

ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

5' 2025

Москва, Издательство РГАУ-МСХА

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



ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

5' 2025

Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. ТимирязеваАдрес учредителя и издателя:
127434, Российская Федерация,
г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций**Свидетельство о регистрации**
ПИ № ФС 77-58566 от 14 июля 2014 г.Журнал включен в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ
для публикации трудов соискателей
ученых степеней кандидата и доктора наук
Издание включено в систему РИНЦ,
CrossRef, AGRIS (Agricultural
Research Information System),
КиберЛенинка (Open Science)Полнотекстовые версии доступны на сайте
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>Редактор *В.И. Марковская*
Компьютерный набор и верстка –
А.С. Лаврова
Перевод на английский язык –
В.Г. Рябчикова
Ответственный за выпуск –
*Н.Я. Филатова*Адрес редакции: 127434, Москва,
Прянишникова ул., 14, строение 7-7А
Тел.: 8 (499) 976-36-67
Email: pririodamgur@mail.ru
Сайт: environment.elpub.ruОтпечатано в типографии
ООО «Офсет Принт»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 39, корп. 1
Тел: 8 (499) 976-24-85,
8 (916) 503-02-43Подписано в печать 10.12.25 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)**Исмайлов Г.Х.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Кентбаев Е.Ж.**, д-р. с.-х. наук, профессор, Академик КазНАЕН
НАО «Казахский национальный исследовательский университет»
(г. Алматы, Республика Казахстан)**Кирейчева Л.В.**, д-р. техн. наук, профессор
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)**Косиченко Ю.М.**, д. техн. наук, профессор
ФГБНУ РосНИИПМ (г. Новочеркасск, Российская Федерация)**Лисичкин С.Е.**, д-р. техн. наук, с.н.с.
Филиал АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» (Москва, Российская Федерация)**Лихацевич А.П.**, д-р. техн. наук, член-кор. Академии Наук Белоруссии
Республиканское научное дочернее унитарное предприятие «Институт мелиорации»
(г. Минск, Республика Беларусь)**Матвеев С.М.**, д-р. биол. наук, профессор
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова
(г. Воронеж, Российская Федерация)**Мирзаев Б.С.**, д-р техн. наук, профессор
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(Ташкент, Узбекистан)**Михеев П.А.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Ольгаренко Г.В.**, д-р. с.-х. наук, профессор, член-корреспондент РАН
ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения
и сельхозводоснабжения Радуга (г. Коломна, Российская Федерация)**Попов И.И.**, PhD, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Пчелкин В.В.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Раткович Л.Д.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Рубин О.Д.**, д-р. техн. наук, с.н.с.
АО «Институт Гидропроект» (Москва, Российская Федерация)**Ханов Н.В.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Хлюстов В.К.**, д-р. с.-х. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Худаев И.Ж.**, канд. техн. наук., доцент
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(г. Ташкент, Узбекистан)**Шевченко В.А.**, д-р. с.-х. наук, профессор, академик РАН
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)**ПОДПИСКА:**электронный каталог «Пресса России» <https://www.pressa-ru/cat/1/edition/t80746/>**Цена подписная**



ISSN 1997-6011

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

5' 2025

Founder and Publisher:**Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy**Address of Founder and Publisher:
49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian FederationThe journal is registered
by the Federal service for supervision
of communications, information technology
and mass media**Certificate of registration**
PI No FS 77-58566 dated July 14, 2014The journal is included in the list of publications
recommended by Higher Attestation Commission
of the Russian Federation for publishing papers
of those seeking PhD and DSc scientific degrees
**The issue is listed in the Russian Science
Citation Index, CrossRef,
AGRIS (Agricultural Research Information System),
Kiberleninka (Open Science)**Full versions are posted on the site
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>Editor *V.I. Markovskaya*Computer typesetting and makeup –
*A.S. Lavrova*Translation into English – *V.G. Ryabchikova*
Responsible for the issue of the journal –
*N.Ya. Filatova*Address of the editorial office:
building 7-7A, Pryanishnikova str., 14,
Moscow, 127434, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 976-36-67
Email: prirodangup@mail.ru
Website: environment.elpub.ruPrinted in typography
OOO "Offset Print"
127550, Moscow,
Dmitrovskoe shosse, 39, building 1
Tel.: +7 (499) 976-24-85,
+7 (916) 503-02-43Signed for print 10.12.25
Format 60 84/8, Circulation 500When using the materials of the journal
in any form reference to the journal is obligatory.© Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2025**Scientific editor-in-chief****Larisa A. Zhuravleva**, DSci. (Eng), Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Deputy scientific editor-in-chief****Dmitry M. Benin**, CSci. (Eng), Associate Professor, Corresponding Member
of the Russian Academy of Hydro Economic Sciences
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Members of the Editorial Board****Alexander S. Alekseev**, DSci. (Geogr), Professor
St. Petersburg state university named after S.M. Kirov (Saint-Petersburg, Russian Federation)**Victor I. Balabanov**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Yury G. Bezborodov**, DSci. (Eng), Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Yuliya V. Bryanskaya**, DSci. (Eng), Associate Professor
"National Research Moscow State University of Civil Engineering" (Moscow, Russian Federation)**Victor A. Volosukhin**, DSci. (Eng), Professor
Academy of safety of hydraulic structures (Novocheboksak, 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 (Novocheboksak, 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

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

Особенности поступления микроэлементов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта в условиях техногенеза.....6

Г.Б. Остапчук

Картирование и типизация вымочек сельскохозяйственных культур на основе данных космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения15

А.В. Шишкин, М.А. Рыжова, Д.М. Бенин, Н.В. Гавриловская, И.В. Гефке

Оценка эффективности применения укрывных и мульчирующих материалов на участках с капельным орошением и его влияние на выход и качество посадочного материала садовых культур в условиях лесостепи юга Западной Сибири23

А.С. Штанько, В.Н. Шкура

К вопросу определения поливной нормы при капельном орошении садов31

И. Ичигегесе, С.А. Максимов

Текущее состояние и перспективы развития орошаемого земледелия в Республике Бурунди.....39

В.И. Сметанин, В.А. Шевченко

Очистка водных объектов от загрязнения нефтью и нефтепродуктами с разными физико-механическими свойствами47

В.В. Пчелкин, Е.А. Попова

Определение водопотребления белокочанной поздней капусты на основе испаряемости при капельном поливе55

Х.А. Абдулмажидов, В.И. Балабанов, О.В. Мареева, И.И. Попов, И.В. Белов

Дефекты бетонных покрытий мелиоративных оросительных каналов и методы их ремонта.....63

Д.С. Искричев, Ю.Г. Безбородов, В.К. Хлюстов

Анализ почвенно-экологических факторов изменчивости пахотного слоя дерново-подзолистых почв в бассейне малой реки Локнаш.....71

Гидротехническое строительство

С.О. Курбанов, А.А. Созаев, Р.А. Жеругов

Расчетное обоснование подрусовых водозаборных сооружений комбинированных конструкций.....80

В.А. Фартуков, С.Н. Шукин, М.И. Зборовская, К.С. Семенова, А.А. Кадысова

Результаты исследований гидродинамического давления на свободно лежащее бетонное полотно марки ВЕ-NOTEX SK.....86

Гидравлика и инженерная гидрология

Н.Н. Ивахненко, М.Ю. Бадекин, Д.М. Бенин, Н.А. Коноплин, И.А. Федоркина

Анализ процессов массопереноса с реакцией в неоднородных пористых средах.....92

В.Ю. Филимонов, А.В. Кудишин, О.В. Ловцкая, А.В. Дьяченко, К.В. Марусин

Моделирование диффузного стока консервативных загрязнителей на участке реки Чарыш99

