text{вн}}$, полученных по уравнению (8), от результатов программных вычислений ($\circ$) по формуле (7) при объеме выборки $n = 11$ составило: $S_0 = 3,768$ мм.

Для массового расхода теплоносителя $G = 32,9$ т/ч расчетный внутренний диаметр теплопровода по уравнению (8) составил: $d_{\text{вн}} \approx 70,9$ мм. Уравнение (8) является частным решением, так как значения входящих в него параметров напрямую зависят от предварительно заданных геометрических, гидравлических и тепловых условий.

и составили 4912 руб. на 1 пог.м трубопровода (в долевом соотношении на тепловую энергию пришлось 78,0%, на электрическую – 22,0%). Для сравнения: при $d_{\text{вн}} = 50$ мм денежные затраты оказались равными 7887 руб. на 1 пог.м трубопровода (тепловая и электрическая энергия – соответственно 27,9 и 72,1%), при $d_{\text{вн}} = 80$ мм – 5524 руб. на 1 пог.м трубопровода (соответственно 91,5 и 8,5%).

Уравнение (7) является универсальным и может применяться для заданных условий при проектировании инженерных сетей, в которых рабочей средой выступает теплоноситель (водяной пар или горячая вода).

Список использованных источников

1. Богословский В.Н. Отопление. Учебник / В.Н. Богословский, А.Н. Сканави. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.
2. Козин В.Е. Теплоснабжение: учебник / В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.П. Марков, И.Б. Пронина, В.А. Слемзин. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.

References

1. Bogoslovskij V.N., Skanavi A.N. Heating. Textbook. Moscow: Stroyizdat, 1991. 735 p.
2. Kozin V.E. Heat supply. Textbook / Levina T.A., Markov A.P., Pronina I.B., Slemzin V.A. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 408 p.

3. Ионин А.А. Теплоснабжение. Учебник / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая. М.: Стройиздат, 1982. 336 с.

4. Голованчиков А.Б. Сравнительный расчет оптимального диаметра трубопровода для природного газа, нефти и полимерного раствора / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, Т.А. Дулькин // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2020. № 1 (30). С. 47-51.

5. Кузьмин В.В. К определению экономически оптимального диаметра трубопровода в современных условиях // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 1 (63). С. 38-40.

6. Наумов В.А. Особенности определения оптимального диаметра при проектировании систем водоснабжения с полиэтиленовыми трубами / В.А. Наумов, А.В. Шторк // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 4 (57). С. 176-183. DOI: 10.54734/20722958_2023_4_176.

7. Kotlyarov V.S., Nussupbekov B.R., Ospanova D.A., Stoev M., Khan M.A., Karagaeva M.B. Determination of the diameter of the main steam pipelines of the supply pipelines of the Heat electric generation with a capacity of 325 MW // Bulletin of the Karaganda University. 2017. № 3 (87). Pp. 54-59. DOI: 10.31489/2017Phys3/54-59.

8. Теребилов С.В. Выбор диаметра трубопровода тепловой сети для водяных систем теплоснабжения / С.В. Теребилов, Цуканова Н.С., Петренко А.В., Седышева М.Н. // Актуальные вопросы энергетики: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Омск: ОмГТУ, 2018. С. 136-139.

9. Андреев С.Ю. Выбор оптимальных диаметров трубопроводов в задаче управления системой теплоснабжения с учетом транспортного запаздывания теплоносителя // Вестник Национального технического университета. Харьковский политехнический институт. 2005. № 46. С. 9-12.

10. Соломин И.Н. Метод определения оптимальных диаметров участков тепловой сети / И.Н. Соломин, А.З. Даминов, С.А. Еремин, Р.А. Садыков И.А., Сафин А.И. Фаизов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4 (22). С. 234-239.

3. Ionin A.A. Heat supply. Textbook / Hlybov B.M., Bratenkov V.N., Terletskaia E.N. Moscow: Strojizdat, 1982. 336 p.

4. Golovanchikov A.B., Prohorenko N.A., Duljkin T.A. Comparative calculation of the optimal diameter of the pipeline for natural gas, oil and polymer solution // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. 2020. № 1 (30). P. 47-51.

5. Kuzjmin V.V. To the determination of the economically optimal diameter of the pipeline in modern conditions // Energy saving and water treatment. 2010. № 1 (63). P. 38-40.

6. Naumov V.A., Shtork A.V. Features of determining the optimal diameter in the design of water supply systems with polyethylene pipes // Regional Architecture and Construction. 2023. № 4 (57). P. 176-183. DOI: 10.54734/20722958_2023_4_176.

7. Kotlyarov V.S., Nussupbekov B.R., Ospanova D.A., Stoev M., Khan M.A., Karagaeva M.B. Determination of the diameter of the main steam pipelines of the supply pipelines of the Heat electric generation with a capacity of 325 MW // Bulletin of the Karaganda University. 2017. № 3 (87). P. 54-59. DOI: 10.31489/2017Phys3/54-59.

8. Terebilov S.V., Cukanova N.S., Petrenko A.V., Sedysheva M.N. Choice of the diameter of the heating network pipeline for water heat supply systems // Actual issues of energy: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Omsk: OmSTU, 2018. P. 136-139.

9. Andreev S.Yu. Choice of the optimal diameters of pipelines in the problem of controlling the system of heat supply taking into account the transport delay of the heat carrier // Bulletin of the National Technical University, Kharkov Polytechnic Institute. 2005. № 46. P. 9-12.

10. Solomin I.N., Daminov A.Z., Eremin S.A., Sadykov R.A., Safin I.A., Faizov A.I. Method of determining optimal diameters of heat network sections // Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2012. № 4 (22). P. 234-239.

Об авторах

Михаил Васильевич Павлов, канд. техн. наук, доцент; 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; Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-код: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Павлов М.В., Карпов Д.Ф. 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 interest

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 13.02.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 19.12.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 19.12.2024

About the authors

Mikhail V. Pavlov, CSc (Eng), associate professor; Author ID SCOPUS: 57204361039; WoS ResearcherID: AAN-5773-2021; ORCID: 0000-0002-8687-3296; RSCI ID: 564419; SPIN-code: 6544-7267; pavlovmv@vogu35.ru

Denis F. Karpov, the applicant, senior lecturer; Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-code: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

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

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-104-110>

УДК 532.5: 628.12



ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСОВ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВОДОПОДАЧИ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ МЕМБРАННЫМИ БАКАМИ

Д.Ю. Короткоручко[✉], М.С. Али

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, Россия

Аннотация. Цель исследований – определение рабочих областей работы гидравлических мембранных баков, в том числе мощностных, независимо от характеристик насосного оборудования и объемов водопотребления, с использованием частотного преобразователя. В статье приводятся результаты испытаний системы водоподачи отдельно от бака и совместно с ним при 100%-ной частоте вращения насоса и на более низких частотах вплоть до 60%. В настоящее время гидравлические мембранные баки стали эффективным аналогом водонапорных башен для небольших хозяйств: частных домов, школ, больниц и т.д. Они позволяют грамотно контролировать работу насосного оборудования, регулируя его расход и давление, а также снижая его износ. Однако существует проблема, связанная с правильным подбором и настройкой бака, так как многие водопотребители не знают, какие конкретно расход и напор им нужны. Соответственно встает вопрос об энергоэффективности, так как неверный выбор бака может привести к существенным затратам электроэнергии, а значит, к денежным потерям. Представлены результаты испытаний мембранных баков при совместной работе без и с частотным преобразователем, приведены формулы расчета и прогнозирования областей работы таких систем, подходящие к любому баку и позволяющие рассчитать мощностные и энергетические характеристики систем водоподачи с пневмобаками и преобразователями частоты.

Ключевые слова: гидравлический бак, насос, давление, прогнозирование, частотный преобразователь, мощность, энергия

Формат цитирования: Короткоручко Д.Ю., Али М.С. Определение мощностных и энергетических характеристик насосов с регулируемой частотой вращения в системах водоподачи с гидравлическими мембранными баками // Природообустройство. 2025. № 1. С. 104-110. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-104-110>

Scientific article

DETERMINATION OF POWER AND ENERGY CHARACTERISTICS OF VARIABLE SPEED PUMPS IN WATER SUPPLY SYSTEMS WITH HYDRAULIC DIAPHRAGM TANKS

D.Y. Korotkoruchko[✉], M.S. Ali

Russian State Agrarian University- Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya, 44, Russia

Abstract. The purpose of the research is to determine the working areas of hydraulic diaphragm tanks, including high-capacity ones, regardless of the characteristics of pumping equipment and water consumption, including using a frequency converter. This article presents the test results of the water supply system separately from the tank and together with it at 100% pump speed and at lower frequencies up to 60%. Currently, hydraulic membrane tanks have become an effective analogue of water towers for small farms: private homes, schools, hospitals, etc. They allow you to properly control the operation of pumping equipment, regulating its flow rate and pressure, as well as reducing its wear. However, there is a problem with the correct selection and configuration of the tank, as many water consumers do not know what specific flow rate and pressure they need. Accordingly, the issue of energy efficiency arises – the wrong choice of tank can lead to significant energy costs, and hence to monetary losses. The article presents the test results of membrane tanks when working together without and with a frequency converter, provides formulas for calculating and predicting the areas of operation of such systems that are suitable for any tank and allow calculating the power and energy characteristics of water supply systems with pneumatic tanks and frequency converters.

Keywords: hydraulic tank, pump, pressure, forecasting, frequency converter, power, energy

Format of citation: Korotkoruchko D.Y., Ali M.S. Determination of power and energy characteristics of variable speed pumps in water supply systems with hydraulic diaphragm tanks // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 104-110. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-104-110>

Введение. Ранее [1] мы рассмотрели, в чем заключается актуальность изучения работы гидравлических баков, их правильного подбора и настройки. В данной статье перейдем непосредственно к расчетам и экспериментам.

Существующие исследования практически не рассматривают возможность и преимущества совместного использования гидравлических баков и частотных преобразователей. Они содержат главным образом обзоры и изучение таких систем по отдельности. Например, известный производитель насосов Grundfos в своем исследовании, представленном на официальном сайте, рассматривает наполненные азотом мембранные баки, в которых давление должно быть на 0,5 бар больше статического. При этом бак в данном исследовании подключается не к напорному, а к всасывающему трубопроводу с целью поглощения избыточного давления. Данные баки используются в сочетании с системой повышения давления и ее функцией «Остановки».

Другая сфера нынешних исследований работы мембранных баков – отопление. В статье [2] о потерях эксергии в грунтовом тепловом насосе данные баки упоминаются как компенсаторы давления, приводятся общие данные об их использовании в системах отопления, но не более того.

В свою очередь, частотные преобразователи встречаются в научных публикациях авторов намного чаще. Например, в статье [3] авторы рассматривают их с точки зрения анализа переходных характеристик и улучшения показателей работы осевых насосов. В другой работе [4] приводятся данные по расчету эффективности насоса с регулируемой скоростью вращения для систем подачи жидкости со статическим напором и без него. Еще одно исследование [5] показывает, сколько электроэнергии экономится при использовании частотных преобразователей.

Цель исследований: определение рабочих областей работы гидравлических мембранных баков, в том числе мощностных, независимо от характеристик насосного оборудования и объемов водопотребления, с использованием частотного преобразователя.

Материалы и методы исследований. Для проведения испытаний с целью получения расчетных данных использовалась экспериментальная установка, расположенная в лаборатории насосов Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева (рис. 1).

В первую очередь были определены рабочие характеристики насоса без бака,

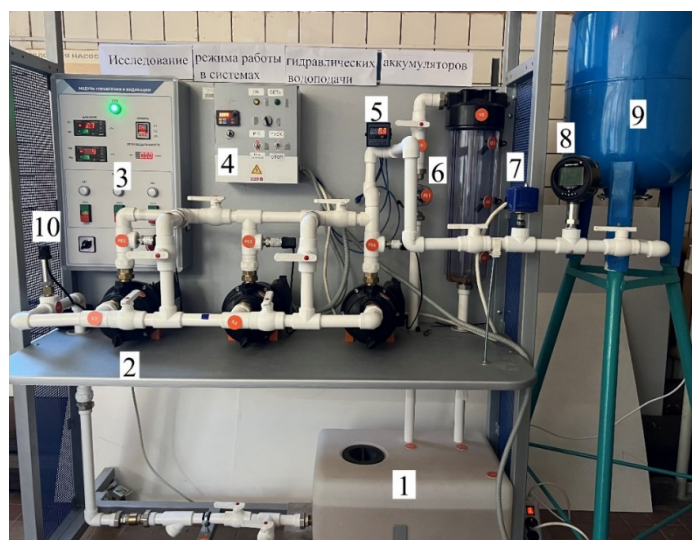


Рис. 1. Экспериментальная установка:

- 1 – резервуар с водой; 2 – центробежный насос RGJ-602P; 3 – модуль управления и индикации;
4 – преобразователь частоты; 5 – ваттметр; 6 – расходомер; 7 – реле давления;
8 – цифровой манометр; 9 – мембранный бак объемом 60 л; 10 – датчик давления

Fig. 1. Experimental installation:

- 1 – water tank; 2 – centrifugal pump RGJ-602P; 3 – control and indication module; 4 – frequency converter;
5 – wattmeter; 6 – flow meter; 7 – pressure switch; 8 – digital pressure gauge; 9-60 l diaphragm tank; 10 – pressure sensor

которые представлены на рисунке 2. Для получения более точных показателей было проведено по 10 испытаний при частотах от 100 до 50% с шагом в 5% (95, 90 и т.д.).

Затем к работе был подключен мембранный бак. Замечено, что при открытии задвижки на ведущем к баку патрубке максимальный расход насоса даже при 100%-ной частоте снизился с 30 до 23 л/мин. Это связано с тем, что часть воды уходит в трубу, и частично – в бак, фактически не наполняя его, так как показания манометра перед баком вырастают лишь на 2-3 кПа.

Результаты испытаний с баком в целом подтверждают проведенные ранее испытания [6].

При расчете использовались следующие значения:

- Расход насоса, л/мин: 2,7; 5,4; 10,8.
- Давление воздуха в баке, кПа, в диапазоне 50-240.
- Давление включения и выключения насоса на реле, выставяемое в соответствии с расходом (при повышении расхода значения снижались, а при понижении увеличивались). Например, для расхода 2,7 л/мин давление включения и выключения составляло 140 и 270 кПа соответственно, а при 10 л/мин – 80 и 180 кПа соответственно. Расход регулировался изменением положения задвижки.

Затем к работе был снова подключен частотный преобразователь для изменения частоты вращения рабочего колеса насоса. Диапазон частот составил 100-60% (50-30 Гц) с шагом в 10%.

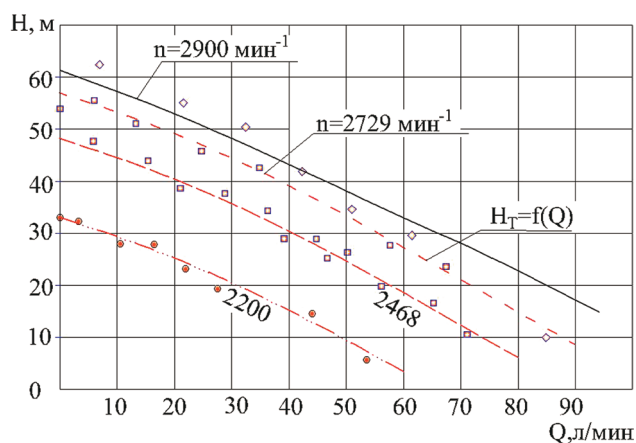


Рис. 2. Результаты испытаний насоса RGJ-602P:
а – при 100%-ной частоте вращения рабочего колеса;
б – при 85%-ной частоте вращения;
в – при 65%-ной частоте вращения;
г – при 55%-ной частоте вращения

Fig. 2. Test results of RGJ-602P pump:

- a – at 100% impeller rotational speed;
- b – at 85% rotational speed; c – at 65% rotational speed;
- d – at 55% rotational speed

Далее определялись ключевые параметры: время наполнения бака $t_{\text{наполн}}$ (ось x), давление в системе $P_{\text{сист}}$ (ось y) и мощность насоса $N_{\text{насос}}$ (ось z) в определенные моменты наполнения. Суммарное время наполнения $t_{\text{наполн}}$ делилось на равные отрезки для получения 8 точек (моментов). Именно в эти моменты наблюдений фиксировались показания приборов давления и мощности.

Для наглядной демонстрации зависимости мощности насоса от времени наполнения бака и общего давления в системе было принято решение построить 3D-графики на основании полученных данных. Для этого использовался метод *кригинга* – регрессии на основе гауссовских процессов, используемой для интерполяции недостающих значений. Данный метод также носит название предсказания Винера-Колмогорова в честь Норберта Винера и Андрея Колмогорова, одного из крупнейших математиков XX в.

Метод кригинга основывается на представлении прогнозируемого значения как взвешенной суммы наблюдений с учетом пространственной корреляции между точками. В основе гауссовского процесса регрессии лежит подход гауссовских процессов, которые моделируют данные как реализацию случайной функции [7]. Гауссовский процесс задается как множество случайных величин, каждая из которых обладает нормальным распределением, а совокупность любых конечных подмножеств этих величин имеет многомерное нормальное распределение [8].

Гауссов процесс определяется следующими параметрами:

- математическое ожидание $m(t_{\text{наполн}})$:

$$m(t_{\text{наполн}}) = E[f(t_{\text{наполн}})], \quad (1)$$

где $E[f(t_{\text{наполн}})]$ – среднее ожидаемое значение функции f в точке x , которая является входным вектором (точкой в пространстве признаков).

- ковариационная функция (ядро) $k(t_{\text{наполн}}, t_{\text{наполн}}')$:

$$k(t_{\text{наполн}}, t_{\text{наполн}}') = E[(f(t_{\text{наполн}}) - m(t_{\text{наполн}}))(f(t_{\text{наполн}}') - m(t_{\text{наполн}}'))]. \quad (2)$$

Для упрощения часто предполагается, что $m(t_{\text{наполн}}) = 0$, и это позволяет сосредоточиться на ковариационной структуре данных.

Пусть есть n -е количество наблюдений. Тогда массив входных данных –

$$T_{\text{наполн}} = \{t_{\text{наполн}1}, t_{\text{наполн}2}, \dots, t_{\text{наполн}n}\}, \quad (3)$$

где $t_{\text{наполн}i} \in R^d$ – d -мерное вещественное пространство.

А массив наблюдаемых значений –

$$P_{\text{сист}} = \{P_{\text{сист}1}, P_{\text{сист}2}, \dots, P_{\text{сист}n}\}. \quad (4)$$

Цель – предсказать значение $f(t_{\text{наполн}^*})$ для новой точки $t_{\text{наполн}^*}$.

Предполагается, что значения целевой функции в обучающих точках $P_{\text{сист}}$ и значение в новой точке $f(t_{\text{наполн}^*})$ совместно подчиняются многомерному нормальному распределению.

Ковариационная функция (ядро) $k(t_{\text{наполн}}, t_{\text{наполн}'})$ определяет связь между точками в пространстве признаков. Выбор ядра влияет на свойства предсказания. Распространенные примеры ядер:

– Радиально-базисное ядро –

$$k(t_{\text{наполн}}, t_{\text{наполн}'}) = \exp\left(-\frac{t_{\text{наполн}} - t_{\text{наполн}'}^2}{2l^2}\right), \quad (5)$$

где $||t_{\text{наполн}} - t_{\text{наполн}'}||$ – евклидово расстояние между точками $t_{\text{наполн}}$ и $t_{\text{наполн}'}$; l – параметр длины масштаба, который регулирует, как быстро корреляция убывает с расстоянием.

– ядро Маттерна –

$$k(t_{\text{наполн}}, t_{\text{наполн}'}) = \frac{2^{1-\nu}}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{\sqrt{2\nu} t_{\text{наполн}} - t_{\text{наполн}'}}{l} \right)^\nu K_\nu \left(\frac{\sqrt{2\nu} t_{\text{наполн}} - t_{\text{наполн}'}}{l} \right), \quad (6)$$

где ν – параметр гладкости, определяющий «шумность» модели; K – модифицированная функция Бесселя; $\Gamma()$ – обобщение факториала на вещественные и комплексные числа.

– Линейное ядро –

$$k(t_{\text{наполн}}, t_{\text{наполн}'}) = t_{\text{наполн}} \cdot t_{\text{наполн}'}. \quad (7)$$

Линейное ядро применяется, если зависимость между точками предполагается линейной.

Таким образом, алгоритм расчета и интерполяции следующий:

1) выбирается ковариационная функция (например, RBF);

2) определяются гиперпараметры (l , σ_n^2) ядра, которые могут быть найдены методом оптимизации;

3) вычисляются ковариационные матрицы $(K(T_{\text{наполн}}, T_{\text{наполн}}))$, $K(T_{\text{наполн}}, t_{\text{наполн}^*})$, $K(t_{\text{наполн}^*}, t_{\text{наполн}^*})$;

4) на основе формул для μ_* и σ_*^2 делаются предсказания для новых точек $t_{\text{наполн}^*}$.

Графики построены при помощи кросс-платформенной интегрированной среды разработки PyCharm и языка программирования Python. Непосредственно для построения графиков перед написанием выполняемого кода были подгружены и импортированы библиотеки программного обеспечения MATLAB для расчетов гауссовских процессов.

Результаты и их обсуждение. Результаты испытаний приведены в таблице. Давление в 100 кПа в баке было выбрано ввиду более стабильной работы системы, так как при более

Таблица. Данные испытаний при давлении воздуха в баке 100 кПа
Table. Test data at 100 kPa air pressure in the tank

	100%, 2,7 л/мин / 100%, 2,7 l/min								90%, 2,7 л/мин / 90%, 2,7 l/min								80%, 2,7 л/мин / 80%, 2,7 l/min							
Время $t_{\text{наполн}}$, с / Time t_{fill} , s	0	23	46	69	92	115	138	164	0	37	74	111	148	185	222	262	0	42	84	126	168	210	252	297
Давление $P_{\text{сист}}$, кПа / Pressure P_{sys} , kPa	119	148	174	200	221	237	249	259	101	141	166	191	207	216	223	227	88	132	147	159	166	172	176	178
Мощность $N_{\text{насос}}$, Вт / Power N_{pump} , W	0	449	451	453	454	450	449	450	0	346	348	349	350	351	350	351	0	260	262	261	261	262	262	262
	100%, 5,4 л/мин / 100%, 5,4 l/min								90%, 5,4 л/мин / 90%, 5,4 l/min								80%, 5,4 л/мин / 80%, 5,4 l/min							
Время $t_{\text{наполн}}$, с / Time t_{fill} , s	0	29	58	87	116	145	174	207	0	24	48	72	96	120	144	173	0	56	112	168	224	280	336	392
Давление $P_{\text{сист}}$, кПа / Pressure P_{sys} , kPa	111	145	169	189	207	219	226	232	75	124	140	154	166	172	172	180	46	127	139	146	150	152	153	153
Мощность $N_{\text{насос}}$, Вт / Power N_{pump} , W	0	447	447	449	443	445	449	449	0	346	347	349	348	349	348	347	0	259	259	260	260	261	260	260
	100%, 10,7 л/мин / 100%, 10,7 l/min								90%, 10,7 л/мин / 90%, 10,7 l/min								80%, 10,7 л/мин / 80%, 10,7 l/min							
Время $t_{\text{наполн}}$, с / Time t_{fill} , s	0	20	40	60	80	100	120	141	0	15	30	45	60	75	90	107	0	4	8	12	16	20	24	27
Давление $P_{\text{сист}}$, кПа / Pressure P_{sys} , kPa	41	123	135	144	152	158	163	168	101	126	130	134	136	138	140	141	21	99	103	104	105	105	106	106
Мощность $N_{\text{насос}}$, Вт / Power N_{pump} , W	0	427	426	431	424	424	431	434	0	345	343	345	344	345	344	345	0	258	258	258	258	259	258	258

высоких значениях давления (150-200 кПа) бак начинает препятствовать наполнению, что приводит к слишком частым включениям и выключениям насоса.

На основании полученных данных построены трехмерные графики зависимости (рис. 2).

На основании представленных графиков выявлены ключевые закономерности работы гидравлического аккумулятора (расширительного бака) при различных режимах работы насоса и расходах жидкости.

1. Анализ времени наполнения бака и мощностных характеристик насоса.

Для всех случаев наблюдается увеличение времени наполнения с понижением частоты вращения насоса. Это связано с уменьшением напора, который насос создает при снижении частоты. При расходе 2,7 л/мин (графики а, б, в) время наполнения остается относительно стабильным, что свидетельствует о высокой энергоэффективности системы при малых расходах. В то же время при увеличении расхода до 10,7 л/мин (графики ж, з, и) становится очевидным снижение эффективности при частотах 90 и 80%, что указывает на необходимость более точного подбора бака.

Для обеспечения оптимального времени работы и стабильности системы можно использовать формулу расчета рабочего объема бака:

$$V_{\text{бак}} = \frac{Q * \Delta t}{\Delta P}, \quad (12)$$

где t – диапазон времени, с; P – диапазон давления, кПа.

Подставив результаты испытаний, получим для расхода 5,4 л/мин рабочий объем бака в 0,324 л. Это подтверждает тот факт, что баки с малым объемом обеспечивают стабильность и эффективность системы только для малых расходов.

1. Обоснование выбора диапазонов давления.

Для расчета давления в системе можно воспользоваться формулой:

$$P_{\text{сист}} = P_{\text{мин}} + \frac{\Delta P}{2}, \quad (13)$$

где $P_{\text{мин}}$ – минимальное давление, ниже которого нельзя опускаться ввиду риска кавитации. Это значение определяет нижний предел, допустимый для настройки системы. В данном исследовании оптимальный диапазон давления составляет 100 ± 25 кПа, что соответствует безопасным и эффективным режимам работы.

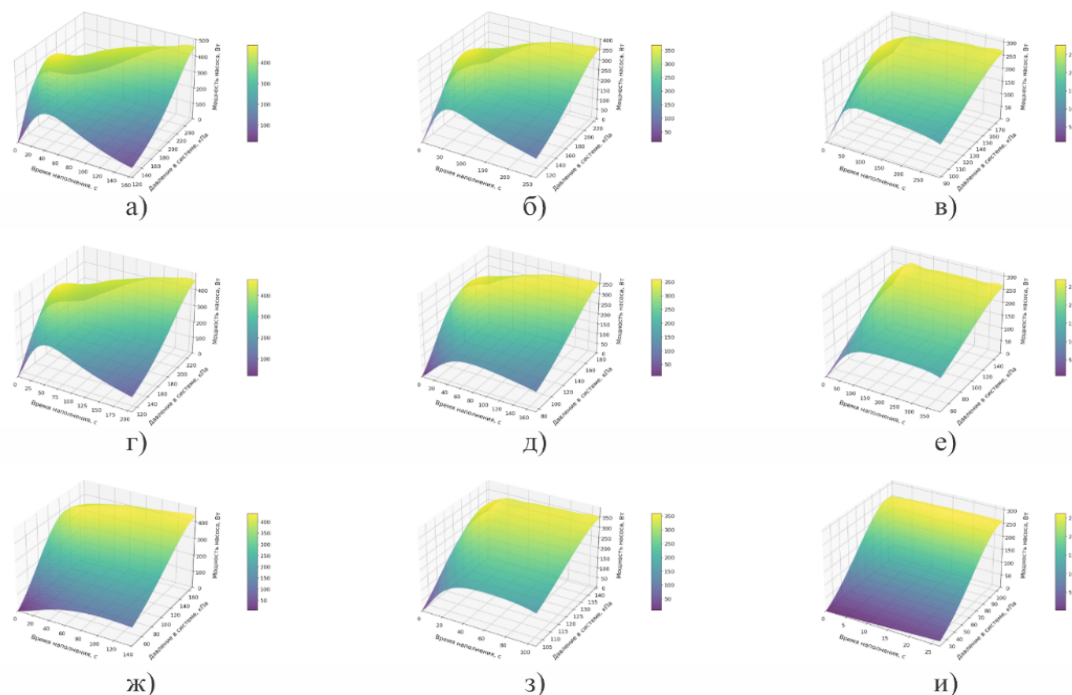


Рис. 3. 3D-графики, демонстрирующие зависимость мощности насоса от времени наполнения бака и давления в системе:

а, б, в-при расходе 2,7 л/мин с частотой вращения 100, 90 и 80% соответственно;
г, д, е – при расходе 5,4 л/мин с частотой вращения 100, 90 и 80% соответственно;
ж, з, и – при расходе 10,7 л/мин с частотой вращения 100, 90 и 80% соответственно

Fig. 3. 3D graphs showing the dependence of the pump power on the time of filling the tank and the pressure in the system:

а, б, в-at a flow rate of 2.7 l/min with a rotation speed of 100, 90 and 80%, respectively;
г, д, е – at a flow rate of 5.4 l/min with a rotational speed of 100, 90 and 80% respectively;
ж, з, и – at a flow rate of 10.7 l/min with a rotation speed of 100, 90 and 80% respectively

2. Энергетическая эффективность системы.

Снижение частоты вращения насоса приводит к снижению его мощности, однако при высоких расходах (10,7 л/мин и более) это сопровождается заметным снижением напора. Для оценки энергетической эффективности можно использовать формулу:

$$E_{\text{насос}} = \frac{P \cdot Q}{\eta \cdot f}, \quad (14)$$

где P – мощность насоса; Q – расход жидкости; η – КПД насоса; f – частота вращения.

Например, при мощности насоса 347 Вт, расходе 5,4 л/мин = 0,09 л/с, КПД $\eta = 0,8$ (средний КПД таких насосов) и частоте 2460 об/мин (90%) энергетическая эффективность составит:

$$E_{\text{насос}} = \frac{347 \cdot 0,09}{0,8 \cdot 2460} \approx 0,016 \text{ Вт/л}$$

Таким образом, в проведенных испытаниях система достигает оптимальных значений на частотах 80-90% при расходах до 5,4 л/мин.

3. Практическая значимость.

Полученные результаты подтверждают, что для низких и средних расходов жидкости (до 5,4 л/мин) можно использовать меньшие объемы бака при сохранении стабильности давления. Однако при больших расходах (10,7 л/мин и более) необходимо либо увеличить объем бака, либо скорректировать параметры насоса (выбрать другой насос), чтобы обеспечить стабильность системы.

Выводы

На основании представленных графиков можно сделать следующие выводы о работе системы, подборе и расчете бака.

1. Зависимость работы бака от частоты вращения насоса. Снижение частоты вращения насоса (от 100 к 80%) приводит к уменьшению напора жидкости. Это прослеживается по сглаживанию поверхности графиков. При уменьшении частоты

насосной установки бак демонстрирует меньшую способность обеспечивать стабильность давления, что особенно критично при высоких расходах.

2. Зависимость от расхода. При низких расходах поверхность графиков более сглаженная, что свидетельствует о стабильности системы. Это значит, что бак и насос работают в пределах своей оптимальной производительности. С увеличением расхода графики становятся более «наклонными». Это указывает на увеличение разницы в давлении, что может быть связано с ограничением пропускной способности бака, насоса и трубопроводной системы в целом.

3. Влияние на подбор бака. При расходе 10,7 л/мин система работает на грани своих возможностей, особенно при 80% частоты вращения. График и рисунок 2 показывает наиболее резкое снижение напора, что может привести к нестабильности в системе. Для обеспечения стабильной работы на высоких расходах необходимы бак большего объема или насос с более высоким напором.

4. Работа при низких частотах. Снижение частоты вращения насоса (например, до 80% и ниже) приводит к недостатку напора при увеличенных расходах. Таким образом, частота ниже 90% целесообразна только при низких расходах.

5. Рекомендации для подбора бака. Если система должна работать с более высоким расходом, необходимо либо увеличить объем бака, чтобы компенсировать снижение напора, либо использовать насос с более высокой производительностью.

6. При меньших расходах (например, 2,7-5,4 л/мин) текущий объем бака выглядит достаточным, особенно при работе насоса на частотах 100 и 90%.

Дальнейшие испытания при давлении воздуха в баке ниже 100 кПа и расходах ниже 2,7 л/мин дадут исчерпывающие результаты по данным вопросам.

Список использованных источников

1. Короткоручко Д.Ю. Исследование режима работы гидравлических аккумуляторов в системах водоподдачи / Д.Ю. Короткоручко, М.С. Али, Д.С. Бегляров, Е.А. Лентяева, В.В. Демидочкин // Естественные и технические науки. 2024. № 5 (192). С. 196-203.
2. Осинцев К.В. Экспериментальное исследование эксергетических потерь грунтового теплового насоса и их оптимизация на основе аппроксимации кусочно-линейных функций / К.В. Осинцев, С.В. Алюков // Каталог библиотеки БГТУ. 2022. Т. 95, № 1. С. 11-21.
3. Zuo Z., Tan L., Shi W., Chen C., Ye J., Francis E.M. Transient Characteristic Analysis of Variable Frequency

References

1. Korotkoruchko D.Y. Investigation of the mode of operation of hydraulic accumulators in water supply systems / D.Y. Korotkoruchko, Ali Munzer Suleiman D.S. Beglyarov E.A. Lentyaeva, V.V. Demidochkin // Natural and Technical Sciences No. 5 (192), 2024, P. 196-203.
2. Osintsev K.V. Experimental study of exergetic losses ground heat pump and their optimization based on the approximation of piecewise linear functions / K.V. Osintsev, S.V. Alyukov. // Catalog of the BSTU library. 2022, vol. 95, No. 1. P. 11-21
3. Zhao Z., Tang L.; Shi W., Chen K., Ye J., Francis E.M. Analysis of transient characteristics of frequency-controlled

Speed Regulation of Axial Flow Pump // Sustainability. 2022. № 14. P. 11143. <https://doi.org/10.3390/su141811143>

4. Wei Guo, Josage Chathura Perera, Daryl Cox, Sachin Nimbalkar, Thomas Wenning, Kiran Thirumaran, Eli Levine. Variable-speed pump efficiency calculation for fluid flow systems with and without static head // International Journal of Energy Management. 2020. June. Vol. 2, Iss. 3. Pp. 38-50.

5. Tom Neuberger, Steven B. Weston. Variable frequency drives: energy savings for pumping applications. Eaton Corporation, Industry Application IA04008002E. 2012. November.

6. Сабра К. Особенности работы центробежных насосов с использованием преобразователя частоты вращения / К. Сабра, М.С. Али // Природообустройство. 2013. № 5. С. 64-67.

7. Пальмов С.В. Классификация гауссовских процессов как инструмент прогнозирования // Экономика в теории и на практике: актуальные вопросы и современные аспекты: Сборник статей XV Международной научно-практической конференции, г. Пенза, 5 апреля 2023 г. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. С. 102-104.

8. Бурнаев Е. Сравнительный анализ критериев адаптивного планирования экспериментов на основе гауссовских процессов / Е. Бурнаев, М. Панов // Сборник трудов 35-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2012». М.: Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, 2012. С. 167-172.

9. Рожков А.Н., Али М.С. Экономическая эффективность применения насосных установок с регулируемым электроприводом при малых подачах воды / А.Н. Рожков М.С. Али // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 5. С. 69-74.

10. Али М.С. Насосы и насосные станции. Учебник / М.С. Али, Д.С. Бегляров, В.Ф. Чебаевский. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. 104 с.

axial pump speed control. Environmental friendliness 2022, 14, 11143. <https://doi.org/10.3390/su141811143>

4. Wei Guo, Josage Chathura Perera, Daryl Cos, Sachin Nimbalkar, Thomas Winning, Karan Thirumaran, Eli Levine. Variable-speed pump efficiency calculation for fluid flow systems with and without static head. – International Journal of Energy Management. – June, 2020, volume 2, issue 3, p. 38-50.

5. Tom Neuberger, Steven B. Weston. Variable frequency drives: energy savings for pumping applications. – Eaton Corporation, Industry Application IA04008002E. – November, 2012.

6. Sabra K. Features of operation of centrifugal pumps using a frequency converter / K. Sabra, M.S. Ali // Prirodoobustroystvo. 2013. No. 5. P. 64-67.

7. Palmov S.V. Classification of Gaussian processes as a forecasting tool / S.V. Palmov // Economics in theory and in practice: current issues and modern aspects: collection of articles of the XV International Scientific and Practical Conference, Penza, April 05, 2023. Penza: Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.), 2023. P. 102-104.

8. Burnaev E. Comparative analysis of criteria for adaptive experiment planning based on Gaussian processes / E. Burnaev, M. Panov // Proceedings of the 35th Interdisciplinary school-conference of the IPPI RAS "Information Technologies and Systems 2012". Moscow: A.A. Kharkevich Institute of Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences, 2012. P. 167-172.

9. Rozhkov A.N. Economic efficiency of using pumping units with an adjustable electric drive at low water supplies / Rozhkov A.N., Ali M.S. // Water supply and sanitary equipment. 2015. No. 5. P. 69-74.

10. Ali M.S. Pumps and pumping stations: textbook / Beglyarov D.S., Chebaevsky V.F. M.: publishing house of RGAU-MSHA, 2015. 104 p.

Об авторах

Дмитрий Юрьевич Короткоручко, аспирант; AuthorID: 1129309; ORCID: 0009-0009-6613-3352; SPIN-код: 1116-6838; d.kor.kwc@mail.ru

Мунзер Сулейман Али, доцент, канд. техн. наук; WoS ResearcherID: AAE-5905-2022; Scopus AuthorID: 57183440800; ORCID: 0000-0003-2295-8140; SPIN-код: 1390-6101; AuthorID: 709443; munzer@yandex.ru

Information about the authors

Dmitrii Y. Korotkoruchko, postgraduate student; AuthorID: 1129309; ORCID: 0009-0009-6613-3352; SPIN-code: 1116-6838; d.kor.kwc@mail.ru

Munzer S. Ali, CSc (Eng), associate professor; WoS ResearcherID: AAE-5905-2022; Scopus AuthorID: 57183440800; ORCID: 0000-0003-2295-8140; SPIN-code: 1390-6101; AuthorID: 709443; munzer@yandex.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Короткоручко Д.Ю., Али М.С. выполнили экспериментальные 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 interest

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

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 27.12.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 22.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 22.01.2025

Korotkoruchko D.Y., Ali M.S. carried out experimental and 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.

All authors made an equal contribution to the preparation of the publication. All authors are equally responsible for violations in the field of ethics of scientific publications.

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

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-111-119>

УДК 630*181.2:630*425(470.57)



СОСТОЯНИЕ НАСАЖДЕНИЙ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ (*BETULA PENDULA* ROTH) И ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ И ТРАНСЛОКАЦИИ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ» В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ (СТЕРЛИТАМАКСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЦЕНТР, РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН)

Р.Х. Гиниятуллин[✉], О.В. Тагирова, А.Ю. Кулагин

Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН; 450054, г. Уфа, пр-кт Октября, 69, Россия

Аннотация. Цель исследований – проведение оценки жизненного состояния березы повислой (*Betula pendula* Roth), изучение особенностей накопления и транслокации металлов в листьях, ветвях, корнях березы в санитарно-защитных насаждениях Стерлитамакского промышленного центра (Предуралье). Обсуждаются вопросы содержания металлов (Mn, Cd, Pb, Ni) в почвенном покрове, в надземных и подземных органах березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ). Отмечено, что высокое содержание металлов в почвах под насаждениями березы незначительно отражается на жизненном состоянии деревьев. В условиях СПЦ жизненное состояние насаждений березы оценено как «здоровое». На основании характеристики особенностей транслокации металлов показано, что корни березы способны поглощать значительное количество металлов из почвы. При переходе от корней к ветвям и листьям наблюдается снижение концентраций Cd, Pb, Ni. Локализация Cd, Pb и Ni отмечается главным образом в корнях, и в меньших количествах – в ветвях и листьях березы. По показателю «Коэффициент биологического поглощения» Cd, Ni, Pb являются элементами «среднего захвата». В условиях загрязнения избыток металлов угнетает поступление Mn в растениях. Биогеохимическая активность поглощения элементов у березы меняется в зависимости от условий местообитания: наибольшие значения характерны для березы в зоне условного контроля. Деревья березы в составе санитарно-защитных насаждений СПЦ накапливают техногенные металлы и успешно выполняют природоохранные средозащитные функции по ограничению распространения промышленных загрязнителей в окружающей среде.

Работа выполнена на оборудовании центра коллективного пользования «Агидель» в рамках плановых исследований по бюджетной теме № 123020700152-5 FMRS-2023-0008 «Устойчивость лесобразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов».

Ключевые слова: береза повислая, жизненное состояние древостоя, органы растений, накопление металлов, транслокация металлов, Стерлитамакский промышленный центр

Формат цитирования: Гиниятуллин Р.Х., Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Состояние насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth) и особенности накопления и транслокации металлов в системе «Почва-растение» в условиях техногенного загрязнения (Стерлитамакский промышленный центр, Республика Башкортостан) // Природообустройство. 2025. № 1. С. 111-119. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-111-119>

Original article

THE CONDITION OF THE HANGING BIRCH STANDS (*BETULA PENDULA* ROTH) AND FEATURES OF ACCUMULATION AND TRANSLOCATION OF METALS IN THE SOIL-PLANT SYSTEM UNDER CONDITIONS OF MAN-MADE POLLUTION (STERLITAMAK INDUSTRIAL CENTER, REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

R.K. Giniyatullin[✉], O.V. Tagirova, A.Y. Kulagin

Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences: 450054 Ufa, 69, Prospect Oktyabrya, Russia

Abstract. The issues of the content of metals (Mn, Cd, Pb, Ni) in the soil cover, in the aboveground and underground organs of the hanging birch (*Betula pendula* Roth) in the conditions of polymetallic pollution of the Sterlitamak industrial center are discussed. It is noted that the high metal content in the soils under birch plantations has a slight effect on the vital condition of trees. In the conditions of the Sterlitamak industrial center (SIC), the vital condition of birch plantations was assessed as “healthy”. Based on the characteristics of the features of metal translocation, it is shown that birch roots are able to absorb a significant amount of metals from the soil. During the transition from roots to branches and leaves, there is a decrease in concentrations of Cd, Pb, Ni. Localization of Cd, Pb and Ni is noted mainly in the roots and in smaller quantities in the branches and leaves of birch. According to the “biological absorption coefficient”, Cd, Ni, Pb are elements of the “average capture”. In conditions of pollution, an excess of metals inhibits the intake of Mn in plants. The biogeochemical activity of the absorption of elements in birch varies depending on the habitat conditions: the highest values are typical for birch in the conditional control zone. Birch trees as part of the sanitary protection plantings of the SIC accumulate man-made metals and successfully perform environmental protection functions to limit the spread of industrial pollutants in the environment.

The work was carried out on the equipment of the Agidel Center for collective use as part of the planned research on the budget topic No 123020700152-5 FMRS-2023-0008 “Sustainability of forest-forming tree species and ecological and biological adaptations, taking into account the anthropogenic transformation of landscape and natural complexes”.

Keywords: hanging birch, vital state of the stand, plant organs, accumulation of metals, translocation of metals, Sterlitamak industrial center

Format of citation: Giniyatullin R.K., Tagirova O.V., Kulagin A.Y. The condition of the hanging birch stands (*Betula pendula* Roth) and features of accumulation and translocation of metals in the soil-plant system under conditions of man-made pollution (Sterlitamak industrial center, Republic of Bashkortostan) // Prirodoobustroystvo. 2025. No. 1. P 111-119. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-111-119>

Введение. Санитарно-защитные лесные насаждения промышленных центров выполняют роль буферной зоны между предприятиями и прилегающими территориями с землями сельскохозяйственного назначения [1]. Известно, что металлы являются наиболее токсичными компонентами промышленных загрязнителей [2].

Функционирование предприятий Стерлитамакского промышленного центра определяет специфический характер промышленных выбросов и особенности загрязнения окружающей среды металлами [3].

Береза повислая (*Betula pendula* Roth) характеризуется как газоустойчивый вид и является перспективной в использовании для озеленения территорий городов и промышленных центров [4, 5].

Цель исследований: оценка жизненного состояния березы повислой (*Betula pendula* Roth),

изучение особенностей накопления и транслокации металлов в листьях, ветвях, корнях березы в санитарно-защитных насаждениях Стерлитамакского промышленного центра (Предуралье).

Материалы и методы исследований.

Район исследований расположен в долинах рек Стерля, Ашкадар и Белая. Основными загрязнителями окружающей среды в г. Стерлитамаке являются стационарные источники – предприятия химической и нефтехимической промышленности. При этом выполнение природоохранных мероприятий в последние годы определяет постепенное снижение объема валовых выбросов загрязнителей [3].

Исследования проводились в березовых насаждениях (лесные культуры) Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ) и в зоне условного контроля (ЗУК), преобладают ветра южного и юго-западного направлений (рис. 1).

При проведении полевых работ руководствовались общепринятыми методами исследования лесных насаждений [6]. Санитарно-защитные насаждения с участием березы повислой расположены в северной и южной частях города (рис. 1). Постоянные пробные площади (ППП) размером 20×50 м закладывались в сходных условиях произрастания и положения в рельефе в одновозрастных древостоях березы повислой (лесные культуры, возраст 58 лет). ППП № 1 расположена в 2-3 км от источников нефтехимического и химического загрязнения

в промышленной зоне (СПЦ), ППП № 2 – на удалении 10-15 км от северной промышленной зоны в зоне условного контроля (ЗУК). Для определения лесотаксационных характеристик насаждений применялся метод сплошного перечета деревьев на ППП. У каждого дерева березы измеряли высоту с помощью высотомера (дальномер-высотомер Nikon Laser Forestry Pro, Japan) и диаметр ствола на высоте 1,3 м (мерная вилка Haglof, Sweden).