Хала Кабтул, И.В. Глазунова, Н.П. Карпенко, С.А. Соколова М.А. Ширяева

Анализ условий водопользования при обосновании водоохранных мероприятий на основе интегрированного подхода с учетом влияния гидромелиораций 106

Фан Ли, В.А. Фартуков, А.А. Кадысева

Комплексная оценка потенциала свободнопоточных гидротурбин в Китае на основе гидрологических и экологических показателей 117

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

Т.В. Прокофьева, К.А. Горохов, М.С. Розанова, С.Л. Рысин, В.А. Терехова, А.А. Снег, Г.Р. Васильев

Изменение свойств почвы под влиянием дорожного покрытия из древесной щепы (в условиях ГБС РАН)..... 126

С.М. Матвеев, Д.А. Литовченко

Повторяемость и интенсивность засух и динамика режима увлажнения в Центральной лесостепи 136

А.Ю. Ушаков, В.А. Савченкова, Н.Г. Иванкин

Использование нестандартного посадочного материала и стимулирующего препарата в ходе создания лесных культур ели 146

Contents

Land reclamation, water economy and agrophysics

A.V. Ilyinsky, K.N. Evsenkin, A.A. Pavlov

Features of the intake of trace elements with flood sediments on reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape under conditions of technogenesis6

G.B. Ostapchuk

Mapping and typification of agricultural crop overwettings based on ultra-high spatial resolution satellite imagery data15

A.V. Shishkin, M.A. Ryzhova, D.M. Benin, N.V. Gavrilovskaya, I.V. Gefke

Assessment of the effectiveness of the use of covering and mulching materials in areas with drip irrigation on the yield and quality of planting material of horticultural crops in the conditions of the forest-steppe of the south of Western Siberia23

A.S. Shtanko, V.N. Shkura

On the issue of determining the irrigation rate for drip irrigation of gardens.....31

I. Icitegetse, S.A. Maksimov

Current state and prospects of development of irrigated agriculture in the Republic of Burundi39

V.I. Smetanin, V.A. Shevchenko

Cleaning of water bodies from pollution by oil and oil products with different physical and mechanical properties47

V.V. Pchelkin, E.A. Popova

Determining the water consumption of late white cabbage based on evaporation under drip irrigation55

Kh.A. Abdulmazhidov, V.I. Balabanov, O.V. Mareeva, I.I. Popov, I.V. Belov

Defects in concrete pavements of reclamation irrigation canals and methods of their repair63

D.S. Iskrichev, Yu.G. Bezborodov, V.K. Khlyustov

Analysis of soil-ecological factors of variability of the arable layer of sod-podzolic soils in the basin of the small Loknash River71

Hydraulic engineering construction

S.O. Kurbanov, A.A. Sozaev, R.A. Zherugov

Calculation justification for under-channel water intake structures of combined designs80

V.A. Fartukov, S.N. Shchukin, M.I. Zborovskaya, K.S. Semenova, A.A. Kadysova

Results of research of hydrodynamic pressure on a free-lying concrete slab of BE-NOTEX SK brand.....86

Hydraulics and engineering hydrology

N.N. Ivakhnenko, M.Yu.N. Badekin, D.M. Benin, N.A. Konoplin, I.A. Fedorkin

Analysis of mass transfer processes with reaction in heterogeneous porous media92

V.Yu. Filimonov, A.V. Kudishin, O.V. Lovtskaya, A.V. Dyachenko, K.V. Marusin

Modeling of diffuse runoff of conservative pollutants in the Charysh River section.....99

Kabtoula Kh, I.V. Glazunova, N.P. Karpenko, S.A. Sokolova, M.A. Shiryeva

Analysis of water use conditions in the justification of water protection measures on the basis of the integrated approach taking into account the impact of hydro-reclamation 106

F. Li, V.A. Fartukov, A.A. Kadyseva

Comprehensive assessment of the potential of free-flow hydro turbines in China based on hydrological and environmental indicators 117

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

T.V. Prokofeva, K.A. Gorokhov, M.S. Rozanova, S.L. Rysin, V.A. Terekhova, A.A. Sneg, G.R. Vasiliev

Changes in soil properties under the influence of wood chip road surfaces (under conditions of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences)..... 126

S.M. Matveev, D.A. Litovchenko

Frequency and intensity of droughts and dynamics of the moisture regime in the Central forest-steppe 136

A.Y. Ushakov, V.A. Savchenkova, N.G. Ivankin

Using non-standard planting material and a stimulating drug during the creation of spruce forest crops 146

Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-6-14>

УДК 631.6.02:504.062:504.53.062.4



ОСОБЕННОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ С ПАВОДКОВЫМИ СЕДИМЕНТАМИ НА МЕЛИОРИРОВАННЫЕ ЗЕМЛИ ПОЙМЕННОГО АГРОЛАНДШАФТА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА

А.В. Ильинский¹, К.Н. Евсенкин², А.А. Павлов³✉

^{1,2,3}Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, корп. 2, Россия

¹ilinskiy-19@mail.ru ORCID: 0000-0002-6843-9170

²kn.evsenkin@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-0194-8552

³kupoz@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5932-1624

Аннотация. Цель исследований – изучение особенностей поступления микроэлементов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта в условиях техногенеза. Многолетние исследования выполнены на пахотных пойменных мелиорированных землях, расположенных вблизи г. Рязани. Сбор седиментов выполнялся по авторской методике с помощью седиментационных ловушек. Лабораторный анализ отобранных проб паводковых седиментов и аллювиальной почвы на определение содержания микроэлементов выполнен по общепринятым методикам определения химических показателей: микроэлементов бора, молибдена – фотометрическим методом; цинка, марганца, меди, кобальта – атомно-абсорбционным методом. Аллювиальная почва участка исследований характеризуется высоким содержанием бора, меди, кобальта и средним содержанием марганца, цинка, молибдена. По результатам исследований 2022-2024 гг. установлен уровень седиментной нагрузки на территорию участка (11,9-15,8 т/га). Поступление микроэлементов в пойменный агроландшафт варьирует в диапазоне: бор – 11,69-12,73 г/га; молибден – 1,07-1,54; цинк – 109,49-203,49; марганец – 640,22-1215,06; медь – 174,93-200,66; кобальт – 42,25-52,93 г/га. На основании полученных результатов эксперимента дана оценка содержания микроэлементов в седиментах и подстилающей аллювиальной почве, установлены эмпирические зависимости содержания микроэлементов в паводковых седиментах от уровня седиментной нагрузки. Полученная в ходе исследований информация об особенностях поступления микроэлементов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта необходима при изучении потоков миграции микроэлементов в агроэкосистемах пойменных мелиорированных земель. Она послужит основой при разработке высокоэффективных адаптивных мероприятий, направленных на сохранение плодородия и повышение продуктивности аллювиальной почвы сельскохозяйственных земель с использованием комплексных агро- и биомелиоративных приемов природоподобных технологий.