Краткая таксационная характеристика изученных насаждений представлена в таблице 1.



Рис. 1. Картосхема расположения постоянных пробных площадей (ППП) на территории г. Стерлитамак

(<https://maps.app.goo.gl/cDAFh1D7gsm66fFd8>)

Fig. 1. Cartographic diagram of the location of permanent test areas in the city of Sterlitamak

[<https://maps.app.goo.gl/cDAFh1D7gsm66fFd8>]

Таблица 1. Краткая таксационная характеристика березовых древостоев в условиях Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ) и в зоне условного контроля (ЗУК)

Table 1. Brief taxational characteristics of birch stands in the conditions of the Sterlitamak industrial center (SIC) and in the conditional control zone (CCZ)

Расположение ППП Location of TA	Состав древостоя The composition of the stand	Класс возраста Age class	Средний диаметр, см Average diameter, cm	Средняя высота, м Average height, meters	Класс бонитет Class bonitet
СПЦ / SIC	10Б	VI	21,4	17,5	II
ЗУК / CCZ	10Б	VI	23,60	19,5	II

Примечание: Б – береза повислая (*Betula pendula* Roth).

Note: B – birch hanging (*Betula pendula* Roth).

На относительное жизненное состояние древостоев негативное воздействие оказывают промышленные предприятия, расположенные в северной части Стерлитамака. Оценка относительного жизненного состояния (ОЖС) деревьев выполнена по методике В.А. Алексеева с изменениями для лиственных древесных растений [7].

Для определения возраста деревьев использовали образцы древесины (керны), взятые с помощью возрастного бурава (Mora, Sweden). На пробных площадях керны отбирали у каждого 5-го дерева во время проведения перече́та и описания древостоев.

Для изучения содержания металлов в органах березы повислой производился отбор проб листьев, ветвей и корней. Образцы отбирали после пятидневного периода без осадков в виде дождя, отмывку листьев и ветвей не проводили. Образцы листьев и ветвей собирали из верхней, средней и нижней частей кроны деревьев со стороны источника загрязнения с помощью секатора на шесте. Далее из отдельных образцов с одного дерева составлялась усредненная проба. В лабораторных условиях растительные пробы высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали. Подготовку растительных проб к анализу осуществляли по общепринятым методам [8, 9].

Проведенные ранее исследования показали, что тяжелые металлы, поступая в почву из техногенных источников, концентрируются в приповерхностном слое почвы 0-10(20) см [10]. На пробных площадях одновременно с растительными образцами отбирали почвенные пробы. Почвенные образцы отбирали и подготавливали для химического анализа в соответствии с требованиями [11]. Образцы почвы отбирались на ППП по 10-см слоям до глубины 50 см. В лабораторных условиях почвенные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, перетирали в фарфоровой ступке и просеивали через капроновое сито с размером ячеек 1 мм. Подготовка проб проведена с использованием метода мокрого озоления в концентрированной HNO_3 . Пробы анализировали на содержание Mn, Cd, Pb и Ni на атомно-абсорбционном спектрометре «ZEEnit-650» (Germany) [12]. В почвенных образцах определяли содержание валовых и подвижных форм металлов, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером с $\text{pH} = 4,8$. В почвенных образцах определяли величину pH солевой вытяжки (KCl) потенциометрическим методом.

Биологическое поглощение элементов растениями оценивали путем сопоставления содержания в золе растений с содержанием в почве по Б.Б. Польнову, а расчеты коэффициентов

биологического поглощения производили по формуле: $\text{КБП} = l/n$, где l – содержание химического элемента в золе растений, n – содержание этого же элемента в почве [13].

Оценка биогеохимической активности вида (БГХА) выполнена расчетным способом и представлена в виде суммарной величины, полученной при сложении коэффициентов биологического поглощения отдельных элементов: $\text{БГХА} = \sum \text{КБП}$ [13].

Всего проанализировано 504 пробы листьев, 504 пробы ветвей, 168 проб корней и 168 проб почвы.

Статистическая обработка данных выполнялась с помощью пакета программы Microsoft Office Excel версии 2016.

Результаты и их обсуждение. Таксационная характеристика березовых деревьев по элементам леса и для древостоев приведена в таблице 1. Древостои березы в условиях загрязнения СПЦ и в ЗУК VI класса возраста относятся ко II классу бонитета. При таксационной характеристике насаждений важное значение имеют особенности распределения деревьев по диаметру и высоте. Установлено, что в ЗУК деревья березы характеризуются большей высотой и диаметром стволов по сравнению с деревьями в условиях загрязнения СПЦ.

В условиях полиметаллического загрязнения СПЦ ОЖС древостоев березы характеризуется как «здоровое» ($L_n = 81,75$). Общее ухудшение состояния древостоев в СПЦ в условиях выраженного техногенного воздействия согласуется с распределением деревьев по категориям «Ослабленные», «Сильно ослабленные», «Сухие». Доля здоровых деревьев в условиях загрязнения по количеству уменьшается по сравнению с ЗУК (табл. 2). При этом снижение класса бонитета не отмечается.

Березовые насаждения в ЗУК расположены на расстоянии 10-15 км от источников загрязнения СПЦ. Древостои березы повислой в ЗУК характеризуются как «здоровые» ($L_n = 89,75$) (табл. 2).

В условиях СПЦ металлы концентрируются в верхнем (0-10(20) см) слое почвы [14].

Определено содержание валовых и подвижных форм Mn, Cd, Pb, Ni в почвах данного промышленного центра (табл. 3).

По содержанию Mn, Cd, Pb, Ni в почвах под насаждениями березы в СПЦ и ЗУК наблюдаются различия. Техногенное загрязнение приводит к увеличению содержания валовых форм металлов в почвах: в условиях СПЦ превышение ПДК металлов отмечено для Cd, Pb, Ni. При этом

Таблица 2. Относительное жизненное состояние (ОЖС) насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth) Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ) и в зоне условного контроля (ЗУК)

Table 2. Relative vital state (RVS) of birch hanging (*Betula pendula* Roth) plantations in the Sterlitamak Industrial Center (SIC) and in the conditional control zone (CCZ)

Расположение ППП <i>Location of TA</i>	Количество деревьев по категориям на ПП, шт. <i>Number of trees by categories on trial areas, pcs.</i>						ОЖС насаждения <i>RVS of the stands</i>	
	Всего <i>Total</i>	Здоровые <i>Healthy</i>	Ослабленные <i>Weakened</i>	Сильно ослабленные <i>Strongly weakened</i>	Отмирающие <i>Dying</i>	Сухие <i>Dry</i>	<i>Ln%</i>	Категория <i>Category</i>
СПЦ / SIC	20	12	5	2	0	1	81,75	Здоровое / <i>Healthy</i>
ЗУК / CCZ	20	15	3	2	0	0	89,75	Здоровое / <i>Healthy</i>

Таблица 3. Содержание валовых и подвижных форм металлов (мг/кг) в почвенном покрове под насаждениями березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях Стерлитамакского промышленного центра и в зоне условного контроля

Table 3. The content of gross and mobile forms of metals (mg/kg) in the soil cover under the plantations of the hanging birch (*Betula pendula* Roth) in the conditions of the Sterlitamak industrial center and in the zone of conditional control

Глубина, см <i>Depth, cm</i>	Стерлитамакский промышленный центр <i>Sterlitamak Industrial Center</i>				Зона условного контроля <i>Conditional control zone</i>			
	<i>Mn</i>	<i>Cd</i>	<i>Pb</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Cd</i>	<i>Pb</i>	<i>Ni</i>
Валовая форма / Gross shape								
0-10(20)	1284±11	4,75±0,15	58,80±4,4	106,2±8,9	440±7,0	0,45±0,15	3,48±0,36	24,05±1,15
Предельно-допустимые концентрации (ПДК) в почве / Maximum permissible concentrations (MPC) of in the soil								
	1500	2	30	85	1500	2	30	85
Подвижная форма / Movable form								
0-10(20)	85,5±6,5	2,61±0,7	7,8±0,6	7,1±0,5	90±7,5	0,2±0,01	2,4±0,3	2,75±0,45
Предельно-допустимые концентрации (ПДК) в почве / Maximum permissible concentrations (MPC) of in the soil								
	60	0,24	6,0	4,0	60	0,24	6,0	4,0

Примечание: выделенным шрифтом отмечены значения, превышающие ПДК.

Note: values exceeding the MPC are marked in highlighted font.

в СПЦ в слое почвы 0-10(20) см среднее содержание подвижной формы Cd, Pb в 3-3,2 раза, Ni – в 2,5 раза выше, чем в ЗУК. В ЗУК в почвенном покрове в насаждениях березы превышение ПДК по валовому содержанию Cd, Pb, Ni не отмечено. Однако установлено повышенное содержание Mn в почвах под насаждениями березы в условиях ЗУК.

Определено содержание металлов в подземных и наземных органах (корнях, листьях, ветвях) деревьев березы (рис. 2-5).

При сопоставлении данных по количественному содержанию металлов в листьях, ветвях, корнях деревьев березы в условиях загрязнения СПЦ по сравнению с ЗУК установлено, что в СПЦ содержание Cd, Pb, Ni (исключение составляет Mn) в 3-12 раз больше. Наибольшее содержание Cd, Pb и Ni отмечается в корнях как в условиях СПЦ, так и в ЗУК.

Для характеристики транслокации металлов в системе «Почва-растение» на основе данных по валовому содержанию металлов

в почвенном покрове и в органах березы рассчитан коэффициент биологического поглощения (КБП). Для березы в условиях загрязнения СПЦ ряд КБП имеет следующий вид: Cd (0,67) > Ni (0,58) > Pb (0,45) > Mn (0,09). Для березы в ЗУК был построен следующий ряд: Ni (0,79) > Pb (0,67) > Cd (0,57) > Mn (0,37).

Подвижные формы Cd, Pb, Ni береза активно извлекает из почвы в условиях загрязнения СПЦ. По показателю коэффициента биологического поглощения (КБП) и согласно рядам биологического поглощения Cd (0,67) Ni (0,58), Pb (0,45) являются элементами «среднего захвата» по А.И. Перельману [13]. Исключение составляет КБП Mn для березы в условиях загрязнения СПЦ, где интенсивность поглощения Mn оказалась невысокой (КБП = 0,09) и Mn отнесен к группе элементов «очень слабого захвата». Это свидетельствует о том, что высокое содержание Cd, Pb, Ni и других металлов угнетает поступление Mn в растениях в условиях техногенной нагрузки.

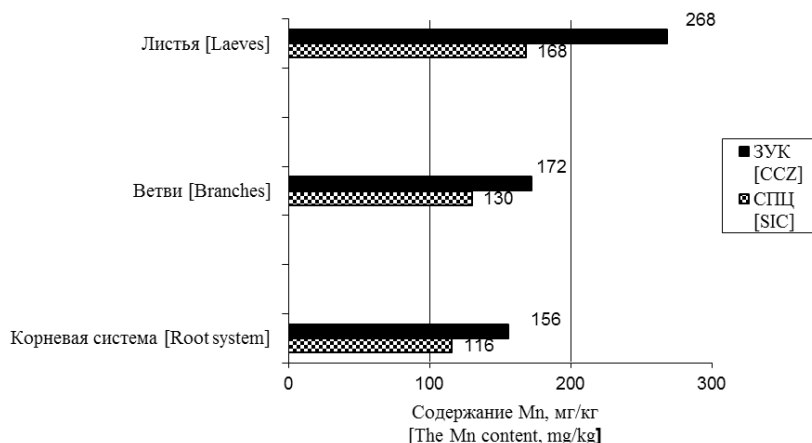


Рис. 2. Содержание Mn, мг/кг, в надземных и подземных органах березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ) и в зоне условного контроля (ЗУК)

Fig. 2. The content of Mn (mg/kg) in the aboveground and underground organs of birch hanging (*Betula pendula* Roth) under the conditions of pollution of the Sterlitamak Industrial Center (SIC) and in the conditional control zone (CCZ)

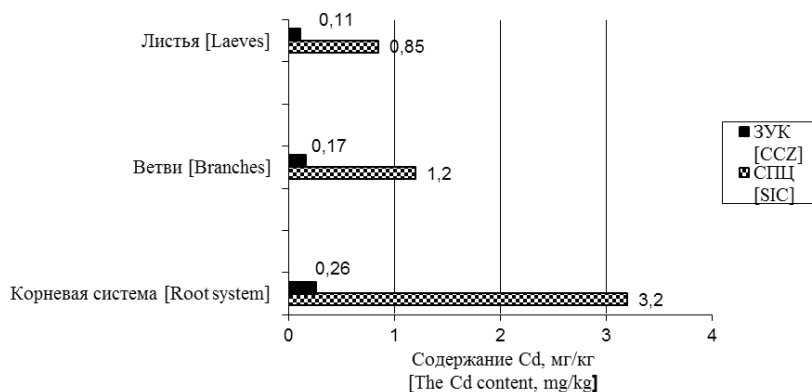


Рис. 3. Содержание Cd, мг/кг, в надземных и подземных органах березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ) и в зоне условного контроля (ЗУК)

Fig. 3. The content of Cd (mg/kg) in the aboveground and underground organs of birch hanging (*Betula pendula* Roth) under the conditions of pollution of the Sterlitamak Industrial Center (SIC) and in the conditional control zone (CCZ)

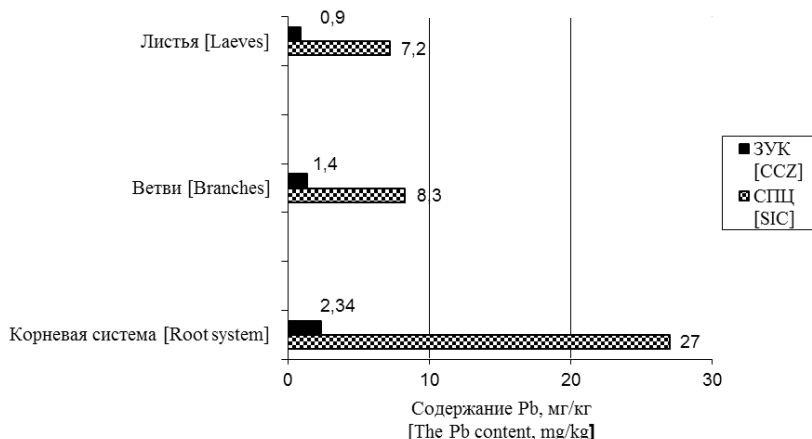


Рис. 4. Содержание Pb, мг/кг, в надземных и подземных органах березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ) и в зоне условного контроля (ЗУК)

Fig. 4. The content of Pb (mg/kg) in the aboveground and underground organs of birch hanging (*Betula pendula* Roth) under the conditions of pollution of the Sterlitamak Industrial Center (SIC) and in the conditional control zone (CCZ)

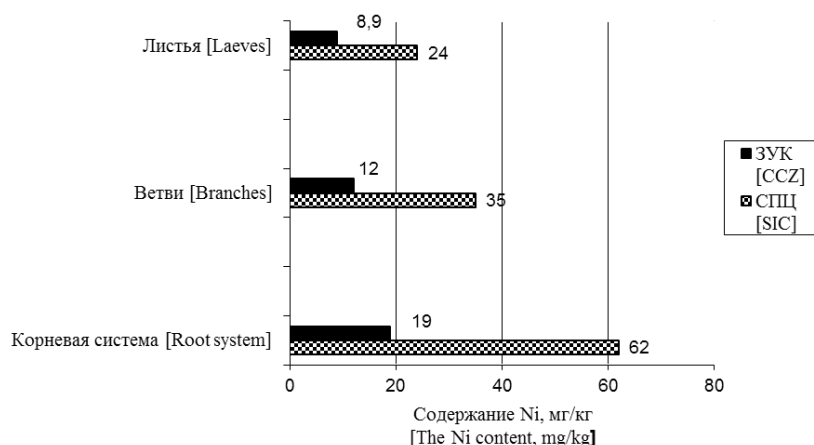


Рис. 5. Содержание Ni, мг/кг, в надземных и подземных органах березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ) и в зоне условного контроля (ЗУК)

Fig. 5. The content of Ni (mg/kg) in the aboveground and underground organs of birch (*Betula pendula* Roth) under the conditions of pollution of the Sterlitamak Industrial Center (SIC) and in the conditional control zone (CCZ)

Вопросы транслокации металлов в системе «Почва-растение» связаны с подвижностью химических элементов. Коэффициент биологического поглощения (КБП) отражает потенциальную биогеохимическую подвижность химических элементов, а коэффициент биогеохимической подвижности (КБН) рассчитывается как отношение содержания химических элементов в сухом веществе растений к содержанию подвижных форм в почве [13].

Рассчитанные значения КБН в условиях загрязнения СПЦ имеют следующий вид: Ni (8,73), Cd (1,2), Pb (3,4), Mn (1,3), а в условиях ЗУК – Ni (6,9), Cd (1,3), Pb (0,9), Mn (1,7).

Следует отметить, что характеристика накопления разных металлов в древесных растениях в условиях СПЦ и ЗУК, полученных на основе показателей КБП и КБН, имеет неоднозначный характер.

На основе данных по КБП рассчитана биогеохимическая активность (БГХА) березы в условиях загрязнения СПЦ и в ЗУК. Показано, что наибольшая биогеохимическая активность характерна для березы повислой в ЗУК (БГХА = 2,4), и более низкие показатели – в условиях СПЦ с выраженной техногенной нагрузкой (БГХА = 1,7).

Способность корней накапливать металлы снижает их транслокацию в надземные органы растений. Для характеристики процессов перехода металлов из корней в надземную часть растений рассчитывали коэффициент перехода (Кп), равный отношению содержания металлов надземной фитомассы к таковому в корнях. $K_p = \text{Слистья} / \text{Скорни}$, где Слистья – содержание элемента в листьях, Скорни – содержание

элемента в корнях. При переходе металлов от корней к ветвям и листьям наблюдается снижение концентраций Cd, Pb, Ni. В целом по содержанию Cd, Pb, Ni в органах березы образуется следующий ряд (по убыванию): корень > ветви > листья (рис. 3-5). Коэффициенты перехода составляют 0,37; 0,30; 0,56 соответственно. Видимо, это связано с функционированием барьерных механизмов у березы к передвижению Cd, Pb, Ni по растению при увеличении их концентраций в почве. Следует отметить, что в условиях Стерлитамакского промышленного центра такая закономерность установлена и для липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) [10].

У березы наибольшие показатели Кп прослеживаются для Mn (1,1-1,7), а повышенном содержании Mn выделялись листья и ветви. У деревьев березы содержание Mn в условиях СПЦ по сравнению с ЗУК является пониженным. В корнях березы обнаружена низкая концентрация Mn (116-156 мг/кг), наибольшие концентрации Mn отмечаются в листьях березы. Это согласуется с тем, что Mn участвует в биосинтезе хлорофилла и повышает интенсивность фотосинтеза [15] и что избыток тяжелых металлов угнетает поступление и накопление Mn в растениях [16].

Выводы

Установлено, что в условиях СПЦ жизненное состояние насаждений березы повислой оценено как «здоровое».

В условиях загрязнения окружающей среды корни березы способны поглощать значительное количество металлов из почвы (Mn – 156 мг/кг, Cd – 0,26 мг/кг, Pb – 2,34 мг/кг, Mn – 19,0 мг/кг). Транслокация из почвы

и локализация Cd и Pb, Ni отмечаются главным образом в корнях, и в меньших количествах – в ветвях и листьях березы. Показано, что при переходе от корней к ветвям и листьям наблюдается снижение концентраций Cd, Pb, Ni. По показателю КБП Cd, Ni, Pb являются элементами «среднего захвата». В условиях загрязнения избыток тяжелых металлов угнетает поступление Mn в растения.

Активность поглощения элементов у березы меняется в зависимости от условий местобитания – наибольшая БГХА характерна для

березы в ЗУК. Снижение показателя БГХА березы на участках с техногенной нагрузкой связано, вероятно, с реализацией защитных механизмов растений к накоплению металлов.

Повышенное содержание металлов в почвах под насаждениями березы повислой и, как следствие, транслокация металлов в подземные и надземные органы свидетельствуют о том, что насаждения березы повислой в составе санитарно-защитных насаждений Стерлитамакского промышленного центра успешно выполняют природоохранные средозащитные функции.

Список использованных источников

1. Кулагин Ю.З. Лесообразующие виды, техногенез и прогнозирование. М.: Наука, 1980. 116 с.
2. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука, 1991. 150 с.
3. О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2022 году: Государственный доклад. Уфа, 2023. 318 с. URL: <https://www.bashkortostan.ru/presscenter/lectures/1727/?ysclid=m35mbohef6753369429>.
4. Мамаев С.А. Устойчивость декоративных насаждений в городских промышленных центрах / С.А. Мамаев, А.К. Махнев, Л.А. Семкина // Человек и ландшафты. Антропогенные ландшафты Урала и прилегающих территорий: сборник статей. Свердловск: ЦНЦ АН СССР, 1979. С. 33-34.
5. Кулагин А.Ю., Тагирова О.В. Лесные насаждения Уфимского промышленного центра: современное состояние в условиях антропогенных воздействий. Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2015. 196 с.
6. Сукачев В.Н. Программа и методика биогеоценологических исследований: сборник. М.: Наука, 1966. 333 с. ISBN 978-5-88185-239-9
7. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / Под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с. ISBN 5-02-026549-7
8. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / Под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. М.: Гидрометеоздат, 1981. 109 с.
9. Bargagli R. Trace Elements in Terrestrial Plants: An Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery. Berlin: Springer, 1998. 324 p.
10. Гиниятуллин Р.Х. транслокации кадмия в насаждениях липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях загрязнения окружающей среды (Стерлитамакский промышленный центр) / Р.Х. Гиниятуллин, О.В. Тагирова, А.Ю. Кулагин // Природообустройство. 2023. № 3. С. 116-122. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-116-122.
11. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. М.: Изд-во Стандартиформ, 2011. 6 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023484?ysclid=m35n0l572a155665032>.
12. Методика количественного химического анализа. Определение As, Cd, Co, Cr, Cu, Hd, Mn, Pb, Sb, Tn (кислотно-растворимые формы) в почвах и данных отложениях атомно-абсорбционным методом. СПб.: 2005. 12 с.

References

1. Kulagin Yu.Z. Forest-forming species, technogenesis and forecasting. Moscow, Nauka Publ., 1980. 116 p.
2. Iljin V.B. Heavy metals – in the system soil-plant. Novosibirsk: Nauka, 1991. 150 s.
3. State report «About the condition of natural resources and environment of the Republic of Bashkortostan in 2022». Ufa, 2023. 318 p. <https://www.bashkortostan.ru/presscenter/lectures/1727/?ysclid=m35mbohef6753369429>
4. Mamaev S.A. Stability of decorative plantings in urban industrial centers / S.A. Mamaev, A.K. Makhnev, L.A. Semkina / Collection of articles: Man and landscapes. Anthropogenic landscapes of the Urals and adjacent territories. Sverdlovsk: UNC OF THE USSR Academy OF Sciences, 1979. P. 33-34.
5. Kulagin A.Yu., Tagirova O.V. Forest plantations of the Ufa Industrial Center: Current state in the conditions of anthropogenic impacts / Ufa: Gilem, Bashk. encyclopedia. 2015. 196 p.
6. Sukachev V.N. Program and methods of biogeocenologic research. Collection. Moscow: Nauka. 1966. 333 p. ISBN 978-5-88185-239-9
7. Forest ecosystems and atmospheric pollution / ed. by V.A. Alekseev. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 200 p. ISBN 5-02-026549-7
8. Methodical recommendations for conducting field and laboratory studies of soils and plants in the control of environmental pollution with metals / ed. by N.G. Zyrin, S.G. Malakhov. Moscow, Gidrometeoizdat Publ. 1981. 109 p.
9. Bargagli R. Trace Elements in Terrestrial Plants: An Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery. Berlin: Springer, 1998. 324 p.
10. Giniyatullin R.Kh., Tagirova O.V., Kulagin A.Y. Features of cadmium translocation in plantations of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) in conditions of environmental pollution (Sterlitamak industrial center). // Priroobustroystvo. 2023. № 3. P. 116-122. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-116-122
11. GOST 26423-85. Soil. Methods for determining the specific electrical conductivity, pH and solid residue of the water extractor. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 6 p. <https://docs.cntd.ru/document/1200023484?ysclid=m35n0l572a155665032>.
12. Methods of quantitative chemical analysis. Determination of As, Cd, Co, Cr, Cu, Hd, Mn, Pb, Sb, Tn (acid-soluble forms) in soils and these sediments by atomic absorption method. St. Petersburg, 2005. 12 p.
13. Perelman A.I., Kasimov N.S. Geochemistry of the landscape. Textbook. Moscow, Astreya-2000, 1999. 610 p.

13. Перельман А.И. Геохимия ландшафта: учебник / А.И. Перельман, Н.С. Касимов. М.: Астрель-2000, 1999. 610 с.

14. Хазиев Ф.Х. Экоотоксиканты в почвах Башкортостана: монография. Уфа: Гилем, 2000. 62 с.

15. Чернявская Н.М. Роль марганца при выделении кислорода в фотосинтезе / Н.М. Чернявская, Л.Ю. Васильева // Физиология растительных организмов и роль металлов. М.: МГУ, 1989. С. 56-117.

16. Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов / Под ред. Н.В. Алексеевой-Поповой. Л.: БИН, 1991. 213 с.

Об авторах

Рафак Хизбуллин Гиниятуллин, д-р с.-х. наук, ResearcherID: K-1767-2018, ORCID: 0000-0001-5729-3754; grafak2012@yandex.ru

Олеся Васильевна Тагирова, канд. биол. наук, доцент; ResearcherID: AAX-4432-2021, ORCID: 0000-0003-1615-7005; olecyi@mail.ru

Кулагин Алексей Юрьевич, д-р биол. наук, профессор; ResearcherID: J-2019-2017, ORCID: 0000-0001-7574-4547; coolagin@list.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Гиниятуллин Р.Х., Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. выполнили теоретические и прикладные 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 that there are no conflicts of interests

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 26.02.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 01.11.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 01.11.2024

14. Khaziev F.Kh. Ecotoxicants in the soils of Bashkortostan. Monograph. Ufa, Gilem Publ., 2000. 62 p.

15. Chernyavskaya N.M., Vasiljeva L.Yu. The role of manganese in the release of oxygen in photosynthesis / Physiology of plant organisms and the role of metals. Moscow, MGU Publ., 1989. P. 56-117.

16. Resistance to heavy metals of wild species / ed. by N.V. Alekseeva-Popova. Leningrad: BIN, 1991. 213 p.

Author information

Rafak Kh. Giniyatullin, DSc (Agro), senior researcher of the laboratory of forestry; Researcher ID: K-1767-2018, ORCID: 0000-0001-5729-3754; grafak2012@yandex.ru

Olesya V. Tagirova, CSc (Bio), associate professor, senior researcher of the laboratory of forestry; Researcher ID: AAX-4432-2021, ORCID: 0000-0003-1615-7005; olecyi@mail.ru

Alexey Y. Kulagin, DSc (Bio), professor, chief researcher, head of the laboratory of forestry; Researcher ID: J-2019-2017, ORCID: 0000-0001-7574-4547; coolagin@list.ru

Giniyatullin R.K., Tagirova O.V., Kulagin A.Y. carried out theoretical and applied 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/10.26897/1997-6011-2025-1-120-128>

УДК 630*232 (470.45)



ТЕХНОЛОГИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ СЕЯНЦЕВ *QUERCUS ROBUR* И *JUGLANS NIGRA* В ЗАСУШЛИВЫХ УСЛОВИЯХ

А.В. Солонкин[✉], С.Н. Крючков, А.С. Соломенцева, С.А. Егоров, Д.А. Горбушова

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук; 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 97. Россия

Аннотация. Цель исследований – разработка технологий выращивания ореха черного и дуба черешчатого в засушливых условиях Волгоградской области на светло-каштановых почвах и изучение влияния различных типов субстратов на их биометрические показатели. В статье приводятся сведения по технологии выращивания на питомнике в засушливых условиях Волгоградской области (г. Камышин) сеянцев древесных видов: дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и ореха черного (*Juglans nigra* L.). Выявлено, что процент не покрытых растительностью земель региона увеличился на 3,4% за последние 20 лет, а количество площади лесных насаждений уменьшилось на 0,3%. Эти данные позволяют судить о необходимости восполнения ассортимента и количества древесных видов в различных типах насаждений. Установлено, что искусственное регулирование основных факторов среды в теплице позволяет ускорить выращивание посадочного материала на питомниках. Колебания приростов сеянцев дуба и ореха зависят от уровня влажности и периода фенофазы. Своевременная подрезка корней обеспечивает сеянцам наилучший рост и развитие. Выявлено, что использование торфяного субстрата и смеси торфа и песка в соотношении 3:1 с использованием посадочной линии Mosa green является лучшим вариантом выращивания сеянцев ореха и дуба. Установлено, что с 1 га школьного отделения питомника дуб черешчатый и орех черный имеют выход в 17000 тыс. шт. при 3-летнем сроке выращивания с густотой посадки 22000 шт/га и 14500 тыс. шт. с густотой посадки 20000 шт/га при 4-летнем сроке, а показатели качества сеянцев полностью соответствуют стандартам посадочного материала древесно-кустарниковых пород. Правильное конструирование посадок позволяет обеспечить высокий выход саженцев в школьном отделении питомника, а режим полива может определяться биологическими особенностями видов. Использование орудий и техники позволяет сократить затраты ручного труда и увеличить производительность и количество ротаций на питомнике.

Работа выполнена по теме Государственного задания FNFE – 2025-0009 «Создание новых генотипов, сортов, форм древесных, кустарниковых, культурных растений с высокоценными признаками продуктивности, качества, устойчивостью к био- и абиострессорам с использованием классических и современных методов селекции, новые инновационные технологии в питомниководстве и семеноводстве, для решения задач по предотвращению деградации и опустынивания агроландшафтов в условиях изменяющегося климата.»

Ключевые слова: дуб черешчатый, орех черный, технология выращивания, засушливые условия, технология посадки

Формат цитирования: Солонкин А.В., Крючков С.Н., Соломенцева А.С., Егоров С.А., Горбушова Д.А. Технология выращивания сеянцев *Quercus robur* и *Juglans nigra* в засушливых условиях // Природообустройство. 2025. № 1. С. 120-128. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-120-128>

Scientific article

TECHNOLOGY OF GROWING SEEDLINGS OF *QUERCUS ROBUR* AND *JUGLANS NIGRA* IN ARID CONDITIONS

A.V. Solonkin[✉], S.N. Kryuchkov, A.S. Solomentseva, S.A. Egorov, D.A. Gorbushova

Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences; 97 Universitetskii ave., Volgograd, 400062, Russia

Abstract. The purpose of the research is to develop technologies for growing black walnut and black oak in the arid conditions of the Volgograd region on light chestnut soils and to study the effect of various types of substrates on their biometric indicators. The article provides information on the technology

of growing seedlings of woody species in a nursery in arid conditions of the Volgograd region (Kamyshin): pedunculate oak (*Quercus robur* L.) and black walnut (*Juglans nigra* L.). It was revealed that the percentage of non-vegetated lands in the region has increased by 3.4% over the past 20 years, and the amount of forest area has decreased by 0.3%, these data suggest the need to replenish the assortment and number of tree species in various types of plantations. It has been established that artificial regulation of the main environmental factors in the greenhouse makes it possible to accelerate the cultivation of planting material in nurseries. Fluctuations in the growth of oak and walnut seedlings depend on the humidity level and the period of phenophase. Timely pruning of the roots ensures the best growth and development of seedlings. It was revealed that the use of a peat and sand in a ratio of 3:1 using the planting line Mosa green is the best option for growing walnut and oak seedlings. It has been established that from 1 hectare of the school nursery department, petiolate oak and black walnut have an output of 17,000 thousand units at a 3-year growing period with a planting density of 22,000 pcs/ha, and 14,500 thousand units with a planting density of 20,000 pcs/ha at 4 years, and the quality indicators of seedlings fully comply with the standards of planting material tree and shrub species. Proper design of plantings allows for a high yield of seedlings in the school nursery department, and the watering regime can be determined by the biological characteristics of the species. The use of tools and equipment allows you to reduce the cost of manual labor and increase productivity and the number of rotations in the nursery.

The work was carried out on the topic of the State assignment FNFE – 2025-0009 “Creation of new genotypes, varieties, forms of woody, shrubby, cultivated plants with high-value signs of productivity, quality, resistance to bio- and abiostressors using classical and modern breeding methods, new innovative technologies in nursery and seed production, to solve problems of preventing degradation and desertification of agricultural landscapes in a changing climate.”

Keywords: oak petiolate, black walnut, cultivation technology, arid conditions, planting technology

Format of citation: Solonkin A.V., Kryuchkov S.N., Solomentseva A.S., Egorov S.A., Gorbushova D.A. Technology of growing seedlings of *Quercus robur* and *Juglans nigra* in arid conditions // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 120-128. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-120-128>

Введение. Улучшению лесосеменного дела способствует создание постоянных лесосеменных участков в имеющихся насаждениях [1]. Одним из важнейших при лесоразведении в засушливых условиях, несомненно, является вопрос о правильном подборе семян древесных видов и выращивании жизнестойких и производительных лесосеменных плантаций [2-4].

С учетом массовой потребности в посадочном материале для агролесомелиоративного обустройства насаждений в засушливых условиях требуется разработка агротехники размножения основных лесообразующих пород начиная со сбора семян для посева и их хранения [5, 6].

Оценка состояния лесных полос в программе «Вега-Про» показала, что за период с 2000 по 2020 гг. процент не покрытых растительностью земель Волгоградской области увеличился на 3,4%, а количество площади лесных насаждений уменьшилось на 0,3% (рис. 1).

Исследования показали, что отклонение от нормы NDVI хвойных и лиственных насаждений в Волгоградской области составило до 5%, значительную площадь занимают урбанизированные территории. В 5 лесничествах как главная лесообразующая порода преобладает дуб черешчатый (рис. 2).

Лесные полосы различного целевого назначения из семян интродуцированных и низкобонитетных насаждений зачастую отличаются недолговечностью [7]. Главными признаками деревьев, используемых при отборе семян в защитном лесоразведении, по которым их можно отнести к категории «плюсовых», являются их состояние, жизнеспособность и плодоношение, хорошо выраженное по годам. Также учитываются форма стволов, развитие кроны, засухо- и морозоустойчивость,



Рис. 1. Распределение типов растительности Волгоградской области по данным сервиса «Вега-Про»

Fig. 1. Distribution of vegetation types in the Volgograd region according to the data of the Vega-Pro service

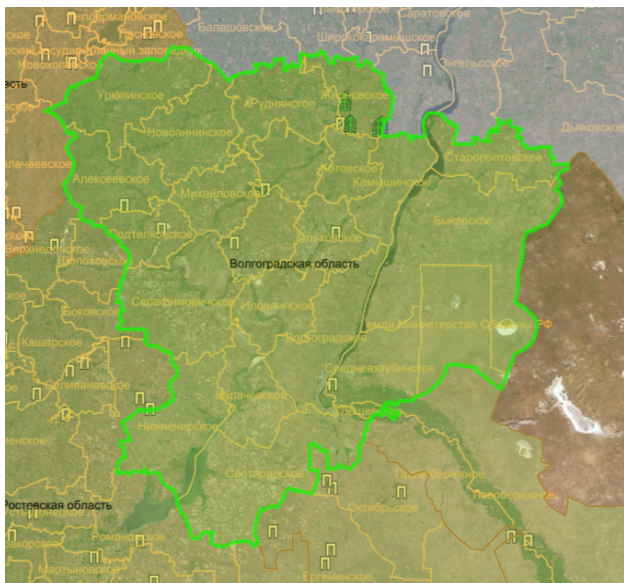


Рис. 2. Карта лесных участков
Волгоградской области (данные сервиса
«Вега-Про» и ФБУ Рослесозащита),
обозначение «П» – дубовые насаждения

Fig. 2. Map of forest areas of the Volgograd region
(data of the Vega-Pro service and the Federal
Forestry Agency Roslesozashchita),
designation «P» – oak plantations

отсутствие повреждений против вредителей и заболеваний [1]. Создание питомников позволяет полностью оптимизировать работы по выращиванию посадочного материала, восполнить запасы хозяйственно ценных древесных видов, использовать низкзатратные технологии их выращивания с целью получения высококачественного посадочного материала [8-11]. Отбор по важнейшим биологическим хозяйственным признакам позволит выявить высококачественные, приспособленные к неблагоприятным условиям местного климата сеянцы, рекомендуемые для производственного испытания [12-14].

Цель исследований: разработка технологий выращивания ореха черного и дуба черешчатого в засушливых условиях Волгоградской области на светло-каштановых почвах и изучение влияния различных типов субстратов на биометрические показатели сеянцев.

Материалы и методы исследований. Объектами исследований являлись дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) и орех черный (*Juglans nigra* L.). Опытный участок питомника расположен в г. Камышин Волгоградской области (Нижне-волжская станция по селекции древесных пород). Приживаемость сеянцев оценивали по их длине стебля, роста в высоту, длине корневой системы и ее способности быстро восстанавливаться после пересадки, давать корни третьего и четвертого порядков. Развитие по морфологическим

признакам характеризовало хорошее развитие листьев исследуемых растений, устойчивость к перепадам температур, засухе. Показатели качества сеянцев дуба черешчатого включали в себя соответствие стандартам посадочного материала [15] древесно-кустарниковых пород: в возрасте 1-2 лет толщина стволика – не менее 3 мм, высота – не менее 12 см, длина корня – не менее 15 см. У ореха черного в возрасте года толщина стволика – не менее 4 мм, высота – не менее 15 см, длина корня – не менее 15 см. Продолжительность стратификации семян ореха черного составляла 180-200 дней при хранении их в песке (температура – 3-5°C). Для посадки опытных растений использовали каштановую почву в качестве контроля, торфяную смесь и сочетание смеси торфа и песка в соотношении 3:1.

С целью анализа почвенных образцов были отобраны пробы для определения содержания аммония (ПНД Ф 16.1:2.2.2.3.74-2012), калия (ПНД Ф 16.1:2.2.2.3.74-2012), натрия (ПНД Ф 16.1:2.2.2.3.74-2012), магния (ПНД Ф 16.1:2.2.2.3.74-2012), кальция (ПНД Ф 16.1:2.2.2.3.74-2012), хлорида (ПНД Ф 16.1:2.2.3.2.2.69-10), сульфата (ПНД Ф 16.1:2.2.3.2.2.69-10), нитрата (ПНД Ф 16.1:2.2.3.2.2.69-10), водородного показателя (рН) (ГОСТ 26423), плотного остатка водной вытяжки (ГОСТ 26423), азота нитратов (ПНД Ф 16.1:2.2.2.3.67-10), азота нитритного (ПНД Ф 16.1:2.2.2.3.51-08), азота общего (ПНД Ф 16.1:2.2.3.82-2013), фосфора общего (ПНД Ф 16.2:2.3.73-2012), обменного аммония (ГОСТ 26489), подвижного калия (ГОСТ Р 54650), подвижного фосфора (ГОСТ Р 54650), влажности, максимальной гигроскопической влажности (ГОСТ 28268-89), органического вещества (ГОСТ 26213), гранулометрического состава (ГОСТ 12536-2014). Объем корней определяли с помощью мерного цилиндра и разницы исходного уровня воды до и после погружения опытного растения. Результаты исследований обрабатывались в программах Вега-Про, Excel, Biostat, Statistica.

Результаты и их обсуждение. Посадка дубов и ореха велась в двух поликарбонатных теплицах и в хозяйственном блоке. Площадь первой теплицы – 800 м², второй теплицы – 900 м², площадь хозяйственного блока – 250 м². Для успешного роста, развития растений и создания необходимого микроклимата теплицы включают поливочные ramпы, систему проветривания, вентиляции. Для поддержания правильного микроклимата и воздухообмена в теплицах установлена односторонняя коньковая форточка.

Почвенный покров участка представлен каштановыми почвами среднего механического состава, солонцеватость – средняя (рис. 3). Продолжительность безморозного периода составляет 160-180 дней. Сумма активных температур за вегетационный период – 3300-3500°C. За год выпадает около 300 мм осадков.

Для посева желуды дуба черешчатого собирали с земли в несколько приемов с повторением сбора на одном и том же участке через 3-5 дней. Желуди сортировали вручную, удаляя больные, недоразвитые, поврежденные. Семядоли здоровых и вызревших желудей имеют бледно-желтую окраску цвета слоновой кости. Легкое покраснение вблизи зародыша свидетельствует о готовности желудя к прорастанию. У пересохших желудей семядоли имеют светло-кофейный цвет и очень твердую оболочку. Бурые пятна могут указывать на наличие заболеваний. После сортировки желуди просушивали. Средний вес 1000 семян составил 3000 г, норма высева на 1 га семян 1 класса – 4500, 2 класса – 1600. Глубина заделки желудей составила 3 см.

Семена ореха черного собирали после опадения. После сбора их сразу очищали вручную, так как околоплодник у опадающих плодов не лопается и быстро загнивает, что затрудняет отделение его от ореха. Оболочка семян ореха черного препятствует проникновению воды к зародышу и набуханию его, тем самым задерживая прорастание. После очищения орехи промывали и просушивали. Средний вес 1000 семян составил 14000 г, норма высева на 1 га семян 1 класса – 10000. Глубина заделки составила 6-8 см. При выращивании в открытом грунте следовали схемам, представленным в таблице 1.

Посев доброкачественных семян дуба и ореха проводили весной. Предварительная стратификация ореха включала в себя хранение в песчаном субстрате при температуре воздуха 0-5°C. Продолжительность стратификации – 150-180 дней. Желуди дуба хранили в подвале, перемешивая их с торфокрошкой влажностью 40-60%, или на стеллажах, чередуя тонкий слой желудей со слоем песка. В южных регионах России большинство почв питомников малопродуктивны или неудовлетворительны по механическому

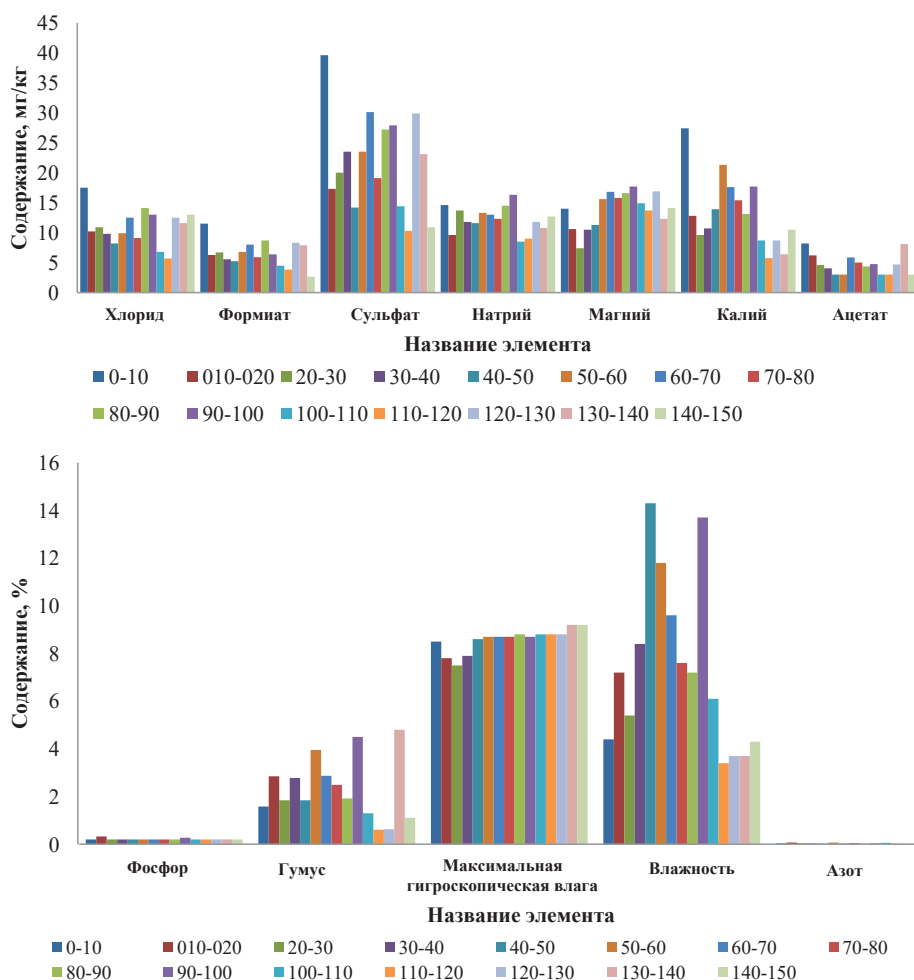


Рис. 3. Показатели почвенного состава опытного участка

Fig. 3. Indicators of the soil composition of the experimental plot

составу вследствие длительного периода эксплуатации, неправильной (либо некачественной) обработки или нарушения баланса органического вещества. Нередко эти причины лимитируют рост и выход сеянцев даже при хорошем оснащении питомников средствами полива и выполнении работ на высоком агротехническом уровне. При выращивании сеянцев в теплице применяли лесные кассеты РЖЛ-81 с торфяным субстратом. Плотность субстрата составляла $1,64 \text{ г/см}^3$, насыпная масса – 220 кг/см^3 , общая порозность – 86%, увеличение объема при набухании – 53,5%, объем твердых частиц при естественной влажности – 13,4%, гигроскопическая влажность – 7,44%, влагоемкость – 312,5% (рис. 4).