Ключевые слова: аллювиальная почва, микроэлементы, окружающая среда, паводковые седименты, пойменный агроландшафт, седиментная нагрузка, техногенез

Формат цитирования: Ильинский А.В., Евсенкин К.Н., Павлов А.А. Особенности поступления микроэлементов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта в условиях техногенеза // Природообустройство. 2025. № 5. С. 6-14. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-6-14>

Original article

FEATURES OF THE INTAKE OF TRACE ELEMENTS WITH FLOOD SEDIMENTS ON RECLAIMED LANDS OF THE FLOODPLAIN AGRICULTURAL LANDSCAPE UNDER CONDITIONS OF TECHNOGENESIS

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

^{1,2,3}All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya str, 44, building 2, Russia

¹ilinskiy-19@mail.ru ORCID: 0000-0002-6843-9170

²kn.evsenkin@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-0194-8552

³kupoz@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5932-1624

Abstract. The aim of the research was to study the features of the influx of trace elements with flood sediments onto reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape under technogenesis conditions. Long-term studies were carried out on arable floodplain reclaimed lands located near the city of Ryazan. Sediments were collected according to the author's method using sediment traps. Laboratory analysis of the selected samples of flood sediments and alluvial soil to determine the content of microelements was carried out according to generally accepted methods for determining chemical indicators: microelements of boron, molybdenum – by the photometric method; zinc, manganese, copper, cobalt – by the atomic absorption method. The alluvial soil of the research site is characterized by a high content of boron, copper, cobalt and an average content of manganese, zinc, molybdenum. According to the results of research in 2022-2024. The sediment load level on the site territory was established (11.9-15.8 t/ha). The input of microelements into the floodplain agricultural landscape varies in the range: boron 11.69-12.73 g/ha; molybdenum 1.07-1.54; zinc 109.49-203.49; manganese 640.22-1215.06; copper 174.93-200.66; cobalt 42.25-52.93 g/ha. Based on the obtained experimental data, the content of microelements in sediments and underlying alluvial soil was assessed, and empirical dependencies of the content of microelements in flood sediments on the level of sediment load were established. The information obtained during the research on the features of the influx of microelements with flood sediments onto reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape is necessary when studying the migration flows of microelements in agroecosystems of floodplain reclaimed lands and will serve as a basis for developing highly effective adaptive measures aimed at maintaining fertility and increasing the productivity of alluvial soil of agricultural lands using complex agro- and biomelioration techniques of nature-like technologies.

Keywords: alluvial soil, trace elements, environment, flood sediments, floodplain agricultural landscape, sedimentation load, technogenesis

Format of citation: Ilyinsky A.V., Evsenkin K.N., Pavlov A.A. Features of the intake of trace elements with flood sediments on reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape under conditions of technogenesis // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 6-14. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-6-14>

Введение. Успешное решение задачи по повышению продуктивности длительно используемых пахотных сельскохозяйственных земель во многом зависит от обеспечения оптимального баланса макро- и микроэлементов в почве. Выращивание монокультуры способствует интенсивному выносу элементов питания растений из почвы, в том числе подвижных микроэлементов, представляющих собой незаменимую составляющую минерального питания растений [1]. Они участвуют в работе всех ферментных систем растений, в синтезе витаминов, углеводном и азотном обмене, в формировании клеточных стенок, в цветении, формировании семян и т.д. Недостаток микроэлементов вызывает аномалии в растущих тканях, снижение

продуктивности культур, увядание листьев, хлороз, торможение роста растений, а их избыток способствует развитию негативных процессов: например, угнетение процесса фотосинтеза, дыхания растений, усвоение фосфора и т.д. [2, 3]. Выращивание монокультуры без снижения урожайности и нанесения ущерба почве – трудно-выполнимая задача [4], требующая обеспечения внесения повышенных доз органических и минеральных удобрений, поддержания достаточного увлажнения и использования мероприятий по защите растений. В условиях дефицита внесения удобрений повышается риск развития деградации почвы [5-7], ухудшения фитосанитарного состояния посевов, почвоутомления, снижения буферных свойств.

Исследуемая почва пойменного агроландшафта подвержена высокому техногенному загрязнению поллютантами, в том числе тяжелыми металлами, поступающими с паводковыми седиментами [8, 9]. Длительное техногенное загрязнение агроэкосистем способно вызывать ряд негативных процессов в почве: ухудшение структуры, уменьшение общей порозности, снижение водопроницаемости и электропроводности, изменение кислотности среды и т.д. На загрязненных почвах происходит угнетение выращиваемых культур, снижение качества урожая [10-12].

Паводковые седименты представляют собой источник восполнения элементов питания [13]. Контроль и учет поступающих элементов с паводковыми седиментами в почву представляют собой важную эколого-мелиоративную задачу, позволяющую оптимизировать производственные расходы, связанные с удобрениями, способствуют обоснованию экологически сбалансированного воздействия на пойменные агроландшафты. В этой связи изучение особенностей поступления микроэлементов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта в условиях техногенеза является необходимым при обосновании высокоэффективных способов сохранения плодородия и повышения продуктивности пахотных почв пойменных агроландшафтов, основанных на комплексном применении агро- и биомелиоративных приемов с использованием органических отходов сельского хозяйства [14, 15].

Цель исследований: изучение особенностей поступления микроэлементов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта в условиях техногенеза.

Материалы и методы исследований. В статье приведены результаты исследований по изучению поступления микроэлементов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта, выполненных в 2022-2024 гг. Экспериментальные наблюдения проведены на стационарном участке пахотных мелиорированных пойменных земель площадью 200 тыс. м², расположенном на 2 км севернее границы г. Рязани, типичном для поймы р. Оки.

Почвенный покров участка наблюдений представлен аллювиальной луговой среднесуглинистой почвой со следующими агрохимическими характеристиками: рН_(КС) – 6,4 ед.; органическое вещество – 3,25%; общий азот – 0,18%; подвижный фосфор – 123 мг/кг; обменный калий – 76,3 мг/кг; сумма поглощенных оснований – 18,2 ммоль/100 г.

Ряд исследователей отмечает [12, 16, 17], что центральная пойма р. Оки подвержена сильному техногенному воздействию, основными источниками загрязнения пойменной экосистемы являются промышленные и коммунальные сбросы в реку, выбросы в атмосферу от энергетического сектора, транспорта, промышленности и сельского хозяйства. По сведениям надзорных органов [18], в Рязанской области отмечается высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха и поверхностной воды в р. Оке по широкому перечню веществ. К приоритетным для агроэкосистем Рязанского региона тяжелым металлам в первую очередь относятся медь, цинк, свинец, кадмий, марганец и др. [16, 17, 19].

В основу практических исследований по изучению особенностей поступления микроэлементов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта положена авторская методика «Способ контроля поступления тяжелых металлов и мышьяка в составе седиментной нагрузки на пахотные мелиорированные земли пойменного агроландшафта» [20].

Для изучения седиментной нагрузки на исследуемой территории использовались седиментационные ловушки, состоящие из ворсистых пластиковых матов, расположенных на расстоянии 0,45 км друг от друга. Со сходом паводковых вод ловушки снимались с экспериментального участка, транспортировались в лабораторию, высушивались. Затем седименты извлекались посредством встряхивания и чистки матов, определялась масса седиментов и проводились их химико-аналитические исследования. Отбор почвенных образцов из пахотного слоя почвы осуществлялся методом конверта.

Лабораторный анализ отобранных проб паводковых седиментов и аллювиальной почвы на определение содержания микроэлементов выполнен в соответствии с общепринятыми методиками определения химических показателей: бора – по методу Бергера и Труога (ГОСТ Р 50688-94) фотометрическим методом с использованием в качестве экстрагирующего раствора горячей воды, содержащей сернокислый магний; молибдена – по методу Григга (ГОСТ Р 50689-94) фотометрическим методом с использованием экстрагирующего оксалатного буферного раствора с рН 3,3; цинка – по методу Крупского и Александровой (ГОСТ Р 50686-94) атомно-абсорбционным методом с использованием экстрагирующего ацетатно-аммонийного буферного раствора с рН 4,8; марганца – по методу Пейве и Ринькиса (ГОСТ Р 50682-94)

атомно-абсорбционным методом с использованием в качестве экстрагирующего раствора 0,1 н H_2SO_4 ; меди – по методу Пейве и Ринькиса (ГОСТ Р 50684-94) атомно-абсорбционным методом с использованием в качестве экстрагирующего раствора 1 н HCl ; кобальта – по методу Пейве и Ринькиса (ГОСТ Р 50687-94) экстрактно-атомно-абсорбционным методом с использованием в качестве экстрагирующего раствора 1 н HNO_3 .