В лесомелиоративном обустройстве, как и в питомниководстве, основным вопросом является выбор орудий и техники для закладки участков. Механизация посадки позволяет сократить затраты ручного труда, а производительность – увеличить количество ротаций. Для набивки кассет и высева семян использовалась линия высева «Mosa green», состоящая из набивателя кассет, рядной сеялки, дозатора для подкормки растений и станции подачи воды с роликовым стоком. Ее минимальная пропускная способность составляет 1 лоток, максимальная – 1 ряд/2 сек. Преимуществом данной линии является способность автоматического высева семян. В ее состав входят вертикальный измельчитель, миксер субстратов,

Таблица 1. Технологическая схема посева при выращивании сеянцев ореха и дуба с ОКС для выращивания стандартных сеянцев

Table 1. Technological scheme of sowing when growing walnut and oak seedlings with ACS for growing standard seedlings

Порода <i>Breed</i>	Погонная длина посевных строк на 1 га, тыс. м <i>Running length of sowing rows per 1 ha, ths m</i>	Ширина посевной строки, см <i>The width of the sowing row, cm</i>	Технологическая схема посева по центру посевных строк, см <i>Technological scheme of sowing in the center of the sowing rows, cm</i>
Орех черный <i>Black walnut</i>	26,7	3-5	25-25-25-75
Дуб черешчатый <i>Oak petiolate</i>	20	3-15	40-40-70



Рис. 4. Этапы подготовки семян к посадке

Fig. 4. Stages of preparations of seeds for planting

наполнитель кассет, барабанная сеялка, мульчирующая установка и штабелер (рис. 5).

Подготовка почвы при выращивании сеянцев осуществлялась при помощи фрезы-грядоделателя ФГД-1,5, которая представляет собой навесное оборудование, навешиваемое на заднюю навесную систему тракторов МТЗ-80/82. Уникальная конструкция агрегата позволила осуществить оптимальную прокладку гряды в самых разнообразных условиях и на любых почвах.

К специфическим видам ухода за посевами орехов и дуба относится подрезка стержневого корня на гряде с целью усиления развития боковых корней. Подрезку выполняли через 5-8 дней после появления всходов. При посеве пророщенных орехов с прищипнутыми концами корешков подрезка не осуществлялась. У сеянцев дуба подрезка корней проводилась после образования настоящих листочков, на глубине 10-12 см, с последующим поливом.

Для горизонтальной подрезки корней использовали устройство ПК-1,2, агрегирующееся с любым трактором с гидравлической системой и трехточечной навеской категорий I и II (диаметр болта – 22-28 мм).

Подсоединение проводили на ровной и твердой поверхности, с заглушенным двигателем и включенным ручным тормозом по следующим этапам:

1. Оси навески на подрезчике вытягивали, освобождая боковые винтовые раскосы нижних рычагов и поворачивая их до совпадения с крепежными отверстиями подрезчика.

2. Оси вставляли и фиксировали при помощи шплинтов.

3. Верхнюю тягу подсоединяли с помощью оси и закрепляли с помощью шплинта.

4. Винтовочными раскосами нижние рычаги блокировались от поперечного перемещения (качения).

5. Гидравлические шланги подсоединялись к выводам гидросистемы трактора при помощи разрывных муфт.

6. Подрезчик устанавливался в рабочее положение путем опущения на опорное колесо и регулировки длины верхней тяги так, чтобы рама подрезчика была параллельной земле. Заглубление ножа проводилось плавно, и после начала движения.

После подрезки корней посеы поливали и притеняли в течение 10-15 дней. Дальнейший уход за посевами заключался в рыхлении, прополке и поливе.

Режим полива определялся биологическими особенностями пород [16]. В первый год жизни выделяют три основных фенологических периода: 1 – от посева до появления первых всходов (продолжительность 15-25 дней); 2 – от появления массовых всходов до полного укоренения (продолжительность 25-30 дней); 3 – интенсивный рост и формирование сеянца (продолжительность 60-70 дней). В каждом фенологическом периоде количество поливов составляло 3-5 раз.

Исследования показали, что все искусственные субстраты позволяют повысить грунтовую всхожесть и ускорить рост сеянцев дуба и ореха, а также в 2-3 раза увеличить выход посадочного материала. Наилучшие результаты по выходу стандартных сеянцев получены в варианте 3 (торфяной субстрат) (табл. 2, 3).

Рост сеянцев при осеннем посеве у опытных растений показал высокий уровень изменчивости. Высота сеянцев дуба черешчатого



Рис. 5. Основные элементы линии высева семян в кассеты «Mosa green»

Fig. 5. Main elements of the line for sowing seeds in "Mosa green" cassettes

варьировала от 41,2 до 27,5 см, а ореха черного – от 34,7 до 22,6 см. Закономерность между ростом сеянцев и возрастом маточных деревьев не прослеживается. Связь размеров сеянцев и датой появления всходов выражена нечетко. Максимальный прирост в высоту наблюдался в июле или августе. Выращивание однолетних сеянцев в сухой степи при обилии света и тепла в условиях орошения делает возможным при осеннем посеве получить стандартный посадочный материал за один вегетационный период. Стандартного размера сеянцы дуба черешчатого достигали при выращивании их в питомнике в течение года. Дальнейшее доращивание проводилось в школьном отделении (табл. 4).

В теплицах в период прорастания семян осуществляют проветривание в минимальных количествах. Когда появляются всходы, в летний период в жаркие часы теплицу проветривают с таким расчетом, чтобы влажность не опускалась ниже 60%. С 20 июня до середины июля (в период активного формирования корневой системы и ассимиляционного аппарата сеянцев) интенсивность проветривания должна быть средней. После 20 июля до августа, когда принимаются меры по укоренению одревеснения посадочного материала, интенсивность проветривания снижают в целях создания оптимальных условий для фотосинтеза. Проветривание теплицы для снижения влажности воздуха осуществляется только при полегании сеянцев.

Таблица 2. Приживаемость сеянцев ореха и дуба на различных типах субстратов

Table 2. Survival of walnut and oak seedlings on different types of substrates

Вид <i>Species</i>	Способ посадки <i>Planting method</i>	Средняя приживаемость за 2 года, % <i>Average survival for 2 years, %</i>
<i>Juglans nigra</i> L.	Контроль (каштановая почва) / Control (chestnut soil)	87,6
	Торф+песок (3:1) / Peat+sand (3:1)	93,4
	Торфяной субстрат / Peat substrate	98,1
<i>Quercus robur</i> L.	Контроль (каштановая почва) / Control (chestnut soil)	84,7
	Торф+песок (3:1) / Peat+sand (3:1)	90,0
	Торфяной субстрат / Peat substrate	96,3

Таблица 3. Биометрические показатели ореха и дуба на различных типах субстратов

Table 3. Biometric indicators of walnut and oak on different types of substrates

Вид <i>Species</i>	Способ посадки <i>Planting method</i>	Высота, см <i>Height, m</i>	Объем корней, мм ³ <i>Volume of roots, mm³</i>
<i>Juglans nigra</i> L.	Контроль (каштановая почва) / Control (chestnut soil)	22,6 ± 1,17	5248 ± 610
	Торф+песок (3:1) / Peat+sand (3:1)	28,7 ± 1,15	6003 ± 618
	Торфяной субстрат / Peat substrate	34,7 ± 1,24	6118 ± 633
<i>Quercus robur</i> L.	Контроль (каштановая почва) / Control (chestnut soil)	27,5 ± 2,11	5945 ± 782
	Торф+песок (3:1) / Peat+sand (3:1)	32,1 ± 1,45	6223 ± 823
	Торфяной субстрат / Peat substrate	41,2 ± 1,18	7150 ± 711

Таблица 4. Примерные нормы выхода с 1 га школьного отделения саженцев ореха и дуба для агролесомелиоративного обустройства и озеленения

Table 4. Approximate yield rates from 1 hectare of the school department of walnut and oak seedlings for agroforestry and landscaping

Вид и возраст посадочного материала <i>Type and age of planting material</i>	Выход, тыс. шт./га <i>Yield, thousand pieces / ha</i>
При 4-летнем сроке выращивания / With a 4-year growing period:	
Густота посадки / Planting density	20000
Саженцы 1 года выращивания / Seedlings of 1 year of cultivation	17000
Саженцы 2 года выращивания / Seedlings of 2 year of cultivation	16000
Саженцы 3 года выращивания / Seedlings of 3 year of cultivation	15500
Саженцы 4 года выращивания / Seedlings of 4 year of cultivation	14500

Выводы

1. Факторами, ограничивающими успешное выращивание посадочного материала в засушливой зоне, являются: малое количество осадков;

высокие летние температуры; высокая степень сухости воздуха; неустойчивость зимних температур; невысокий снежный покров; засоленность почв; низкое содержание органических веществ.

2. Возможность искусственного регулирования основных факторов среды в сочетании с тепловыми ресурсами региона и новым оборудованием открывает большие возможности для интенсификации выращивания посадочного материала в питомнике.

3. Правильно сконструированные ореховые и дубовые посадки с применением современного оборудования отличаются отличным ростом и развитием, являются источником получения достаточно высоких урожаев, что значительно повышает их экономическую эффективность,

а технология их создания может быть использована в практической деятельности.

4. Колебания приростов сеянцев зависят от уровня влажности в теплице и поддержания влаги в субстрате в разные периоды фенотипического развития сеянцев. Лучшие рост и состояние сеянцев наблюдались при своевременной подрезке корней.

5. Анализ биометрических показателей сеянцев ореха и дуба показал, что лучшим вариантом в засушливых условиях Волгоградской области является использование торфяного субстрата и смеси торфа и песка в соотношении 3:1.

Список использованных источников

1. Научно-методические указания по сортовому семеноводству деревьев и кустарников для лесомелиорации аридных территорий: Научно-методические рекомендации. Волгоград: ФНИЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 2022. 52 с.
2. Крючков С.Н. Эффективность полимерных и мульчирующих материалов при создании селекционных плантаций дуба в сухой степи / С.Н. Крючков, А.В. Солонкин, А.П. Иозус и др. // Научно-агрономический журнал. 2022. № 4 (119). С. 72-80. DOI: 10.34736/FNC.2022.119.4.011.72-80.
3. Агролесомелиорация. Монография / Под ред. А.Л. Иванова, К.Н. Кулика. 5-е изд., перераб. и доп. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 746 с. ISBN 5-900761-42-8
4. Морковина С.С. Инновационные технологии в лесокультурном деле: реальность и перспективы / С.С. Морковина, М.В. Драпалюк, Е.В. Баранова, Е.В. // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5, № 3 (19). С. 327-338. DOI: 10.12737/14181.
5. Бурцев Д.С. Обзор мировой практики выращивания сеянцев дуба с закрытой корневой системой / Д.С. Бурцев, Т.С. Мусаралиев // Инновации и технологии в лесном хозяйстве-2013: Материалы III Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22-24 мая 2013 г. СПб.: СПбНИИЛХ, 2013. Ч. 2. С. 99-108.
6. Драпалюк М.В. Повышение жизнеспособности сеянцев древесных пород (зарубежный опыт) / М.В. Драпалюк, И.М. Бартенев // Лесотехнический журнал. 2012. № 3 (7). С. 44-50.
7. Кулик К.Н. Стратегия развития защитного лесоразведения в Волгоградской области на период до 2025 года. 2-е изд., испр. и доп. / К.Н. Кулик, А.Т. Баранов, Ю.М. Жданов и др. Волгоград: ФНИЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 2019. 39 с.
8. Любимов В.Б. Плюсовые деревья *Quercus robur* L. в лесных сообществах Брянской области и их использование для развития лесосеменной базы на генетико-селекционной основе / В.Б. Любимов, И.В. Мельников, В.В. Москаленко и др. // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 83-87.
9. Рахмонова Б.С. Значимость ореховых плантаций на мировом рынке // Аграрная наука. 2019. № 5. С. 73-74. DOI: 10.32634/0869-8155-2019-325-5-73-74.
10. Романов Е.М. Лесокультурная оценка сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой, выращенных в контейнерах / Е.М. Романов, М.И. Смышляева, В.Г. Краснов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес.

References

1. Scientific and methodological guidelines on varietal seed production of trees and shrubs for forest reclamation of arid territories: scientific and methodological recommendations. Volgograd: Federal Research Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 2022. 52 p.
2. Kryuchkov S.N. The effectiveness of polymer and mulching materials in the creation of breeding oak plantations in the dry steppe / Solonkin A.V., Iozus A.P. [et al.] // Scientific and Agronomic Journal. 2022. № 4(119). P. 72-80. DOI 10.34736/FNC.2022.119.4.011.72-80.
3. Agroforestry: a monograph / edited by A.L. Ivanov, K.N. Kulik. 5th ed., revised and add. Volgograd: VNIALMI, 2006. 746 p. ISBN 5-900761-42-8.
4. Morkovina S.S., Drapalyuk M.V., Baranova E.V. Innovative technologies in forestry: reality and prospects // Forestry engineering magazine. 2015. Vol. 5, № 3 (19). P. 327-338. DOI: 10.12737/14181.
5. Burtsev D.S., Musaraliev T.S. Review of the world practice of growing oak seedlings with a closed root system // Innovations and technologies in forestry – 2013: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference St. Petersburg, May 22-24, 2013. Part 2. St. Petersburg: SPbNIIHLH, 2013. 99-108.
6. Drapalyuk M.V., Bartenev I.M. Increasing the viability of tree seedlings (foreign experience) // Forestry engineering magazine. 2012. No. 3(7). P. 44-50.
7. Kulik K.N. Strategy for the development of protective afforestation in the Volgograd region for the period up to 2025 / Barabanov A.T., Zhdanov Yu.M. [et al.]. 2nd ed., ispr. and add. Volgograd: Federal Research Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 2019. 39 p.
8. Lyubimov V.B. Positive trees of *Quercus robur* L. in the forest communities of the Bryansk region and their use for the development of a forest seed base on a genetic breeding basis / Melnikov I.V., Moskalenko I.V. [et al.] // Successes of modern natural science. 2016. No. 4. P. 83-87.
9. Rakhmonov B.S. The importance of walnut plantations on the world market // Agrarian Science. 2019. No. 5. Pp. 73-74. DOI 10.32634/0869-8155-2019-325-5-73-74.
10. Romanov E.M. Forest and cultural assessment of oak seedlings with a closed root system grown in containers / Smyshlyayeva M.I., Krasnov V.G. [et al.] // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Prirodoobustroystvo. 2019. No. 4(44). P. 36-47. DOI 10.25686/2306-2827.2019.4.36.
11. Romanenko A.K. The use of humic preparations for the cultivation of planting material of woody plants

Экология. Природопользование». 2019. № 4 (44). С. 36-47. DOI: 10.25686/2306-2827.2019.4.36.

11. Романенко А.К., Солонкин А.В., Соломенцева А.С. и др. Использование гуминовых препаратов для выращивания посадочного материала древесных растений в аридном регионе / А.К. Романенко, А.В. Солонкин, А.С. Соломенцева и др. // Аграрный вестник Урала. 2022. № 6 (221). С. 2-15. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-221-06-2-15.

12. Старшинов Д.С. Изучение условий произрастания и особенностей выращивания черного ореха в Самарской области // Студенчество России: век XXI: Материалы VII Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Орел, 3 июня 2020 г. Орел: ОГАУ имени Н.В. Парахина, 2020. Ч. 2. С. 279-282.

13. Шехмирзова М.Д. К вопросу о типе посадок лесных культур с участием ореха черного // Наука, образование и инновации для АПК: состояние, проблемы и перспективы: Материалы VI Международной научно-практической онлайн-конференции, Майкоп, 25 ноября 2020 г. Майкоп: Издательство «Магарин Олег Григорьевич», 2020. С. 224-227.

14. Ширнин В.К. Лесовосстановление дуба черешчатого сеянцами с закрытой корневой системой / В.К. Ширнин, В.А. Кострикин, Л.В. Ширнина и др. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 2 (356). С. 32-41. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.32.

15. ГОСТ Р 58004-2017. Лесовосстановление. Технические условия. ГОСТ Р от 28 ноября 2017 г. № 58004-2017.

16. Kryuchkov S.N., Solonkin A.V., Solomentseva A.S., Zholobova O.O. Elements of the Technology of Reproduction of Robinia Pseudoacacia L. for Protective Afforestation under Conditions of Land Degradation and Desertification // Arid Ecosystems. 2023. Vol. 13, No. 1. Pp. 83-91. DOI: 10.1134/S2079096123010055.

Об авторах

Андрей Валерьевич Солонкин, д-р с.-х. наук, заведующий лабораторией селекции, семеноводства и питомниководства; ORCID 0000-0002-1576-7824; mishamax73@mail.ru

Сергей Николаевич Крючков, д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства; ORCID 0000-0001-8338-6460; PИНЦ ID: 357954; kryuchkovs@vfanc.ru

Александра Сергеевна Соломенцева, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства; ORCID 0000-0002-5857-1004; Scopus: 57220036834; PИНЦ ID: 756338; WOS Research ID: W-4142-2018; alexis2425@mail.ru* (автор-корреспондент)

Сергей Анатольевич Егоров, младший научный сотрудник лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства, аспирант; ORCID 0000-0001-8234-7355; PИНЦ ID: 1124794; egorov-sa@vfanc.ru

Дарья Алексеевна Горбушова, лаборант-исследователь лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства; ORCID 0009-0006-4978-4143; PИНЦ ID: 1225036; gorbushova-d@vfanc.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Солонкин А.В., Крючков С.Н., Соломенцева А.С., Егоров С.А., Горбушова Д.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 конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interests

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 16.09.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 11.12.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 11.12.2024

in the arid region / Solonkin A.V., Solomentseva A.S., [et al.]. // Agrarian Bulletin of the Urals. 2022. No. 6 (221). P. 2-15. – DOI 10.32417/1997-4868-2022-221-06-2-15.

12. Starshinov D.S. Study of growing conditions and peculiarities of black walnut cultivation in the Samara region // Russian students: Century XXI: Proceedings of the VII All-Russian Youth Scientific and Practical Conference, Orel, June 03, 2020. Part 2. Orel: N.V. Parakhin State University, 2020. pp. 279-282.

12. Starshinov D.S. Study of growing conditions and peculiarities of black walnut cultivation in the Samara region // Russian students: Century XXI: Proceedings of the VII All-Russian Youth Scientific and Practical Conference, Orel, June 03, 2020. Part 2. Orel: N.V. Parakhin State University, 2020. P. 279-282.

13. Shekhmirzova M.D. On the issue of the type of planting of forest crops with the participation of black walnut // Science, education and innovations for agriculture: status, problems and prospects: Proceedings of the VI International Scientific and Practical online Conference, Maykop, November 25, 2020. – Maykop: Oleg Grigorievich Magarin Publishing House, 2020. P. 224-227.

14. Shirnin V.K. Reforestation of oak petiolate seedlings with a closed root system / Kostrikin V.A., Shirnina L.V. [et al.] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine. 2017. No. 2 (356). P. 32-41. DOI: 10.17238/issn 0536-1036.2017.2.32.

15. GOST R58004-2017 Reforestation. Technical specifications. GOST R dated November 28, 2017 No. 58004-2017

16. Kryuchkov S.N., Solonkin A.V., Solomentseva A.S., Zholobova O.O. Elements of the Technology of Reproduction of Robinia Pseudoacacia L. for Protective Afforestation under Conditions of Land Degradation and Desertification // Arid Ecosystems. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 83-91. DOI 10.1134/S2079096123010055.

About the authors

Andrey V. Solonkin, DSc (Agro), head of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding; ORCID 0000-0002-1576-7824; mishamax73@mail.ru

Sergey N. Kryuchkov, DSc (Agro), chief researcher of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding; ORCID 0000-0001-8338-6460; RSCI ID: 357954; kryuchkovs@vfanc.ru

Alexandra S. Solomentseva, CSc (Agro), leading researcher of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding ORCID 0000-0002-5857-1004; Scopus: 57220036834; RSCI ID: 756338; WOS Research ID: W-4142-2018; alexis2425@mail.ru* (author-correspondent)

Sergey A. Egorov, junior researcher of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding, post graduate student; ORCID 0000-0001-8234-7355; RSCI ID: 1124794; egorov-sa@vfanc.ru

Darya A. Gorbushova, laboratory research assistant of the laboratory of selection, seed production and nursery breeding; ORCID 0009-0006-4978-4143; RSCI ID: 1225036; gorbushova-d@vfanc.ru

Solonkin A.V., Kryuchkov S.N., Solomentseva A.S., Egorov C.A., Gorbushova D.A. carried out practical and 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/10.26897/1997-6011-2025-1-129-133>
УДК 581.543:712



МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛАНДШАФТНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ

Х.Г. Асадов[✉], Е.Дж. Сулейманова, Н.Х. Мустафазаде

Национальное Аэрокосмическое Агентство; г. Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация. Целью работы является исследование возможности разработки нового метода и соответствующей методики для обнаружения сезонных изменений в водонасыщенных и прибрежных ландшафтных образованиях. Для оценки сезонных изменений природных зон предложен интегрально-мультипликативный критерий в качестве альтернативы существующему векторному критерию, используемому в технологии обработки спектральных данных «Tasseled Cap». Определено, что предлагаемый метод по сравнению с известным аналогом предусматривает использование дополнительного экстремального признака для подтверждения выявления характерных природных зон при мониторинге земной поверхности.

Ключевые слова: ландшафтные образования, оптимизация, сезонные изменения, водонасыщенные зоны, экосистема, урбанизация

Формат цитирования: Асадов Х.Г., Сулейманова Е.Дж., Мустафазаде Н.Х. Методика обнаружения сезонных изменений в ландшафтных образованиях // Природообустройство. 2025. № 1. С. 129-133. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-129-133>

Scientific article

THE METHOD OF DETECTING SEASONAL CHANGES IN LANDSCAPE FORMATIONS

H.G. Asadov[✉], E.J. Suleymanova, N.H. Mustafazade

National Aerospace Agency; Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract. The aim of the study is to investigate the possibility of developing a new method and an appropriate technique for detecting seasonal changes in water-saturated and coastal landscape formations. To assess seasonal changes in natural areas, an integral multiplicative criterion is proposed as an alternative to the existing vector criterion used in the technology of processing spectral data “Tasseled Cap”. It is determined that the proposed method, in comparison with the known analogue, provides for the use of an additional extreme feature to confirm the identification of characteristic natural zones when monitoring the Earth’s surface.

Keywords: landscape formations, optimization, seasonal changes, water-saturated zones, ecosystem, urbanization

Format of citation: Asadov H.G., Suleymanova E.J., Mustafazade N.H. Methodology for detecting seasonal changes in landscape formations // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 129-133. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-129-133>

Введение. Антропогенная деятельность (включая процессы урбанизации и развития сельского хозяйства) привела к значительным потерям водонасыщенных и прибрежных территорий [1]. Как результат, уменьшились экосистемы, зависящие от указанных водных ресурсов [2, 3]. Подобные изменения регулярно фиксируются спектрометрической аппаратурой, установленной на таких спутниках дистанционного зондирования, как Landsat, Spot, IRS и др. Количественная оценка происходящих изменений традиционно осуществляется путем

анализа спектральных данных используемых средств дистанционного зондирования. При этом широко применяется метод индексной оценки с использованием таких индексов, как NDVI, LAI и др. [4-6]. Вместе с тем существует метод анализа векторных изменений (CVA), который позволяет определить направление и величину изменений в многомерном спектральном пространстве [7, 8]. Метод CVA позволяет определить пороговые значения изменений в земляном покрове и отличить их от тех незначительных изменений, которые формируются ввиду влияния

атмосферных воздействий или по причине несовершенства измерительной аппаратуры [8]. Для реализации метода CVA используются различные процедуры обработки спектральных данных – такие, как (а) – ортогональная трансформация спектральных данных [6, 9]; (б) – метод Tasseled Cap (TC).

Как отмечается [10], метод CVA был разработан с использованием таких компонент TC анализа данных Landsat, как яркость, зеленость и влажность с целью интерпретации специфических биофизических изменений. В общем случае TC является линейной трансформацией данных шести спектральных каналов Landsat 8 (синий, зеленый, красный, NIR, SWIR1, SWIR2) в шесть композитных спектральных параметров, первыми тремя из которых являются яркость (B), зеленость (G) и влажность (W). Такая трансформация позволяет уменьшить объем требуемых данных и оценить важнейшие физические параметры объектов на поверхности Земли [11]. Указанные три компонента позволяют осуществить не только мониторинг растительных участков, но и состояние опустыненных каменистых участков. Согласно [12] B, G, W компоненты TC преобразования определяются по формулам:

$$B = 0,3521 \cdot B_2 + 0,3899 \cdot B_3 + 0,3825 \cdot B_4 + 0,6985 \cdot B_5 + 0,2343 \cdot B_6 - 0,1867 \cdot B_7; \quad (1)$$

$$G = -0,3301B_2 + 0,3455 \cdot B_3 - 0,4505 \cdot B_4 + 0,6970 \cdot B_5 - 0,0448 \cdot B_6 - 0,2840 \cdot B_7; \quad (2)$$

$$W = 0,2651B_2 + 0,2367 \cdot B_3 + 0,1296 \cdot B_4 + 0,0590 \cdot B_5 - 0,7506 \cdot B_6 + 0,5386 \cdot B_7, \quad (3)$$

где B_1 – B_7 указывают на значения данных, имеющихся на выходах вышеуказанных спектральных каналов.

Согласно [10] метод CVA основан на вычислении Эвклидовой дистанции между приращенными показателями B, G, W по формуле:

$$C_m = \sqrt{(B_1 - B_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (W_1 - W_2)^2}, \quad (4)$$

где C_m – величина результирующего изменения, индексы 1, 2 определяют значения показателей в моменты t_1 и t_2 , где $t_2 > t_1$.

Вместе с тем показатели B, G, W формируются согласно (1)–(3) на базе единого множества спектральных показателей, и между ними существуют определенное скрытые связи. Критерий (4), на наш взгляд, позволяет определить эти скрытые связи. В проведенных исследованиях вместо векториального показателя C_m предлагается определенный скалярный показатель, вычисляемый по методике определения геометрического среднего приростов $\Delta B, \Delta G, \Delta W$.

Цель исследований: изучение возможности разработки нового метода и соответствующей методики для обнаружения сезонных изменений в водонасыщенных и прибрежных ландшафтных образованиях.

Материалы и методы исследований. Вместо линейного показателя C_m для оценки изменений, происходящих в различных ландшафтах, предлагается следующий объемный показатель V_m , определяемый как

$$V_m = \sqrt{(B_1 - B_2)^2 \cdot (G_1 - G_2)^2 \cdot (W_1 - W_2)^2}. \quad (5)$$

Обозначив

$$B_1 - B_2 = \Delta B; \quad (6)$$

$$G_1 - G_2 = \Delta G; \quad (7)$$

$$W_1 - W_2 = \Delta W \quad (8)$$

и далее для удобства записи, выполнив введение обозначения

$$\Delta B = x; \Delta G = y; \Delta W = z, \quad (9)$$

получим:

$$V_m^2 = x^2 \cdot y^2 \cdot z^2. \quad (10)$$

В качестве исходного предположения прием существования следующих функциональных зависимостей:

$$x = f(z); \quad (11)$$

$$x = \varphi(y); \quad (12)$$

$$y = \psi(z). \quad (13)$$

С учетом выражений (10)–(13) можно сформулировать следующие оптимизационные задачи:

1) поиск оптимального вида функции $f(z)$, при которой интегральный показатель

$$F_1 = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} f(z)^2 \cdot y^2 \cdot z^2 dz \quad (14)$$

достигает экстремума;

2) поиск оптимального вида функции $\varphi(y)$, при которой интегральный показатель

$$F_2 = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \varphi(y)^2 \cdot y^2 \cdot z^2 dy \quad (15)$$

достигает экстремума;

3) поиск оптимального вида функции $\psi(z)$, при которой интегральный показатель

$$F_3 = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} x^2 \cdot \psi(z)^2 \cdot z^2 dz \quad (16)$$

достигает экстремума.

Следует отметить, что решения сформированных выше оптимизационных задач

идентичны, и приведем решение только первой задачи.

Для получения решения первой задачи в явном виде применительно к искомой функции $f(z)$ примем следующее ограничительное условие:

$$\int_{z_{\min}}^{z_{\max}} f(z) dz = C_1. \quad (17)$$

Возможный вид функций $f(z)$, отвечающих условию (17), показан на рисунке 1.

Математически условие (17) означает, что поиск вида оптимальной функции $f(z)$ должен быть осуществлен в таком подклассе непрерывных и дважды дифференцируемых функций, которые отвечают этому условию. С учетом выражений (16) и (17) составим целевой функционал безусловной вариационной оптимизации F_{10} , где

$$F_{10} = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} f(z)^2 \cdot y^2 \cdot z^2 dz + \lambda \left[\int_{z_{\min}}^{z_{\max}} f(z) dz - C_1 \right], \quad (18)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Согласно методу Эйлера решение задачи (18) должно ответить условию:

$$\frac{d\{f(z)^2 \cdot y^2 \cdot z^2 + \lambda f(z)\}}{df(z)} = 0. \quad (19)$$

Из выражения (19) получаем

$$2f(z) y^2 \cdot z^2 + \lambda = 0. \quad (20)$$

Из выражения (20) находим:

$$f(z) = -\frac{\lambda}{2y^2 z^2}. \quad (21)$$

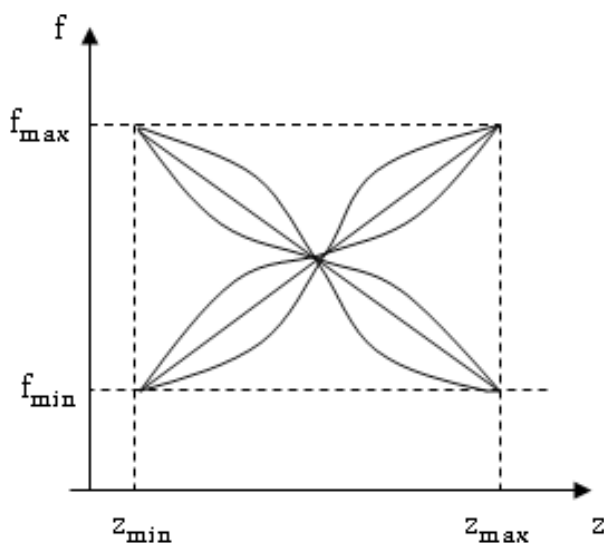


Рис. 1. Общий вид некоторых возможных функций $f = f(z)$, отвечающих условию (17)

Fig. 1. General view of some possible functions $f = f(z)$, meeting the condition (17)

С учетом выражений (17) и (21) имеем

$$-\int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \frac{\lambda}{2y^2 z^2} dz = C_1. \quad (22)$$

Из выражения (22) находим:

$$\lambda = -\frac{2C_1 y^2}{\int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \frac{dz}{z^2}}. \quad (23)$$

С учетом выражений (21) и (23) окончательно получаем:

$$f(z)_{opt} = \frac{C_1 z_{\min} z_{\max}}{z^2 \Delta z_{\max}}, \quad (24)$$

где $\Delta z_{\max} = z_{\max} - z_{\min}$.

При решении (24) целевой функционал F_{10} достигает минимума, так как производная выражения (20) по искомой функции всегда является положительной величиной.

Вычислим минимальную величину F_{10} с учетом решения (24).

Имеем

$$F_{1min} = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \left(\frac{C_1 z_{\min} z_{\max}}{z^2 \Delta z_{\max}} \right)^2 y^2 z^2 dz = \frac{y^2 C_1^2 z_{\min} z_{\max}}{\Delta z_{\max}}. \quad (25)$$

С учетом идентичности сформулированных выше трех задач, для второй и третьей задач, сформулировав дополнительные условия:

$$\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \phi(y) dy = C_2 \quad (26)$$

$$\text{и} \quad \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \psi(z) dz = C_3, \quad (27)$$

решение этих оптимизационных задач по аналогии с (24) запишем в виде:

$$\phi(y)_{opt} = \frac{C_2 y_{\min} y_{\max}}{y^2 \Delta y_{\max}}; \quad (28)$$

$$\psi(z)_{opt} = \frac{C_3 z_{\min} z_{\max}}{z^2 \Delta z_{\max}}. \quad (29)$$

Можно показать, что при решениях (28) и (29) целевые функционалы соответствующих оптимизационных задач достигают минимума.

Результаты и их обсуждение. Основное преимущество предложенного критерия (5) по сравнению с векторным критерием (4) заключается в том, что предлагаемый метод позволяет выработать некоторый экстремальный показатель (в данном случае F_{01}), который, достигая минимума, подтверждает наличие оптимальной взаимосвязи таких композитных показателей технологии Tasseled Cap (TC), как B, G и W.

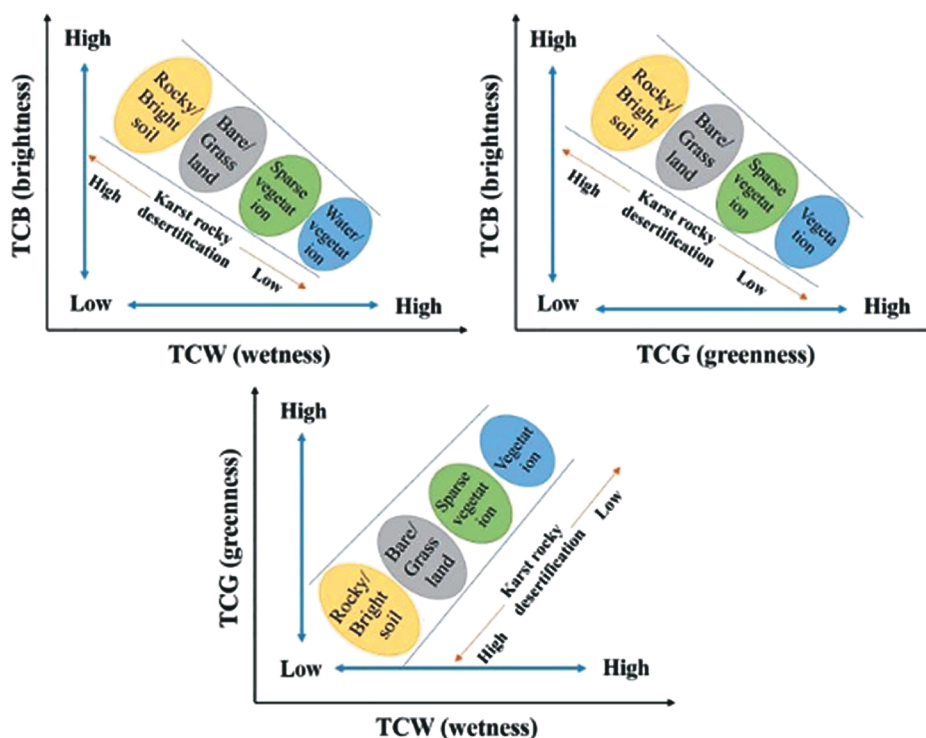


Рис. 2. Функциональная взаимосвязь показателей технологии Tasseled Cap при переходе с одной природной зоны в другую [13]

Fig. 2. Functional relationship of Tasseled Cap technology indicators during the transition from one natural zone to another [13]

Если учесть, что взаимосвязи этих показателей для различных природных сред уже известны и представлены графически (рис. 2) [13], то предлагаемый интегральный показатель может быть использован в качестве дополнительного экстремального показателя перехода соответствующих композитного показателя на оси абсциссы.

Выводы

1. Для оценки характера временных изменений природных зон предложен

интегрально-мультипликативный критерий в качестве альтернативы существующему векторному критерию, определяющему длину вектора изменений специфических композитных показателей технологии «Tasseled Cap».

2. Показано, что предлагаемый метод по сравнению с известным аналогом позволяет выработать дополнительный экстремальный признак для подтверждения характерных природных зон при мониторинге земной поверхности.

Список использованных источников / References

1. Syphard A.D. and Garcia M.W. 2001. Human and beaver induced wetland changes in the Chickahominy River watershed from 1953 to 1994. *Wetlands*. 21:342-53.
2. Ehrenfeld J.G. 2000. Evaluating wetlands within an urban context. *Ecological Engineering*. 15:253-65.
3. Winter T.C., Rosenberry D.O., Buso D.C. and Merk D.A. 2001. Water source to four U.S. Wetlands: implications for wetland management. *Wetlands*. 21:462-73.
4. Coppin P., Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B. and Lambin E. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring; a review. *International Journal of Remote Sensing*. 25:1565-96.
5. Hayes D.J. and Sader S.A. 2001. Comparison of change detection techniques for monitoring tropical forest clearing and vegetation regrowth in a time series. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 67:1067-75.
6. Dymond C.C., Mladenoff D.J. and Radeloff V.C. 2002. Phenological differences in Tasseled Cap indices improve deciduous forest classification. *Remote Sensing of Environment*. 80:460-72.
7. Houhoulis P.F. and Michener W.K. 2000. Detecting wetland change: a rule-based approach using NWI and SPOT-XS data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 66:205-11.
8. Civco D.L., Hurd J.D., Wilson E.H., Song M. and Zhang Z. 2002. A comparison of land use and land cover change detection methods. *American Congress on Surveying & Mapping – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 2002. Annual Conference Proceedings.
9. Parmenter A.W., Hansen A., Kennedy R., Cohen W., Langner U., Lawrence R., Maxwell B., Gallant A. and Aspinall R. 2003. Land use and land cover change in the Greater

Yellowstone Ecosystem: 1975-1995. Ecological Applications. 13:687-703.

10. Baker C., Lawrence R.L., Montagne C., Pat-ten D. 2007. Change detection of wetland ecosystems using landsat imagery and change vector analysis // Wetlands. Vol. 27, № 3. Pp. 610-619.

11. Li D. and Tang P. A sensor specified method based on spectral transformation for masking cloud in landsat data // IEEE J Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2013. № 6. Pp. 1619-1627.

Об авторах

Хикмет Гамидович Асадов, д-р техн. наук, профессор; SKOPUS 26640187800, asadzade@rambler.ru

Сулейманова Егане Джалал гызы, канд. техн. наук; suleymanovayegane1964@gmail.com

Мустафазаде Наира Хансувар гызы, канд. техн. наук; nm_609@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Асадов Х.Г., Сулейманова Е.Д., Мустафазаде Н.Х. 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 interests

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 16.09.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 11.12.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 11.12.2024

12. Li B., Li C., Ti X. Yan. Study of derivation of tasseled cap transformation for Landsat 8 OLI images Sci. Surv. Mapp. 2016. № 41. Pp. 102-107.

13. Zhang J., Liu M., Liu X., Luo W., Wu L., Zhu L. Spectral analysis of seasonal rock and vegetation changes for detecting karst rocky desertification in southwest China // International journal of applied observations and geoinformation. 2021. 100.

About the authors

Hikmet G. Asadov, DSc (Eng), professor; SKOPUS 26640187800, asadzade@rambler.ru

Erane J. Suleymanova, CSs (Eng); suleymanovayegane1964@gmail.com

Naira H. Mustafazade, CSs (Eng); nm_609@mail.ru

Asadov H.G., Suleymanova E.D., Mustafazade N.H. carried out practical and 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/10.26897/1997-6011-2025-1-134-139>

УДК 630.181.2: 634.21



СОРТОВАЯ И ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТРЕХЛЕТНИХ СЕЯНЦЕВ АБРИКОСА ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ ИНТРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЫ КРАСНОЯРСКА

Е.А. Савинич[✉], Р.Н. Матвеева, О.Ф. Буторова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева; 660021, Красноярский край, г. Красноярск, пр-кт им. газеты Красноярский рабочий, 31, Россия

Аннотация. Абрикос обыкновенный, обладая ценными плодовыми, декоративными, почвоулучшающими, экологическими свойствами, широко используется на юге России. Целесообразно подобрать сорта, которые будут успешно произрастать в северных районах. Цель исследований – сравнить показатели роста и формирования фотосинтетической поверхности у трехлетних сеянцев абрикоса обыкновенного сортов Академик, Бай, Королевский в условиях интродукции (пригородная зона Красноярск); отселектировать быстрорастущие и экологически эффективные экземпляры внутри сортов, отличающихся интенсивным ростом, наибольшей листовой поверхностью. Посев стратифицированных семян проведен в мае 2022 г. в Ботаническом саду им. Вс.М. Кротовского. В трехлетнем возрасте у сеянцев определены биометрические показатели: высота, диаметр стволика, количество, размеры, площадь листьев, фотосинтетическая поверхность листьев. Установлено, что сеянцы имеют высокий уровень изменчивости по всем показателям. Отмечено превышение стволика у отдельных сеянцев сорта Королевский: по высоте и диаметру – на 33,3-71,4%; длине и ширине листа – на 20,0-26,7%; площади листа – на 25,4-57,5%. Отселектированы экземпляры, имеющие наибольшие показатели по количеству листьев, площади листовой пластинки и общей фотосинтетической поверхности. Высокий уровень изменчивости наблюдается по высоте, диаметру стволика, количеству листьев. Количество листьев, их длина и площадь преобладают у сорта Королевский. Отселектированы быстрорастущие, экологически эффективные экземпляры для дальнейшего вегетативного размножения и использования при создании быстрорастущих и экологически эффективных посадок.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Селекция древесных растений» проекта «Селекционно-генетические основы формирования целевых насаждений и рационального использования древесных ресурсов Красноярского края (Енисейской Сибири)» (№ FEFE-2024-0013).

Ключевые слова: сортовая и индивидуальная изменчивость, абрикос обыкновенный, сорт, сеянцы, отбор, Сибирь

Формат цитирования: Савинич Е.А., Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф. Сортовая и индивидуальная изменчивость трехлетних сеянцев абрикоса обыкновенного при интродукции в условиях пригородной зоны Красноярск // Природообустройство. 2025. № 1. С. 134-139. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-134-139>

Original article

VARIETAL AND INDIVIDUAL VARIABILITY OF THREE-YEAR COMMON APRICOT SEEDLINGS AT INTRODUCTION IN THE SUBURBAN ZONE OF KRASNOYARSK

Е.А. Savinich[✉], R.N. Matveeva, O.F. Butorova

Federal State Budgetary Educational Institution Siberian State University of Science and Technology named after acad. M.F. Reshetnev; 660021, Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk, Avenue named after newspaper Krasnoyarsk Worker, 31, Russia

Abstract. Common apricot has valuable fruit, decorative, soil-improving, and ecological properties. It is advisable to choose varieties that will grow successfully in the northern regions. The aim of the research was to compare the growth and formation of photosynthetic surface in three-year-old seedlings of common apricot the varieties Academic, Bai, Korolevsky under the conditions of introduction (suburban zone of Krasnoyarsk); to select fast-growing and environmentally efficient specimens within varieties that

are characterized by intensive growth, the largest leaf surface. Sowing of stratified seeds was carried out in May 2022 in the Botanical Garden named after Vs.M. Krutovsky. Biometric indicators: height, trunk diameter, number, size, leaf area; photosynthetic surface of leaves on three-year-old seedlings have been identified. It has been established that seedlings have a high level of variability in all indicators. The height and diameter of the stem in individual seedlings of the Korolevsky variety were exceeded by 33.3-71.4%, the length and width of the leaf by 20.0-26.7%, the leaf area by 25.4-57.5%. Specimens with the highest indicators in terms of the number of leaves, leaf blade area and total photosynthetic surface were selected. A high level of variability is observed in height, trunk diameter, and number of leaves. In terms of the number of leaves, their length and area, there is a predominance of the Korolevsky variety. Fast-growing, environmentally efficient specimens have been selected for further vegetative propagation and use in the creation of fast-growing and environmentally efficient plantings.

The study was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the implementation of the project “Selection and genetic foundations for the formation of target plantations and rational use of wood resources in the Krasnoyarsk Territory (Yenisey Siberia)” (NoFEFE-2024-0013) by the team of the scientific laboratory “Selection of woody plants”.

Keywords: varietal and individual variability, common apricot, variety, seedlings, selection, Siberia

Format of citation: Savinich E.A., Matveeva, R.N., Butorova O.F. Varietal and individual variability of three-year common apricot seedlings at introduction in the suburban zone of Krasnoyarsk // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 134-139. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-134-139>

Введение. Абрикос обыкновенный (*Prunus armeniaca*) является ценной плодовой культурой, обладающей и многими лесоводственными качествами [1, 2]. Данный вид является теплолюбивой породой, но он успешно произрастает и в северных районах России, на Урале, Дальнем Востоке, в Сибири [3]. Отмечается, что абрикос обыкновенный обладает почвозащитными функциями, предохраняя почву от ветровой и водной эрозии, в связи с формированием мощной корневой системы [4]. Засухоустойчивость и зимостойкость являются основными показателями адаптации растений к экологическим условиям [5]. Степень адаптации сортов зависит от принадлежности разным эколого-географическим группам [6].

Зимостойкие виды и сорта абрикоса имеют замедленные ритмы осенне-зимне-весеннего периода развития и требуют для прохождения покоя более продолжительного воздействия положительных температур. Весной для наступления фенологических фаз развития для них требуются более высокие температуры, чем для незимостойких. Но при недостатке влаги уменьшаются формирование и зрелость генеративных почек, размеры плодов и листьев [7].

Применяемый в озеленении абрикос характеризуется средней газо- и дымоустойчивостью. Экологическая роль растений тесно связана с оценкой массы или поверхностью листьев [8].