Результаты и их обсуждение. Период проведения исследований характеризовался неоднородными (по срокам и величине) паводками, уровень которых в разные годы достигал пиковых отметок 510-598 см относительно нулевой отметки гидрологического поста в г. Рязани, при этом территория исследований подвергалась полному затоплению на период 1-1,5 месяца.

На рисунке 1 представлена сравнительная оценка седиментной нагрузки на пахотные мелиорированные земли пойменного агроландшафта р. Оки в 2022-2024 гг.

Уровень седиментной нагрузки на исследуемую территорию варьировал от 11,9 до 15,8 т/га, что связано во многом с режимом уровня воды в периоды весеннего половодья. Многолетние исследования показали, что наиболее высокий уровень седиментной нагрузки на земли пойменного агроландшафта р. Оки наблюдался весной 2022 г., когда превышение среднемноголетнего значения составило 9,7%. В 2023 г. уровень седиментной нагрузки был немного ниже, чем в 2022 г., и превышение среднемноголетнего значения составило 6,7%, а 2024 г. уровень седиментной нагрузки был ниже среднемноголетнего значения на 17,4%. Сравнение среднемноголетнего

уровня седиментной нагрузки с результатами исследований других авторов на данном створе [16, 19], полученными в 1999 г. при схожем паводке, показало, что его значение было превышено на 1,5 т/га.

В таблице 1 представлены обобщенные результаты изучения содержания микроэлементов в седиментах и подстилающей аллювиальной почве.

Анализ содержания подвижных форм микроэлементов в почве обследованного пойменного агроландшафта показал, что содержание бора, меди, кобальта можно охарактеризовать как высокое, а содержание марганца, цинка, молибдена – как среднее.

Исследования показали, что в паводковом седименте зафиксировано большее в сравнении

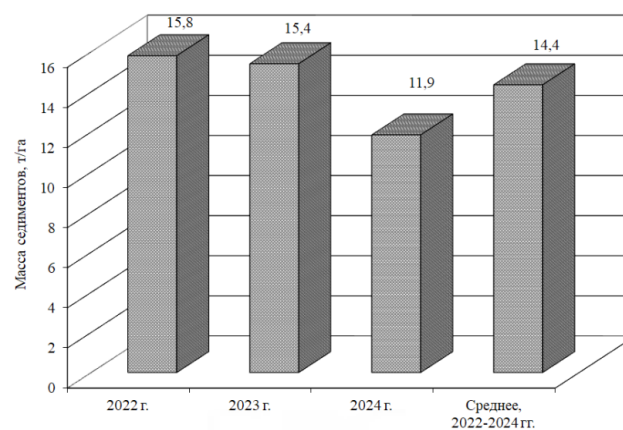


Рис. 1. Седиментная нагрузка на пахотные мелиорированные земли пойменного агроландшафта р. Оки

Fig. 1. Sedimentary load on arable reclaimed lands of the Oka River floodplain agricultural landscape

Таблица 1. Содержание микроэлементов в седиментах и подстилающей аллювиальной почве, среднее за 2022-2024 гг., мг/кг

Table 1. The content of trace elements in sediments and underlying alluvial soil, average for 2022-2024, mg/kg

Элемент <i>Element</i>	Содержание (диапазон/среднее значение) <i>Content (range / average)</i>		$\frac{C_c}{C_p}$	Накопление от содержания в почве, % <i>Accumulation from content in soil, %</i>
	Седименты / <i>Sediments</i>	Почва / <i>Soil</i>		
Бор <i>boron</i>	$\frac{0,74-1,07}{0,86}$	$\frac{0,75-0,79}{0,77}$	1,12	0,53
Молибден <i>molybdenum</i>	$\frac{0,09-0,10}{0,097}$	$\frac{0,13-0,14}{0,14}$	0,69	0,34
Цинк <i>zinc</i>	$\frac{6,93-17,10}{10,67}$	$\frac{3,31-3,41}{3,35}$	3,19	1,44
Марганец <i>manganese</i>	$\frac{53,8-78,9}{69,60}$	$\frac{48,6-53,0}{50,57}$	1,38	0,68
Медь <i>copper</i>	$\frac{12,7-14,7}{13,47}$	$\frac{13,3-14,4}{13,73}$	0,98	0,47
Кобальт <i>cobalt</i>	$\frac{3,35-3,55}{3,43}$	$\frac{3,07-3,41}{3,27}$	1,05	0,50

с подстиляющей аллювиальной почвой содержание следующих микроэлементов: цинка – на 218,5%; марганца – на 37,6%; бора – на 11,7%; кобальта – на 4,9%. Вместе с тем отмечается меньшее, чем в подстиляющей аллювиальной почве, содержание молибдена (на 30,7%) и меди (на 1,9%).

На основе расчета анализа доли накопления подвижных микроэлементов с паводковыми седиментами от содержания в подстиляющей аллювиальной почве (рис. 2, табл. 1) был построен эмпирический ряд накопления микроэлементов: $Zn > Mn > B > Co > Cu > Mo$.

Результаты изучения динамики поступления микроэлементов в агроландшафт пахотных пойменных мелиорированных земель представлены на рисунке 2.

Установлено, что по бору в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2024 г., когда превышение составило 5,3%; наименьшее поступление зафиксировано в 2022 г., когда значение его было ниже среднемноголетнего показателя на 3,3%. По молибдену в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2022 г., когда превышение составило