Экологическая роль абрикоса и других декоративных растений оценивается величиной поверхности листьев [9-11]. В результате

многолетних исследований установлено значительное варьирование у разных форм абрикоса обыкновенного по размеру листьев: от очень крупных до мелких, что указывает на перспективность отбора экологически эффективных экземпляров по данному показателю [12].

Р.М. Османовым и др. [13] установлен высокий уровень изменчивости числа листьев у одностолетних сеянцев абрикоса обыкновенного.

Цель исследований: сравнить показатели роста и формирования фотосинтетической поверхности у трехлетних сеянцев абрикоса обыкновенного сортов Академик, Бай, Королевский; отселектировать быстрорастущие и экологически эффективные экземпляры.

Материалы и методы исследований. Проводили сопоставление показателей трехлетних сеянцев абрикоса обыкновенного сортов Академик, Бай и Королевский, выращиваемых в Ботаническом саду им. Вс.М. Крутовского.

Сорт абрикоса Академик является гибридом, полученным Г.Т. Казьминым и В.А. Марусичем на Дальнем Востоке при скрещивании сортов Спутник и Хабаровский. Он отличается ежегодным плодоношением, устойчив к засухе и переувлажнению. Сорт Бай получен Н.В. Овсянниковым от скрещивания сортов Седанский и Еловицкий. Деревья достигают высоты до 4 м, имеют раскидистую густую крону. Зимостойкость хорошая. Сорт Королевский получен в 1908 г. из косточки сорта Персиковый. Цветки – крупные. Цветение начинается 10-15 мая. Самоплодность невысокая.

Для изучения изменчивости показателей сеянцев и отбора посев стратифицированных семян проводили в мае 2022 г. грядковым способом в поперечные борозды по общепринятой методике [14]. Расстояние между рядами составляло 20 см, в ряду – 10 см. У трехлетних сеянцев в конце августа определяли следующие показатели: высоту, диаметр стволика, количество, размеры листьев и их фотосинтетическую поверхность.

Показатели растений определяли, используя линейку и штангенциркуль. Фотосинтетическую поверхность определяли по формуле:

$$D \times \Pi \times K,$$

где D – длина листа; Π – ширина листа; K – коэффициент формы, равный для трехлетних сеянцев сортов Академик, Бай – 0,70, Королевский – 0,71.

Коэффициент устанавливали расчетным путем по методике М.М. Дорофеевой,

С.А. Бонечкой [15]. Достоверность различий показателей между сеянцами разных сортов устанавливали по t -критерию Стьюдента, уровень изменчивости – по С.А. Мамаеву [16]. Экспериментальные данные обрабатывали по программам MS Excel.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что уровень изменчивости высоты у трехлетних сеянцев абрикоса обыкновенного сравниваемых сортов является высоким (табл. 1).

Наибольшие значения по высоте и диаметру стволика были у сеянцев сорта Королевский в сравнении с сортами Академик и Бай, что доказано статистически ($t_{ф} > t_{05}$).

Уровень изменчивости по количеству листьев на трехлетних сеянцах высокий у всех сортов, без достоверных различий между ними (рис.).

Уровень изменчивости по длине листа у сортов является низким. Длина листьев

Таблица 1. Показатели сеянцев абрикоса обыкновенного по высоте и диаметру стволика
Table 1. Indicators of *Prunus armeniaca* L. seedlings by height and trunk diameter

Сорт Variety	X ср.	$\pm m$	V, %	P, %	$t_{факт}$ при $t_{05}=2,06$ $t_{факт}$ at $t_{05}=2,06$	Уровень изменчивости Level of changeability
Высота, см / Height, cm						
Академик / Academic	56,1	2,83	24,7	5,0	2,59	Высокий / High
Бай / Bai	57,7	4,00	32,6	6,9	2,28	Высокий / High
Королевский / Korolevsky	77,1	7,60	31,2	9,8	–	Высокий / High
Среднее значение / Average value	63,6					
Диаметр стволика, см / Trunk diameter, cm						
Академик / Academic	0,9	0,06	31,1	6,7	2,57	Высокий / High
Бай / Bai	0,7	0,04	30,0	5,7	4,64	Высокий / High
Королевский / Korolevsky	1,2	0,10	26,7	8,3	–	Высокий / High
Среднее значение / Average value	0,9					

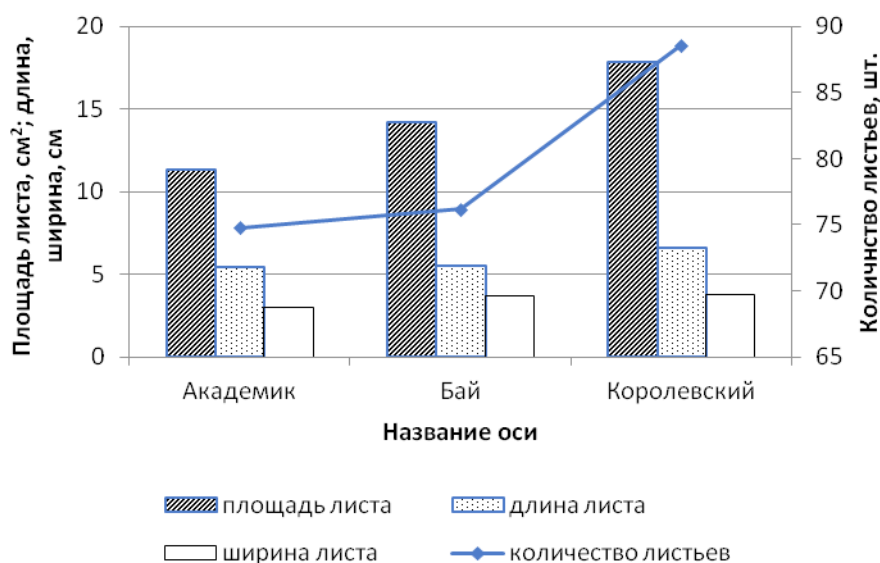


Рис. 1. Параметры листьев трехлетних сеянцев абрикоса разных сортов
Fig. 1. Parameters of leaves of three-year-old apricot seedlings of different varieties

у сеянцев сорта Королевский была на 20,0-22,2% больше в сравнении с сортами Академик и Бай. Достоверность различий по длине, ширине листа доказана между сортом Королевский и Академик, по длине листа – между сортами Королевский и Бай ($t_{\phi} > t_{05}$). Уровень изменчивости ширины листа – от низкого до среднего.

Наибольшая площадь листа зафиксирована у сорта Королевский, наименьшая – у сорта Академик. Различие составило 57,5%. Уровень изменчивости данного показателя – от среднего до высокого. Достоверные различия по площади листа отмечены между сортом

Королевский (на 25,3-57,5%) и сортами Академик, Бай ($t_{\phi} > t_{05}$).

Исследования показали, что сортовая изменчивость проявилась у трехлетних сеянцев абрикоса обыкновенного по количеству боковых побегов, которые варьируют от 1 до 7 шт., и это влияет на общую фотосинтезирующую поверхность (табл. 2).

Были отобраны по высоте экземпляры № 1-1, 2-2 (78 см) сорта Академик, № 6-3 и 6-1 сорта Бай (93 и 79 см), № 5-7, 5-10 (112 и 93 см) сорта Королевский, по количеству листьев и общей фотосинтетической поверхности (табл. 3).

Таблица 2. Количество листьев и общая фотосинтезирующая поверхность в зависимости от числа побегов

Table 2. Number of leaves and total photosynthetic surface as a function of number of shoots

Сорт Variety	Количество побегов, шт. Number of shoots, pcs	Количество листьев Number of leaves		Площадь листьев Square of leaves	
		шт. / pcs	% к Хср. / % to Xav.	см ² / cm ²	% к Хср. / % to Xav.
Академик / Academic	1-2	40,3	53,9	777,8	93,1
	3-6	81,8	109,4	917,6	109,9
Среднее значение / Average value		74,8	100,0	835,0	100,0
Бай / Bai	1-2	58,0	76,1	654,4	85,7
	3-6	93,7	123,0	925,4	124,7
Среднее значение / Average value		76,2	100,0	763,8	100,0
Королевский / Korolevsky	1-2	73,2	82,6	1107,4	96,1
	3-6	111,4	125,7	1427,0	123,8
Среднее значение / Average value		88,6	100,0	1152,2	100,0

Таблица 3. Отобранные экземпляры абрикоса обыкновенного по экологической эффективности

Table 3. Selected specimens of common apricot for ecological efficiency

Сорт Variety	№ сеянца Seedling No	Количество листьев Number of leaves		Площадь листьев на сеянце Square of leaves on the seedling	
		шт.	% к Хср. / % to Xav.	см ² / cm ²	% к Хср. / % to Xav.
Академик Academic	1-1	115	153,7	1307,55	156,6
	1-8	98	131,0	1173,06	140,5
	2-2	98	131,0	1111,32	133,1
	5-8	98	131,0	1090,74	130,6
	6-1	97	129,7	1122,29	134,4
Среднее / Average		74,8	100,0	835,0	100,0
Бай Bai	4-9	109	143,0	1136,9	148,8
	4-7	104	136,5	1121,1	146,8
	6-3	102	133,8	1178,1	154,2
	5-5	90	118,1	1203,3	157,5
	5-1	89	116,8	1202,4	157,4
Среднее / Average		76,2	100,0	763,8	100,0
Королевский Korolevsky	5-7	135	152,4	1504,8	130,6
	2-8	108	121,9	2039,7	177,0
	2-2	104	117,4	1410,3	122,4
Среднее / Average		88,6	100,0	1152,2	100,0

Экологически эффективные экземпляры, отличающиеся по площади листьев на 30,6-56,6%, выделены у сорта Академик № 1-1, 1-8, 2-2, 5-8, 6-1; на 46,8-57,5% у сорта Бай № 5-5, 5-1, 6-3, 4-9, 4-7; на 22,4-77,0% у сорта Королевский № 2-8, 5-7, 2-2.

Выводы

1. Высота, диаметр стволика, количество листьев трехлетних сеянцев абрикоса

обыкновенного характеризуются высоким уровнем изменчивости, площадь листьев – средним уровнем.

2. По количеству, размерам листьев и их фотосинтезирующей поверхности сорт Королевский превосходит сеянцы сортов Академик и Бай.

3. Отсеleetированные быстрорастущие и экологически эффективные экземпляры целесообразно использовать для дальнейшего вегетативного размножения.

Список использованных источников

1. Дускабилов Т. Абрикос на юге Средней Сибири / Т. Дускабилов, Т.И. Дускабилова, Е.И. Пискунов. Новосибирск: СО РАСХН, 2004. 78 с. ISBN 5-9657-0001-6
2. Железов В.К. Северный сад: Сотворение чуда своими руками. СПб.: Победа. Качество. Здоровье, 2019. 288 с. ISBN 978-5-6041049-2-7
3. Ковалев Н.В. Абрикос. М.: Сельхозиздат, 1963. 288 с.
4. Curiel-Rodriguez A., Espinoza-Espinoza J.R., Cruz-Hernandez J.P., Almaguer-Vargas G. Modelos de regresion para estimar area de la hoja y biomasa de organos en arboles jovenes de manzano // Rev. Chapingo. Ser. Horticult. 2007. Vol. 13, No 2. С. 171-177.
5. Анатов Д.М. Сравнительная оценка сеянцев абрикоса по засухоустойчивости и зимостойкости в условиях дагестана / Д.М. Анатов, З.М. Асадулаев, Р.М. Османов // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2019. Вып. 133. С. 199-205. DOI: org/10.36305/0513-1634-2019-133-199-207.
6. Киселева Н.С. Способ вычисления площади листа груши по линейным измерениям с помощью расчетных коэффициентов и методов вариационной статистики // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52, № 1. С. 211-217. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.211.
7. Стародубцева Е.П. Устойчивость растений абрикоса к стресс-факторам окружающей среды в условиях Оренбургской области / Е.П. Стародубцева, Ф.К. Джураева // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 6 (62). С. 219-221. EDN: XSLBFV.
8. Чукарина А.В. Влияние агрохимикатов на рост сеянцев абрикоса обыкновенного в условиях степи / А.В. Чукарина И.Я., И.Я. Чеплянский, Е.Н. Лобанова, Н.Е. Проказин // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2018. № 53. С. 111-114. EDN: YOIBNZ.
9. Козловская З.А. Изучение и использование коллекции для селекции подвоев абрикоса / З.А. Козловская, Н.Л. Рудницкая // Плодоводство. 2016. Т. 28. С. 138-146.
10. Дорофеева М.М. Сравнительный анализ некоторых классических и современных методик определения площади листовой поверхности / М.М. Дорофеева, С.А. Бонецкая // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56. Вып. 2. С. 182-192. DOI: 10.31857/S0033994620020041. EDN: PUYJUQ.
11. Sestras R., Ardelean M., Ghidra V., Botes C., Chis Pleana, Patrascu Bianca, Barbos A. Корреляции между различными элементами силнорослости сеянцев яблони в F₁. Correlations among different elements of vigour in F₁ apple seedlings // Bul. Univ. ~Esti. agr. ~Esi med. vet., Cluj-Napoca. Ser. Hort. 2004. № 61. С. 441.
12. Саудабаева А.Ж. Результаты изучения морфобиологических признаков перспективных форм

References

1. Duskabilov T., Duskabilova T.I., Piskunov E.I. Apricot in the south of Central Siberia. Novosibirsk: RASHN. Sib. otd-nie. GNU NIAP Hkakasii, 2004. 78 p. ISBN 5-9657-0001-6
2. Zhelezov V.K. Northern Garden: Creating a miracle with your own hands. SPb.: Victory. Quality. Health. 2019. 288 p. ISBN 978-5-6041049-2-7
3. Kovalev N.V. Apricot. M.: Selkhozizdat, 1963. 288 p.
4. Curiel-Rodriguez A., Espinoza-Espinoza J.R., Cruz-Hernandez J.P., Almaguer-Vargas G. Modelos de regresion para estimar area de la hoja y biomasa de organos en arboles jovenes de manzano // Rev. Chapingo. Ser. Horticult. 2007. 13, No 2. S. 171-177.
5. Anatov D.M., Asadulaev Z.M., Osmanov R.M. Comparative assessment of apricot seedlings for drought resistance and winter hardiness in the conditions of Dagestan // Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden. 2019, vyp. 133. P. 199-205. doi.org/10.36305/0513-1634-2019-133-199-207
6. Kiseleva N.S. A method for calculating the area of a pear leaf from linear measurements using calculated coefficients and methods of variation statistics // Agricultural biology. 2017. T. 52, No. 1. P. 211-217. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.211
7. Starodubceva E.P., Dzhuraeva F.K. Resistance of apricot plants to environmental stress factors in the conditions of the Orenburg region // News of the Orenburg State Agrarian University. 2016. No. 6(62). P. 219-221. EDN XSLBFV.
8. Chukarina A.V., Cheplyanskij I.Ya., Lobanova E.N., Prokazin N.E. The influence of agrochemicals on the growth of common apricot seedlings in steppe conditions // Current problems of the forestry complex. 2018. No. 53. P. 111-114. EDN YOIBNZ.
9. Kozlovskaya Z.A., Rudnitskaya N.L. Study and use of the collection for breeding apricot rootstock // Plodovodstvo. V. 28. 2016. P. 138-146.
10. Dorofeeva M.M., Boneckaya S.A. Comparative analysis of some classical and modern methods for determining leaf surface area // Plant Resources. 2020. T. 56, vyp. 2. P. 182-192. DOI 10.31857/S0033994620020041. – EDN PUYJUQ.
11. Sestras R., Ardelean M., Ghidra V., Botes C., Chis Pleana, Patrascu Bianca, Barbos A. Correlations between various elements of vigor of apple seedlings in F₁. Correlations among different elements of vigor in F₁ apple seedlings // Bul. Univ. ~Esti. agr. ~Esi med. vet., Cluj-Napoca. Ser. Hort. 2004. 61. P. 441.
12. Saudabaeva A.Zh., Mushinskij A.A., Pron'ko N.A. Results of studying morphobiological characteristics of promising forms of apricot // Agrarian scientific journal. 2023. No. 12. P. 70-74. doi.org/10.28983/asj.y2023i12 P. 70-74.
13. Osmanov R.M., Anatov D.M., Asadulaev Z.M. Morphological features and winter hardiness of *Prunus*

абрикоса / А.Ж. Саудабаева, А.А. Мушинский, Н.А. Пронько // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 70-74. DOI: org/10.28983/asj.y2023i12pp70-74.

13. Османов Р.М. Морфологические особенности и зимостойкость сеянцев *Prunus armeniaca* L. в условиях Гунибской экспериментальной базы Горного ботанического сада Дагестанского научного центра РАН / Р.М. Османов, Д.М. Анатов, З.М. Асадулаев // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2016. Т. 10, № 4. С. 49-53.

14. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / Под ред. Е.Н. Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК, 1999. 606 с.

15. Дорофеева М.М. Сравнительный анализ некоторых классических и современных методик определения площади листовой поверхности / М.М. Дорофеева, С.А. Бонецкая // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56. Вып. 2. С. 182-192. DOI: 10.31857/S0033994620020041. EDN: PUYJUQ.

16. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1973. 284 с.

armeniaca L. seedlings in the conditions of the Gunib experimental base of the Mountain Botanical Garden of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences // News of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences. 2016. T. 10, no. 4. P. 49-53.

14. Program and methodology for variety study of fruit, berry and nut crops / ed. E.N. Sedova and T.P. Ogoltsova. Orel: VNIISPК, 1999. 606 p.

15. Dorofeeva M.M., Boneckaya S.A. Comparative analysis of some classical and modern methods for determining leaf surface area // Plant Resources. 2020. V. 56, vyp. 2. P. 182-192. DOI 10.31857/S0033994620020041. – EDN PUYJUQ.

16. Mamaev S.A. Forms of intraspecific variability of woody plants (using the example of the Pinaceae family in the Urals). M.: Nauka, 1973. 284.

Об авторах

Елена Александровна Савинич, аспирант, м.н.с. лаборатории; ORCID 0009-0005-3971-6772; Author ID: 1058886; elenasavinich@gmail.com

Римма Никитична Матвеева, д-р. с.-х. наук., профессор кафедры селекции и озеленения; ORCID 0000-0002-3476-9622; Author ID: 57213600386; matveevrn@mail.ru

Ольга Федоровна Буторова, д-р. с.-х. наук., профессор кафедры селекции и озеленения; ORCID 0000-0001-8575-7464; Author ID: 57216968653; butorova.olga@mail.ru

About the authors

Elena A. Savinich, junior researcher of the laboratory; ORCID 0009-0005-3971-6772; Author ID: 1058886; elenasavinich@gmail.com

Rimma N. Matveeva, DSc (Agro), professor of the department of selection and landscaping; ORCID 0000-0002-3476-9622; Author ID: 57213600386; matveevrn@mail.ru

Olga F. Butorova, DSc (Agro), professor of the department of selection and landscaping; ORCID 0000-0001-8575-7464; Author ID: 57216968653; butorova.olga@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Савинич Е.А., Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф. 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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 26.04.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 10.11.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 10.11.2024

Savinich E.A., Matveeva, R.N., Butorova O.F. carried 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/10.26897/1997-6011-2025-1-140-146>

УДК 630.2*(470.41)



УНИКАЛЬНАЯ ТИСОВАЯ РОЩА В АЛАГИРСКОМ ЛЕСНИЧЕСТВЕ РСО-АЛАНИЯ

А.Б. Базаев

Горский государственный аграрный университет; 362040, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Кирова, 37, Россия

Аннотация. Цель исследований – установление характеристик тисовой рощи, выявленной в Тамискском участковом лесничестве Алагирского центрального лесничества Республики Северная Осетия-Алания. Представлены данные по основным характеристикам фитоценозов с тисом ягодным в составе. Объект исследований – уникальная тисовая роща в Алагирском лесничестве Республики Северная Осетия-Алания. Основные характеристики древостоя установлены по стандартной методике, принятой в таксации и в лесоводстве. Учет подроста, подлеска и живого напочвенного покрова произведен на круговых учетных площадках по 10 м² в соответствии с патентом РФ № 2084129. Для подроста и подлеска установлены состав, общая численность, высота и категория жизнеспособности. Для живого напочвенного покрова дана оценка встречаемости и проективного покрытия по видам. Показано распределение деревьев каждой породы по ступеням толщины. Численность деревьев тиса на объектах исследований составляет от 92 до 278 экз/га. Определены биометрические характеристики деревьев тиса разной высоты. Полученные результаты послужат основой для разработки программ по сохранению и восстановлению тиса ягодного.

Ключевые слова: РСО-Алания, горные леса, тис ягодный, естественное возобновление, подрост, подлесок, живой напочвенный покров

Формат цитирования: Базаев А.Б. Уникальная тисовая роща в Алагирском лесничестве РСО-Алания // Природообустройство. 2025. № 1. С. 140-146. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-140-146>

Original article

UNIQUE YEW GROVE IN THE ALAGIR FORESTRY OF THE REPUBLIC OF NORTH OSSETIA-ALANIA

A.B. Bazaev

Gorsky State Agrarian University: 37 Kirova St., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia – Alania, 362040. Russia

Abstract. The purpose of the study is to establish the characteristics of the yew grove identified in the Tamisk district forestry of the Alagir Central Forestry of the Republic of North Ossetia-Alania. Data on the main characteristics of phytocenoses containing yew berry are presented. The object of study is a unique yew grove in the Alagir forestry of the Republic of North Ossetia-Alania. The main characteristics of the forest stand were established according to standard methods adopted in taxation and forestry. The counting of young generation, undergrowth and living ground cover was carried out on circular survey plots of 10 m² in accordance with RF patent No. 2084129. For young generation and undergrowth, the composition, total number, height and viability category were established. For living ground cover, an assessment of occurrence and projective cover by species is given. The distribution of trees of each species according to thickness levels is shown. The number of yew trees at the study sites ranges from 92 to 278 pcs/ha. The biometric characteristics of trees of different heights have been determined. The results obtained serve to develop programs for the conservation and restoration of *Taxus baccata*.

Keywords: North Ossetia-Alania, mountain forests, yew berry, natural regeneration, young generation, undergrowth, living ground cover

Format of citation: Bazaev A.B. Unique yew grove in the Alagir forestry of the Republic of North Ossetia-Alania // Prirodoobustroystvo. 2025. No. 1. P. 140-146. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-140-146>

Введение. Тис ягодный (*Taxus baccata* L.) – краснокнижный вид, включенный в федеральную Красную книгу и в Красную книгу РСО-Алания. Изучению биологии

и экологии *Taxus baccata* посвящено множество публикаций не только отечественных [1-12], но и зарубежных исследователей [8-12]. В публикациях разных лет освещены некоторые вопросы

анатомии и морфологии хвои и побегов тиса ягодного [7]. Имеются сведения и о лекарственных свойствах тиса [4].