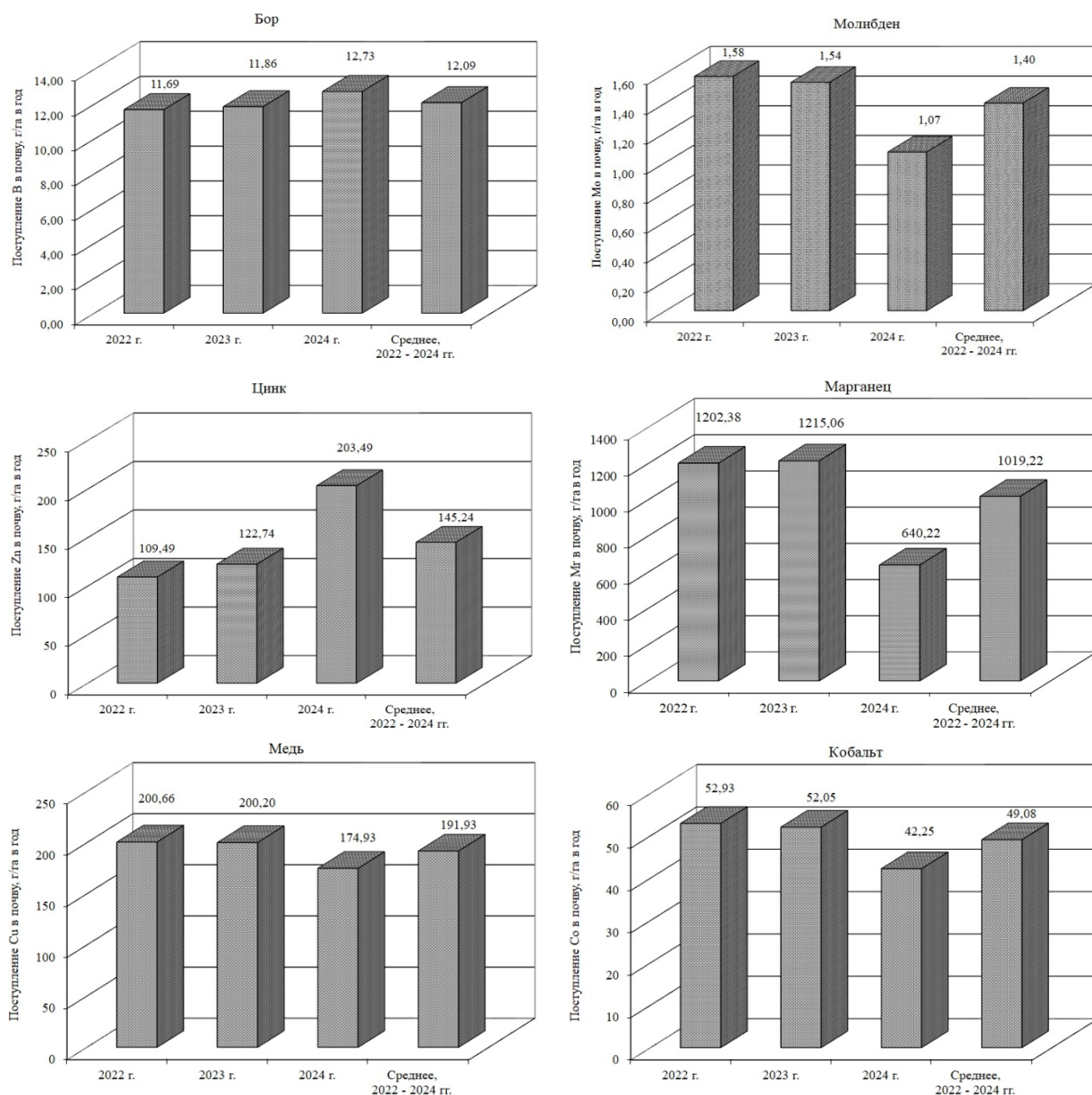


Рис. 2. Графическое представление поступления микроэлементов с паводковыми седиментами в почву пойменного агроландшафта

Fig. 2. Graphic representation of the intake of trace elements with flood sediments into the soil of the floodplain agricultural landscape

12,86%; наименьшее поступление зафиксировано в 2024 г., когда значение его было ниже среднесуточного показателя на 23,6%. По цинку в сравнении со среднесуточным значением наибольшее поступление отмечалось в 2024 г., когда превышение составило 40,1%; наименьшее поступление зафиксировано в 2022 г., когда значение его было ниже среднесуточного показателя на 24,6%. По марганцу в сравнении со среднесуточным значением наибольшее поступление отмечалось в 2023 г., когда превышение составило 19,2%; наименьшее поступление зафиксировано в 2024 г., когда значение его было ниже среднесуточного показателя на 37,2%. По меди в сравнении со среднесуточным значением наибольшее поступление

отмечалось в 2022 г., когда превышение составило 4,55%; Наименьшее поступление зафиксировано в 2024 г., когда значение его было ниже среднесуточного показателя на 8,86%. По кобальту в сравнении со среднесуточным значением наибольшее поступление отмечалось в 2022 г., когда превышение составило 7,85%; наименьшее поступление зафиксировано в 2024 г., когда значение его было ниже среднесуточного показателя на 13,92%.

На основании проведенных многолетних исследований получены графические представления и эмпирические зависимости содержания микроэлементов в седиментах от уровня седиментной нагрузки на пахотные земли пойменно-агроландшафта (рис. 3, табл. 2).

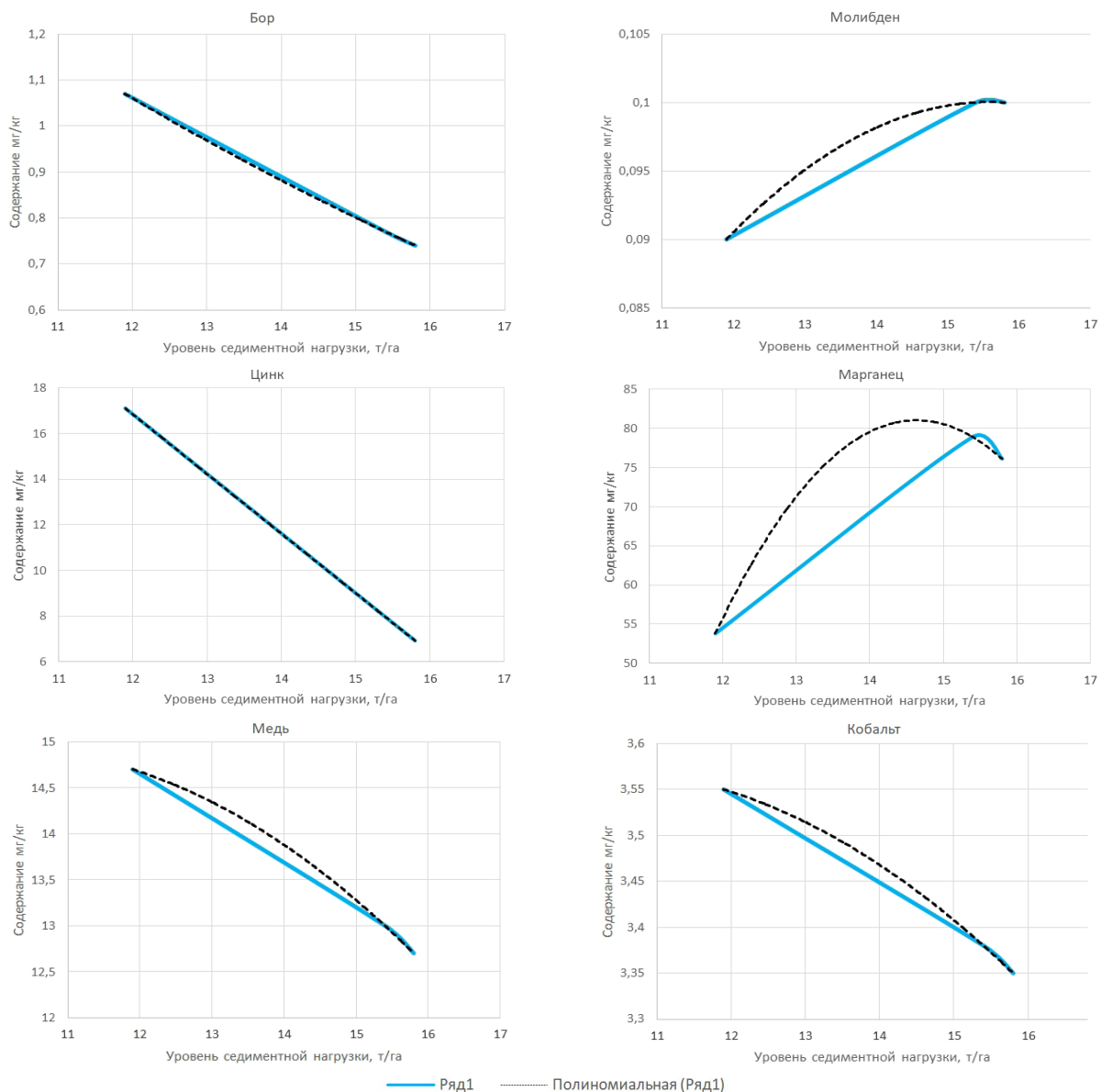


Рис. 3. Графическое представление содержания в седиментах микроэлементов в зависимости от уровня седиментной нагрузки

Fig. 3. Graphical representation of the content of trace elements in sediments depending on the level of sedimentation load

Таблица 2. Эмпирические зависимости содержания в осадках микроэлементов в зависимости от уровня седиментной нагрузки

Table 2. Empirical dependences of the content of trace elements in sediments depending on the level of sedimentation load

№ п.п.	Элемент	Уравнение регрессии / Regression equation	R ²
1	Бор / boron	$y = 0,0027x^2 - 0,1607x + 2,5935$	0,98
2	Молибден / molybdenum	$y = -0,0007x^2 + 0,0229x - 0,0783$	0,92
3	Цинк / zinc	$y = 0,0022x^2 - 2,6686x + 48,545$	1
4	Марганец / manganese	$y = -3,6337x^2 + 106,37x - 697,45$	0,85
5	Медь / copper	$y = -0,0678x^2 + 1,3643x + 8,0613$	0,97
6	Кобальт / cobalt	$y = -0,0068x^2 + 0,1364x + 2,8861$	0,98

Представленные эмпирические зависимости содержания в осадке микроэлементов от уровня седиментной нагрузки описываются уравнениями регрессии, представленными в таблице 2.

Исследования показали (рис. 2), что из представленных микроэлементов в структуре поступления с осадками в агроландшафт пахотных пойменных мелиорированных земель на марганец приходится 71,83%, на медь – 13,53%, на цинк – 10,24%, на кобальт – 3,46%, на бор – 0,85%, на молибден – 0,1%. Эмпирический ряд поступления микроэлементов с осадками на пойменный агроландшафт имеет следующий вид: Mn > Cu > Zn > Co > B > Mo.

Выводы

В условиях недостаточного применения органоминеральных мелиорантов, особенно при выращивании кормовых монокультур на землях пойменного агроландшафта, паводковые осадки являются главным источником

восполнения дефицита микроэлементов, связанного с их выносом урожаем. Поступление микроэлементов варьирует в зависимости от особенностей прохождения паводка в диапазоне значений: бор – 11,69-12,73 г/га; молибден – 1,07-1,54; цинк – 109,49-203,49; марганец – 640,22-1215,06; медь – 174,93-200,66; кобальт – 42,25-52,93 г/га.

Полученная в ходе исследований информация об особенностях поступления микроэлементов с паводковыми осадками на мелиорированные земли пойменного агроландшафта является необходимой при изучении потоков миграции микроэлементов в агроэкосистемах пойменных мелиорированных земель. Она послужит основой при разработке высокоэффективных адаптивных мероприятий, направленных на сохранение плодородия и повышение продуктивности аллювиальной почвы сельскохозяйственных земель с использованием комплексных агро- и биомелиоративных приемов природоподобных технологий.

Список использованных источников

1. Михайлова Л.А. Агрохимия: курс лекций. В 3 ч. Ч 1. Удобрения: виды, свойства, химический состав // «Пермская гос. с.-х. акад. им. акад. Д.Н. Прянишникова». Пермь: ИПЦ «Прокрост», 2015. 426 с.
2. Мальшева Е.В. Агрохимические свойства почвы в зависимости от содержания микроэлементов в почвенных грунтах ЦЧЗ // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 5. С. 46-53.
3. Сырчина Н.В. Влияние органических удобрений на содержание микроэлементов в зеленой массе кукурузы / Н.В. Сырчина, Л.В. Пилип, Т.Я. Ашихмина // Химия растительного сырья. 2024. № 1. С. 372-380. DOI: 10.14258/jcprm.20240112298. EDN: QRASQN
4. Ибиев Г.З. Устойчивое развитие отрасли растениеводства – основа продовольственной безопасности страны / Г.З. Ибиев, Н.Г. Платоновский, С.И. Чебаненко // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2025. № 1. С. 18-24. DOI: 10.31442/0235-2494-2025-0-1-18-24 EDN: JCDFDA

References

1. Mikhailova L.A. Agrochemistry: a course of lectures. In 3 parts. Part 1. Fertilizers: types, properties, chemical composition // Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education. "Perm State Agricultural Academy named after academician D.N. Pryanishnikov". Perm: IPC "Prokrost", 2015. 426 p.
2. Malysheva E.V. Agrochemical properties of soil depending on the content of microelements in soils of the Central Chernozem Region // Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2021. No. 5. P. 46-53.
3. Syrchina N.V. Influence of organic fertilizers on the content of microelements in the green mass of corn / N.V. Syrchina, L.V. Pilip, T.Ya. Ashikhmina // Chemistry of plant raw materials. 2024. No. 1. P. 372-380. DOI: 10.14258/jcprm.20240112298 EDN: QRASQN
4. Ibiev G.Z. Sustainable development of the crop production sector is the basis of the country's food security / G.Z. Ibiev, N.G. Platonovskiy, S.I. Chebanenko // Economy of agricultural and processing enterprises. 2025. No. 1. P. 18-24. DOI: 10.31442/0235-2494-2025-0-1-18-24 EDN: JCDFDA