Популяция этого реликтового вида разбросана по многим субъектам РФ. Больше всего локализованных мест произрастания тиса зафиксировано на Кавказе [1, 2, 4]. За последние десятилетия плотность ареала тиса ягодного была сильно изрежена под воздействием массовых рубок главного пользования в 60-е и 70-е гг. прошедшего столетия. Практически все крупные деревья тиса были вырублены или повреждены в ходе проводимых рубок в течение этого длительного периода. К настоящему времени в сохранившихся локализованных местах произрастания тиса ягодного преобладают мелкие деревья и подрост [4].

Естественное возобновление тиса ягодного происходит лишь в непосредственной близости от деревьев репродуктивного возраста. При этом, как отмечают некоторые авторы, под пологом тисовых куртин самосев тиса отсутствует [8, 11]. Это можно объяснить неблагоприятными условиями, а именно недостатком освещенности. По нашим данным, внутри плотной куртины из тиса ягодного освещенность на поверхности почвы составляет 20-70 люкс в пасмурную погоду и 90-130 люкс – в солнечную [4, 10]. В среднем это составляет 0,2-0,4% от освещенности на открытом месте. Такой уровень светового довольствия недостаточен для любого вида растений. Именно по этой причине под пологом куртин из тиса живой напочвенный покров, подрост и подлесок полностью отсутствуют.

Цель исследований: установление характеристик тисовой рощи, выявленной в Тамискском участковом лесничестве Алагирского центрального лесничества Республики Северная Осетия-Алания.

Материалы и методы исследований. Объект исследований – тисовая роща, состоящая в основном из крупных деревьев. Исследования проводились в урочище Фассалугардан (лесной

фонд территориального отдела «Алагирское лесничество», Тамискское участковое лесничество, Республика Северная Осетия-Алания). Тисовая роща сформировалась под пологом древостоев смешанного состава. Тис произрастает на склонах разных экспозиций крутизной от 20 до 40°.

Основные характеристики древостоя установлены по общепринятой методике. Учет подроста, подлеска и живого напочвенного покрова производили на круговых учетных площадках по 10 м² в соответствии с патентом РФ № 2084129 [12]. Кроме видового состава, для подроста и подлеска устанавливали общую численность, высоту и категорию жизнеспособности. Встречаемость видов в живом напочвенном покрове и проективное покрытие определяли для каждого вида.

Результаты и их обсуждение. На объектах исследований тис ягодный встречается преимущественно в виде одиночных деревьев. Тис ягодный (*Taxus baccata* L.) произрастает на склонах восточной, юго-восточной и северо-западной экспозиций под пологом древостоев. В составе древостоя преобладает бук восточный (*Fagus orientalis* Lipsky). В небольших количествах или единично в формировании древостоя участвуют вяз гладкий (*Ulmus laevis* Pall.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), липа крупнолистная (*Tilia platyphyllos* Scop.), черешня (*Cerasus avium* (L.) Moench), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.).

Крутизна склонов, на которых произрастают древостои, составляет 25-40°. Основные (общие) сведения по объектам исследований представлены в таблице 1.

Распределение деревьев верхнего яруса по ступеням толщины является равномерным. Исключение составляет бук восточный. Для этой лесообразующей породы характерно наличие в составе древостоя очень крупных деревьев с диаметром ствола 68-96 см и молодого поколения с диаметром ствола от 8 до 32 см.

Таблица 1. Общие сведения по объектам исследования в урочище «Фассалугардан» РСО-Алания

Table 1. General information on the objects of research in the Fassalugardan tract of the Republic of North Ossetia-Alania

Характеристика Characteristics	Экспозиция склона / Exposition of the slope		
	Восточная eastern	Юго-восточная south-eastern	Северо-западная north-western
Крутизна склона, градусы / Steepness of the slope, degrees	30-40	20-25	35-40
Высота над уровнем моря, м / Altitude above sea level, m	838-850	852-858	857-866
Северная широта / Northern latitude	42°58.820	42°58.777	42°58.806
Восточная долгота / East longitude	44°11.695	44°11.778	44°11.721

Такое распределение деревьев по диаметру ствола является следствием прошлых рубок.

Состав древостоя и другие таксационные характеристики по объектам исследований представлены в таблице 2. Густота древостоев небольшая: от 196 до 291 деревьев на 1 га.

Как видим, состав древостоев по запасу стволовой древесины и численности деревьев по породам различается кардинальным образом. Нижний ярус древостоя во всех случаях представлен преимущественно тисом. Участие других лесобразующих пород в формировании подчиненного яруса в несколько раз меньше. Несмотря на то, что тис произрастает под пологом букового древостоя, численность деревьев тиса больше, чем количество деревьев бука. Основные характеристики деревьев тиса представлены в таблице 3.

На опытном участке преобладают деревья тиса ягодного с большим диаметром ствола. Самые крупные деревья достигают высоты 14 м при диаметре ствола 32 см. Доля деревьев тиса с диаметром ствола более 16 см составляет от 43 до 74%, что является редким случаем для Республики Северная Осетия-Алания (Базаев и др., 2023).

Все деревья тиса произрастают под пологом древостоя смешанного состава. Тис распределен по площади одиночными деревьями (наиболее крупные экземпляры) или небольшими группами и куртинами, в которых совместно произрастают деревья разной высоты и нескольких генераций. Тис ягодный под пологом древостоев разного состава встречается на большой площади – более 12 га.

На склоне юго-восточной экспозиции выявлены две куртины тиса, а на восточном

Таблица 2. Таксационная характеристика древостоев на опытном участке

Table 2. Taxation characteristics of stands at the experimental site

Характеристика Characteristics	Экспозиция склона / Exposition of the slope		
	Восточная eastern	Юго-восточная south-eastern	Северо-западная north-western
Состав древостоя по запасу, % Composition of the forest stand by stock, %	94Б4В2Тис	67Б27Гр3Кло 2Яс1Тис1Вш	91Б5Тис4Лп
Состав древостоя по численности, % Composition of the forest stand by quantity, %	51Тис41Б8В	42Б24Тис21 Гр7Кло5Яс1Вш	62Тис34Б4Лп
Общее количество деревьев без тиса, экз./га Total quantity of trees without yew, pcs / ha	196	291	279
Абсолютная полнота, м ² /га / Absolute thickness, m ² / ha	14,7	12,0	33,9
Запас стволовой древесины, м ³ /га Stock of stem wood, m ³ / ha	182	139	380
Средняя высота, м / Average height, m	26,1	21,5	24,7
Средний диаметр, см / Average diameter, cm	31,7	25,7	40,1

Примечание. Б – бук восточный, В – вяз гладкий, Вш – вишня птичья, Кло – клён остролистный, Лп – липа крупнолистная, Яс – ясень обыкновенный.

Note. Б – oriental beech, В – smooth elm, Вш – bird cherry, Кло – Norway maple, Лп – large-leaved linden, Яс – common ash.

Таблица 3. Основные характеристики деревьев тиса ягодного на опытном участке

Table 3. Main characteristics of berry yew trees at the experimental site

Характеристика Characteristics	Экспозиция склона / Exposition of the slope		
	Восточная eastern	Юго-восточная south-eastern	Северо-западная north-western
Общее количество деревьев, экз./га Total quantity of trees, pcs / ha	201	92	278
Средняя высота, м / Average height, m	10,9	11,8	11,0
Средний диаметр, см / Average diameter, cm	13,7	18,0	15,8
Доля деревьев с диаметром ствола более 16 см, % Share of trees with a trunk diameter more than 16 cm, %	74	67	43
Абсолютная полнота, м ² /га / Absolute thickness, m ² / ha	3,0	2,3	5,4
Запас стволовой древесины, м ³ /га Stock of stem wood, m ³ / ha	16	14	29

склоне – три куртины. Диаметр куртин составляет 8-14 м. Численность деревьев в одной куртине составляет 16-28 экз. По периметру куртин, на разном удалении от кромки, встречается подрост тиса разных генераций высотой от 5 до 160 см.

Биометрические характеристики деревьев тиса устанавливали по модельным деревьям (табл. 4). В качестве модельных были отобраны деревья тиса из преобладающих групп по высоте.

В целом жизненное состояние тиса на объектах исследований опасений не вызывает. Об этом можно судить как по густой кроне деревьев (от 5 до 7 ветвей на 1 пог. м), так и по возрасту хвои, которая не опадает в течение длительного времени. В зависимости от расположения ветвей в кроне дерева возраст хвои составляет от 6 до 9 лет, что также является показателем удовлетворительного состояния тиса.

На разном удалении от крупных деревьев тиса и от куртин встречается подрост тиса разных генераций. Вместе с деревьями подрост образует в тисовой роще непрерывный возрастной ряд. Кроме тиса, в состав подростка в небольшом

количестве входят бук восточный, вяз гладкий, клен остролистный, липа крупнолистная и ясень обыкновенный (табл. 5).

Подлесок под пологом древостоев на опытных участках состоит из 2-4 видов кустарников, преобладают бузина черная (*Sambucus nigra* L.) и черника кавказская (*Vaccinium arctostaphylos* L.) (рис. 1). На освещенных местах встречается рододендрон желтый, или азалия (*Rhododendron luteum* Sweet).

Численность подлеска минимальна и не превышает 200 экз./га, средняя высота составляет менее 2 м (табл. 6).

Живой напочвенный покров является бедным и представлен 10-12 видами. Лимитирующий фактор для представителей травяно-кустарничкового яруса – режим освещенности. Уровень светового довольствия недостаточен для многих видов в составе живого напочвенного покрова.

Видовой состав и проективное покрытие видов в составе травяно-кустарничкового яруса на опытном участке представлены в таблице 7. По величине проективного покрытия преобладают ежевика широколистная (*Rubus platyphyllos*

Таблица 4. Характеристики модельных деревьев тиса ягодного на опытном участке

Table 4. Characteristics of model yew berry trees at the experimental site

Характеристики Characteristics	Номер модели / Model number			
	1	2	3	4
Высота, м / Height, m	14,0	11,2	8,6	6,8
Диаметр ствола, см / Trunk diameter, cm	31,7	23,5	17,2	10,0
Возраст хвои, лет / Age of needles, years	6-9	7-8	6-7	4-6
Количество ветвей, шт. / Quantity of branches, pcs	84	51	52	39
Количество сучьев, шт. / Quantity of knots, pcs	14	8	9	9
Протяженность кроны, м / Length of the crown, m	6,4	9,5	6,2	8,1
Густота кроны, шт./м / Density of the crown, pcs / m	6,7	5,4	6,9	6,4
Штамб, м / Stem, m	1,4	1,7	1,1	0,7

Примечание. Густота кроны определена как частное от деления общего количества ветвей в кроне на протяженность кроны. Модельное дерево № 4 ослабленное, произрастает в центре куртины из тиса.

Note. Crown density is defined as the quotient of dividing the total number of branches in the crown by the length. Model tree No 4 is weakened, grows in the center of a yew curtain.

Таблица 5. Основные характеристики подростка на опытном участке

Table 5. Main characteristics of undergrowth at the experimental site

Характеристика Characteristics	Экспозиция склона / Exposition of the slope		
	Восточная eastern	Юго-восточная south-eastern	Северо-западная north-western
Состав, % / Composition, %	68Бук12Тис 8Лп7Кло	72Бук8Лп7Кло 6Тис5Вяз2Яс	52Тис41Бук4Лп 2Кло1Вяз
Густота, экз./га / Density, pcs / ha	2520	1660	838
Средняя высота, м / Average height, m	1,7	1,9	1,3
Численность тиса, экз./га / Number of yews, pcs / ha	302	98	436
Средняя высота тиса, см / Average height of yew, cm	63	44	51

C. Koch), зубянка пятилистная, или сердечник пятилистный, (*Cardamine pentaphyllos* L.) и плющ колхидский (*Hedera colchica* L.) (рис. 2).

Под пологом древостоя на верхней границе опытного участка (на гребне) освещенность в среднем в полуденные часы в середине июня

составляет 1420 люкс, или 2,1% от освещенности на открытом месте (66 тыс. люкс). На склоне юго-восточной экспозиции освещенность меньше (1180 люкс), а на склоне северо-западной экспозиции, где самая большая густота древостоя, – минимум (всего 196 люкс).

Таблица 6. Основные характеристики подлеска на опытном участке

Table 6. Main characteristics of the undergrowth on the experimental area

Характеристика <i>Characteristics</i>	Экспозиция склона / <i>Exposition of the slope</i>		
	Восточная <i>eastern</i>	Юго-восточная <i>south-eastern</i>	Северо-западная <i>north-western</i>
Состав, % / <i>Composition, %</i>	39Буз38Чер23Рд	54Чер33Буз13Рд	53Буз47Чер
Густота, экз./га / <i>Density, pcs / ha</i>	120	196	88
Средняя высота, м / <i>Average height, m</i>	1,9	1,9	0,9

Примечание. Буз – бузина чёрная, Рд – рододендрон жёлтый, Чер – черника кавказская.

Note. Буз – black elderberry, Рд – yellow rhododendron, Чер – Caucasian blueberry.

Таблица 7. Проектное покрытие видов в составе травяно-кустарничкового яруса на опытном участке, %

Table 7. Projective cover of species in the composition of the grass-shrub layer on the experimental plot, %

Название вида <i>Species name</i>	Экспозиция склона / <i>Exposition of the slope</i>		
	Восточная <i>eastern</i>	Юго-западная <i>south-western</i>	Северо-восточная <i>north-eastern</i>
Беладонна, или красавка <i>Boberella belladonna</i> (L.) E.H.L.Krause	–	0,1	0,1
Волжанка лесная / <i>Aruncus sylvestris</i> Kostel. ex Maxim	–	0,1	–
Вороний глаз неполный / <i>Paris incompleta</i> M. Bieb.	2,1	3,0	0,1
Зубянка пятилистная или сердечник <i>Cardamine pentaphyllos</i> L.	7,2	4,0	4,9
Ежевика широколистная / <i>Rubus platyphyllos</i> C. Koch	6,4	8,7	8,0
Купена многоцветковая / <i>Polygonatum multiflorum</i> (L.) All.	0,1	1,7	–
Лапчатка мелкоцветковая / <i>Potentilla micrantha</i> L.	0,3	0,8	0,1
Осока лесная / <i>Carex sylvatica</i> Huds.	0,2	0,1	0,8
Петров крест / <i>Clandestina squamaria</i> (L.) Legrand	0,2	0,5	0,1
Плющ колхидский / <i>Hedera colchica</i> L.	38,2	29,3	32,0
Подмаренник душистый, или ясменник <i>Galium odoratum</i> (L.) Scop.	0,7	1,0	–
Костенец сколопендровый <i>Asplenium scolopendrium</i> (L.) Newman	0,1	–	0,8
Щитовник картузианский <i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P. Fuchs	0,2	5,2	2,9
Итого / <i>Total</i>	56,7	54,3	49,4
Доля площади без травянистой растительности (мёртвый покров) <i>Proportion of area without herbaceous vegetation (dead cover)</i>	38	39	42
Минерализованная часть территории, % <i>Mineralized part of the territory, %</i>	5,3	6,7	8,6
Итого видов / <i>Total species</i>	11	12	10

Примечание. На каждом объекте исследования имеется ветровал, а на крутых склонах – оползни, за счет чего и происходит минерализация.

Note. At each object of study there is a windfall, and on steep slopes there are landslides, due to which mineralization occurs.



Рис. 1. Черника кавказская в качестве подлеска под пологом букового древостоя
Fig. 1. Caucasian blueberry as an undergrowth under the canopy of a beech stand



Рис. 2. Краснокнижная лиана – плющ колхидский
Fig. 2. Red Book creeper – Colchian ivy

Выводы

Уникальность тисовой рощи в урочище «Фассалугардан» заключается в преобладании крупных деревьев тиса ягодного, произрастающих главным образом одиночно. Тис произрастает под пологом древостоев смешанного состава. Численность деревьев тиса составляет от 92 до 278 экз/га. Общая площадь фитоценозов

с тисом ягодным превышает 12 га. Подрост тиса разных генераций встречается на разном удалении от куртин и одиночных деревьев. По высоте преобладает мелкий подрост тиса.

Полученные результаты являются определенным вкладом в исследование проблем, связанных с сохранением и воспроизводством реликтовой древесной породы на Кавказе.

Список использованных источников

1. Арбузов Б.В. Тис ягодный в Северо-Осетинском заповеднике и на сопредельной территории. Сборник научных трудов. / Б.В. Арбузов, В.Д. Казьмин // Охрана и изучение редких видов растений в заповедниках. М.: ЦНИЛ Главохоты РСФСР, 1987. С. 92-101.
2. Базаев А.Б. Тис ягодный в горных лесах Осетии (особенности строения и возобновительный потенциал: Автореф. дис. канд. биол. наук. 06.03.02. – СПб., 2006. 19 с.
3. Базаев А.Б. Рост и развитие тиса под пологом букового древостоя / А.Б. Базаев, А.В. Грязькин, Х.М. Хетагуров, И.А. Николаев, М.М. Гуталь // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 231. С. 7-18. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.7-18.
4. Базаев А.Б. Тис ягодный на Кавказе: монография / А.Б. Базаев, А.В. Грязькин, Х.М. Хетагуров. 2-е изд. Стер. СПб.: Издательство «Лань», 2023. 132 с. ISBN 978-5-507-46435-7
5. Iszkulo G. Success and failure of endangered tree species: low temperatures and low light availability affect survival and growth of European yew (*Taxus baccata* L.) seedlings // Pol. J. Ecol. 2010. 58: pp. 259-271.
6. Schirone B, Ferreira RC, Vessella F, Schirone A, Pireda R, Simeone MC. *Taxus baccata* in the Azores: a relict form at risk of imminent extinction // Biodivers Conserv. 2010. 19: P. 1547-1565.
7. Базаев А.Б. Влияние условий произрастания на биометрические характеристики и анатомию хвои *Taxus Baccata* / А.Б. Базаев, А.В. Грязькин, В.Т. Ярмишко, Х.М. Хетагуров, И.А. Николаев // Известия Горского

References

1. Arbuzov B.V. Berry yew in the North Ossetian Nature Reserve and on the adjacent territory. Collection of scientific papers. / B.V. Arbuzov, V.D. Kazmin // Protection and study of rare plant species in nature reserves. Moscow: Central Research Institute of Glavokhoty RSFSR, 1987. pp. 92-101.
2. Bazayev A.B. Berry yew in the mountain forests of Ossetia (features of structure and renewal potential: Abstract of Cand. Biol. Sci. Dissertation. 06.03.02. – St. Petersburg, 2006. 19 p.
3. Bazaev A.B., Gryazkin A.V., Khetagurov H.M., Nikolaev I.A., Gutal M.M. Growth and development of yew under the canopy of a beech stand // Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy. 2020. Issue 231. P. 7-18. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.7-18.
4. Bazaev A.B., Gryazkin A.V., Khetagurov Kh.M. Yew berry in the Caucasus: monograph / A.B. Bazaev, A.V. Gryazkin, Kh.M. Khetagurov. 2nd ed. Erase. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2023. 132 pp.: insert (4 pp.). ISBN 978-5-507-46435-7.
5. Iszkulo G. Success and failure of endangered tree species: low temperatures and low light availability affect survival and growth of European yew (*Taxus baccata* L.) seedlings // Pol. J. Ecol. 2010. 58: P. 259-271.
6. Schirone B, Ferreira RC, Vessella F, Schirone A, Pireda R, Simeone MC. *Taxus baccata* in the Azores: a relict form at risk of imminent extinction // Biodivers Conserv. 2010. 19: P. 1547-1565.
7. Bazaev A.B., Gryazkin A.V., Yarmishko V.T., Khetagurov H.M., Nikolaev I.A. The influence of growing conditions on the biometric characteristics and anatomy of *Taxus*

государственного аграрного университета. Владикавказ. 2020. № 57 (2). С. 157-166.

8. Резчикова О.Н. Распространение и состояние тиса ягодного (*Taxus baccata* L. (Taxaceae) на северном макросклоне главного Кавказского хребта // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2010. № 2. С. 38-43.

9. Slepych W.W., Kotljarow I.I., Pridnja M.W. Neue Fundorte der Eibe (*Taxus baccata* L.) im Nord-Kaukasus (Russland, Karatschajewo-Tscherkessien) // Der Eibenfreund. 2009. № 15. S. 132-140.

10. Bazaev AB, Gryazkin AV, Khetagurov Kh M, Gural MM, and Nikolaev IA. Yew berry in dendrocnoses of North Ossetia // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. March–April. 2019. RJPBCS. 10 (2). P. 926-937. ISSN: 0975-8585.

11. Резчикова О.Н. Характер возобновления *Taxus baccata* на западном Кавказе // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2017. Выпуск 3. С. 24-28.

12. Патент № 2084129 C1 Российская Федерация, МПК A01G 23/00. Способ учета подроста: № 94022328/13; заявл. 10.06.1994; опубл. 20.07.1997 / А.В. Грязькин; заявитель и патентообладатель: Санкт-Петербургская лесотехническая академия. EDN GYNYGD.

Baccata needles // Bulletin of the Gorsk State Agrarian University. Vdadikavkaz. 2020, № . 57 (2) P. 157-166.

8. Rezchikova O.N. Distribution and condition of the common yew (*Taxus baccata* L. (Taxaceae) on the northern macroslope of the Main Caucasus Range // Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. 2010. № . 2, 3, 4 or 6. P. 38-43.

9. Slepych W.W., Kotljarow I.I., Pridnja M.W. Neue Fundorte der Eibe (*Taxus baccata* L.) im Nord-Kaukasus (Russland, Karatschajewo-Tscherkessien) // Der Eibenfreund. 2009. № 15. P. 132-140.

10. Bazaev AB, Gryazkin AV, Khetagurov Kh M, Gural MM, and Nikolaev IA. Yew berry in dendrocnoses of North Ossetia // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. March-April. 2019. RJPBCS. 10 (2). P. 926-937. ISSN: 0975-8585.

11. Rezchikova O.N. The nature of the regeneration of *Taxus baccata* in the Western Caucasus // Bulletin of Adyghe State University. Series 4: Natural, Mathematical and Technical Sciences. 2017. Issue 3. P. 24-28.

12. Patent No. 2084129 C1 Russian Federation, IPC A01G 23/00. Method of accounting for undergrowth: No. 94022328/13; application 10.06.1994; published 20.07.1997 / A.V. Gryazkin; applicant and patent holder: St. Petersburg Forestry

Об авторе

Анвар Батразович Базаев, канд. биол. наук, доцент кафедры Агрохимии и садоводства; bazanvar@yandex.ru

About the author

Anvar B. Bazaev, CSc (Bio), associate professor of the department of Agrochemistry and horticulture; bazanvar@yandex.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Базаев А.Б. выполнил теоретические и практические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись, имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат

Bazaev A.B. carried out theoretical and practical research, on the basis of which he generalized and wrote the manuscript. He has a copyright to the article and is responsible for plagiarism.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 07.08.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 21.12.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 21.12.2024