5. Самарханов Т.Г. Производство в ущерб экологии: урожайность растёт, а плодородие падает // Экономика сельского хозяйства России. 2022. № 7. С. 21-27. DOI: 10.32651/227-21.
6. Билтуев А.С. Урожайность культур и баланс элементов питания в зернопаровом севообороте в условиях сухой степи Бурятии / А.С. Билтуев, Л.В. Будажпавов, А.К. Уланов // Агрохимия. 2023. № 12. С. 85-91. DOI: 10.31857/S0002188123110030. EDN: PPPRTD
7. Айсакулова Х.Р. Влияние органических удобрений на микрофлору почвы при выращивании плодовых культур / Х.Р. Айсакулова, Л.А. Курасова, А.А. Нысанбаева, Е.В. Климов // Наука и образование. 2022. № 4-2(69). С. 92-103. DOI: 10.56339/2305-9397-2022-4-2-92-103. EDN: TKBLMN
8. Ильинский А.В. Экологическая оценка влияния седиментации на загрязнение мелиорированных земель пойменного агроландшафта тяжёлыми металлами / А.В. Ильинский, К.Н. Евсенкин, А.А. Павлов // Природобустройство. 2025. № 1. С. 40-47. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-40-47.
9. Ilyinskiy A., Evsenkin K., Pavlov A. Examination of heavy metal input from flood sediments in agricultural landscapes // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 592. P. 06003. DOI: 10.1051/e3sconf/202459206003.
10. Кирейчева Л.В. Влияние сельскохозяйственного производства на загрязнение водных объектов / Л.В. Кирейчева, Е.А. Лентяева // Природобустройство. 2020. № 5. С. 18-26. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-18-27. EDN: OMUCXC
11. Домрачева Л.И. Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор) / Л.И. Домрачева, С.Г. Скугорева, А.Л. Ковина [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 14-25. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025. EDN: GWOPRX
12. Мажайский Ю.А. Мониторинг тяжёлых металлов в экосистеме малой реки Окского бассейна / Ю.А. Мажайский, Т.М. Гусева // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 54-59. EDN: ZHBHDV
13. Ильинский А.В. Паводковые седименты как источник пополнения аллювиальных почв элементами питания растений / А.В. Ильинский, К.Н. Евсенкин, А.А. Павлов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25, № 4. С. 645-654. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.4.645-654.
14. Кирейчева Л.В. Санация загрязнённых мышьяком почв с использованием комбинированного мелиоранта / Л.В. Кирейчева, А.В. Ильинский // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2015. № 4. С. 37-39. EDN: UAGXBT
15. Зубкова Т.В., Виноградов Д.В. Свойства органоминерального удобрения на основе куриного помёта и применение его в технологии ярового рапса на семена / Т.В. Зубкова, Д.В. Виноградов Д.В. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 1(53). С. 46-54. DOI: 10.18286/1816-4501-2021-1-46-54. EDN: VOCDEV
16. Новосельцев В.Н., Бесфамильный И.Б., Кизяев Б.М., Райнин В.Е. [и др.], Техногенное загрязнение речных экосистем. Монография. М.: Научный мир, 2002. 140 с. EDN: YHKNSR
17. Мажайский Ю.А. Нейтрализация загрязнённых почв: монография. Рязань: Мещерский филиал ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, 2008. 528 с. EDN: QKZFYJ
5. Samarkhanov T.G. Production at the expense of the environment: crop yields are growing, but fertility is falling // Economy of Agriculture of Russia. 2022. No. 7. P. 21-27. DOI: 10.32651/227-21.
6. Biltuev A.S. Crop yield and balance of nutrients in grain-fallow crop rotation in the dry steppe of Buryatia / A.S. Biltuev, L.Z. Budazhapov V., A.K. Ulanov // Agrochemistry. 2023. No. 12. P. 85-91. DOI: 10.31857/S0002188123110030 EDN: PPPRTD
7. Aisakulova Kh.R. Influence of organic fertilizers on soil microflora when growing fruit crops / Kh.R. Aisakulova, L.A. Kurasova, A.A. Nysanbaeva, E.V. Klimov // Science and Education. 2022. No. 4-2(69). P. 92-103. DOI: 10.56339/2305-9397-2022-4-2-92-103 EDN: TKBLMN
8. Ilyinsky A.V. 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 // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 40-47. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-40-47.
9. Ilyinskiy A., Evsenkin K., Pavlov A. Examination of heavy metal input from flood sediments in agricultural landscapes // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 592. P. 06003. DOI: 10.1051/e3sconf/202459206003.
10. Kireycheva L.V. The Impact of agricultural production on pollution of water bodies / L.V. Kireycheva, E.A. Lentiyaeva // Prirodoobustrojstvo. 2020. No. 5. P. 18-26. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-18-27 EDN: OMUCXC
11. Domracheva L.I. Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review) / L.I. Domracheva, S.G. Skugoreva, A.L. Kovina [et al.] // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 14-25. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025 EDN: GWOPRX
12. Mazhaisky Yu.A. Monitoring of heavy metals in the ecosystem of a small river of the Oka basin / Yu.A. Mazhaisky, T.M. Guseva // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No 2. P. 54-59 EDN: ZHBHDV
13. Ilyinsky A.V. Flood sediments as a source of replenishment of alluvial soils with plant nutrients / A.V. Ilyinsky, K.N. Evsenkin, A.A. Pavlov // Agrarian Science of the Euro-North-East. 2024. Vol. 25, No. 4. P. 645-654. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.4.645-654.
14. Kireycheva L.V. Remediation of Arsenic-Contaminated Soils Using a Combined Ameliorant / L.V. Kireycheva, A.V. Ilyinsky // Bulletin of Russian Agricultural Science. 2015. No. 4. P. 37-39. EDN: UAGXBT
15. Zubkova T.V. Properties of Organomineral Fertilizer Based on Chicken Manure and Its Application in Spring Seed Rapeseed Technology / T.V. Zubkova, D.V. Vinogradov // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2021. No. 1(53). P. 46-54. DOI: 10.18286/1816-4501-2021-1-46-54 EDN: VOCDEV
16. Novosel'tsev V. N., Besfamil'nyi I. B., Kizyaev B.M., Rainin V.E. Technogenic pollution of river ecosystems. Moscow: Scientific world. 2002. 140 p. EDN: YHKNSR
17. Mazhaisky Yu.A. Neutralization of contaminated soils: monograph. Ryazan: Meshchersky branch of GNU VNIIGiM of the Russian Agricultural Academy. 2008. 528 p. EDN: QKZFYJm
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. 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. EDN: DMANWI

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. Пыленок П.И. Влияние седиментации на качество аллювиальной почвы в пойме реки Ока // Агрофизика. 2020. № 4. С. 7-13. EDN: DMANWI

20. Патент на изобретение 2815978 Российская Федерация, МПК G01N33/24 (2006.01); A01G 20/20 (2018.01). Способ контроля поступления тяжелых металлов и мышьяка в составе седиментной нагрузки на пахотные мелиорированные земли пойменного агроландшафта, авторы: Ильинский А.В., Евсенкин К.Н., Павлов А.А., Голубенко М.И. Заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова (RU). – Заявка № 2023119944; заявл. 28.07.2023; опубл. 25.03.2024, Бюл. № 9. 11 с.: ил.

Об авторах

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

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

Артём Андреевич Павлов, канд. биолог. наук, научный сотрудник; ORCID: 0000-0001-5932-1624, РИНЦ 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 interest

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 20.03.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 21.09.2025

Принята к публикации после рецензирования / Prinyata k publikatsii posle retsenzirovaniya 21.09.2025

20. Patent for invention 2815978 Russian Federation, IPC G01N33/24 (2006.01); A01G 20/20 (2018.01). Method for monitoring the input of heavy metals and arsenic as part of the sediment load onto arable reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape, authors: Piyinsky A.V., Evsenkin K.N., Pavlov A.A., Golubenko M.I. Applicant and patent holder FSBSI VNIIGiM named after A.N. Kostyakov (RU). Application, No. 2023119944; declared 28.07.2023; published 25.03.2024, Bulletin, No. 9, 11 p.: ill.

About the Authors

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

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

Artyom A. Pavlov, CSc (Biol), researcher; ORCID: 0000-0001-5932-1624, RSCI Authorid: 1141178; kupoz@mail.ru

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

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-15-22>

УДК 631.6:528.854



КАРТИРОВАНИЕ И ТИПИЗАЦИЯ ВЫМОЧЕК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ СВЕРХВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Г.Б. Остапчук¹

¹ ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, Россия

¹ ost@agrophys.ru; SPIN- 7905-9266; ID РИНЦ: 1268828

Аннотация. Цель исследований заключалась в картировании, типизации и оценке характеристик вымочек сельскохозяйственных культур на основе космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения. Объектом исследований являлись вымочки сельскохозяйственных культур, расположенные в границах сельскохозяйственных полей Меньковского филиала ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Гатчинский район Ленинградской области. Работы включали в себя полевое обследование указанных вымочек, анализ их дешифровочных признаков и оценку их характеристик на основе космических снимков. Основные результаты исследований представлены следующими положениями. Для обнаружения вымочек целесообразно использовать серию архивных космических снимков, сделанных преимущественно в ранневесенний и осенний периоды. Дешифровочные признаки вымочек на космических снимках в зависимости от времени года съемки представлены двумя основными группами: высококонтрастные переувлажненные контуры с признаками скопления воды преимущественно в ранневесенний период и контуры с угнетенной растительностью в вегетационный период. Указанные дешифровочные признаки имеют на космических снимках временный или устойчивый характер. В результате полевого обследования установлено, что вымочки с устойчивым во времени контуром имеют форму котловины, глубину 36 см и более, площадь не менее 0,1 га. Для выяснения вероятной причины возникновения вымочки требуется осуществить картирование закрытых коллекторов внутри ее границ. Выявление на космических снимках высококонтрастной точки или участка вблизи закрытого коллектора в границах контура вымочки может свидетельствовать о наличии неисправности закрытого коллектора в указанном месте или ниже по его трассе. Ключевыми с мелиоративной точки зрения классификационными признаками вымочек на космических снимках являются наличие закрытых коллекторов в границах контура вымочки и устойчивость контура вымочки во времени. Результативность оценки характеристик обследованных вымочек по космическим снимкам: формы рельефа и вероятной глубины – 86%; причины возникновения вымочки как результата технической неисправности закрытого коллектора – 50%.

Ключевые слова: вымочки сельскохозяйственных культур, закрытый трубчатый дренаж, космический снимок, картирование, осушение, гидротехническая мелиорация

Формат цитирования: Остапчук Г.Б. Картирование и типизация вымочек сельскохозяйственных культур на основе данных космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения // Природообустройство. 2025. № 5. С. 15-22. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-15-22>

Original article

MAPPING AND TYPIFICATION OF AGRICULTURAL CROP OVERWETTINGS BASED ON ULTRA-HIGH SPATIAL RESOLUTION SATELLITE IMAGERY DATA

G.B. Ostapchuk¹

¹ Agrophysical Research Institute 14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, Russia, 195220.

¹ ost@agrophys.ru; SPIN- 7905-9266; ID РИНЦ: 1268828

Abstract. The research aimed to map, classify and evaluate agricultural field overwetting plots and their features using ultra-high spatial resolution satellite images. The object of the research is overwetting plots located within the agricultural fields of Menkovsky branch of Agrophysical Research Institute, Gatchina

district of Leningrad region. Study included a field survey of such an overwetting plots, analysis and evaluation of their interpretation characteristics on satellite images. Overall results are as follows. A set of high spatial resolution satellite images mainly taken in early spring and autumn is needed to detect overwetting plots of agricultural field. The visible overwetting plots interpretation characteristics on satellite images are divided depending on time of the year they made into two groups: high contrast counters with signs of water accumulation – in early spring and counters with signs of depressed vegetation – in vegetation period. The overwetting plots contours interpretation characteristics on satellite images have temporary or permanent type; as a result of the field survey it was established that overwetting plots with permanent type of contour have a shape of basin, depth of 36 cm and more and area of at least 0.1 ha. Mapping of the drainage pipes placed inside overwetting plots contour is required to clarify the probable cause of their origin. The presence of the high contrast point or area close to main drainage pipe within the boundaries of overwetting plots contour on satellite images may indicate a malfunction of the closed collector in the specified location or further down its route. Taking into account the melioration tasks, the key classification features of overwetting plots on satellite images are: presence of main drainage pipe within the boundaries of overwetting plots contour and the stability of such contours over time. The evaluation results of the surveyed overwetting plot characteristics on satellite images are as follows: relief forms and probable depth – 86%; the clarifying of the main drainage pipe malfunction as a cause of overwetting plots origin – 50%.

Keywords: overwettings of agricultural crops, closed drainage pipes, satellite image, mapping, drainage, hydrotechnical reclamation, water temperature

Format of citation: Ostapchuk G.B. Mapping and typification of agricultural crop overwetting based on ultra-high spatial resolution satellite images // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 15-22. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-15-22>

Введение. Площадь осушенных сельскохозяйственных угодий в Российской Федерации составляет 4,78 млн га. В проведении работ по восстановлению и реконструкции нуждаются осушительные системы на площади 1,16 млн га [1].

Целесообразность проведения реконструкции закрытого трубчатого дренажа устанавливается в ходе оценки состояния осушенных земель, одним из критериев которого является наличие скопления поверхностных вод или вымочек сельскохозяйственных культур на полях [2]. Выявление в вегетационный период вымочек сельскохозяйственных культур посредством аэрофотосъемки или проведения полевого обследования приобрело значение основного способа обоснования необходимости реконструкции закрытого дренажа. Известно, что достоверность получаемых результатов таких работ зависит от кратности, периода обследования и типа почв, достигая значений 70-90% [3].

С учетом того, что причина возникновения вымочек сельскохозяйственных культур может быть обусловлена как естественной природой их возникновения, а именно водопроницаемостью почв и микрорельефом, так искусственной – наличием повреждений на трассах закрытого трубчатого дренажа [2, 4], к последней относится и неподключение при реконструкции осушительных систем старых действующих дренажей ко вновь устраиваемым [5], задача по картированию закрытого дренажа в границах контура вымочки является

одним из условий установления причины ее возникновения.

Как показал опыт по Калининградской области, аэрофотосъемка является эффективным способом выявления закрытого трубчатого дренажа [6]. В настоящее время стали доступны новые дистанционные способы получения информации о наличии на сельскохозяйственных угодьях закрытого дренажа и вымочек сельскохозяйственных культур и, в частности, аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов и космическая съемка сверхвысокого пространственного разрешения (величина пространственного разрешения – менее 1 м). Использование аэрофотографических снимков с беспилотных летательных аппаратов для картирования закрытого дренажа на сельскохозяйственных угодьях рассмотрено в работах [7, 8], а космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения – в работе [9]. Вопрос выявления контуров с угнетенным состоянием растительности на осушенных сельскохозяйственных угодьях по данным космических снимков среднего пространственного разрешения изучен в работе [10]. В то же время вопросы типизации вымочек сельскохозяйственных культур по их дешифровочным признакам на космических снимках сверхвысокого пространственного разрешения остаются актуальными.

Цель исследований: картирование, типизация и оценка характеристик вымочек сельскохозяйственных культур на основе космических

снимков сверхвысокого пространственного разрешения.

Материалы и методы исследований.

Объектом исследований являются выявленные на космических снимках сверхвысокого пространственного разрешения локальные переувлажненные контуры сельскохозяйственных угодий, в том числе с угнетенным состоянием вегетирующей растительности, вымочки сельскохозяйственных культур (далее – вымочки) на осушенных закрытым дренажем полях № 4, № 8, № 14, № 19 и богарном поле № 26 Меньковского филиала ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Гатчинский район Ленинградской области.

Географические координаты обследованных вымошек: вымочка № 1-59°25'46»с.ш., 30°01'26» в.д.; вымочка № 2-59°25'30» с.ш., 30°01'05» в.д.; вымочка № 3-59°24'50» с.ш., 30°00'18» в.д.; вымочка № 4-59°24'43» с.ш., 30°00'01» в.д.; вымочка № 5-59°24'46» с.ш., 30°00'54» в.д.; вымочка № 6-59°25'00» с.ш., 30°00'47» в.д.; вымочка № 7-59°25'30» с.ш., 30°02'20» в.д.

Для работы были использованы следующие материалы: 1) электронные копии планово-картографических материалов на строительство мелиоративной системы Меньковского филиала ФГБНУ «Агрофизической научно-исследовательский институт»; 2) результаты полевого обследования гидротехнических сооружений указанной мелиоративной системы, проведенного в 2022-2024 гг., и результаты картирования закрытого дренажа; 3) результаты полевого обследования вымошек, проведенного в 2024 г.; 4) цветосинтезированные изображения архивных космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения на рассматриваемую территорию (далее – космические снимки).

Космические снимки подбирались таким образом, чтобы на них были представлены дешифровочные признаки вымошек. Для исследований были использованы: космические снимки, полученные с отечественного космического аппарата «Ресурс-П» № 1 с датами съемки 26.03.2014 г., 06.08.2014 г., 17.05.2017 г., 15.06.2017 г., 07.11.2020 г. и пространственным разрешением 70 см на пиксель, а также с датой съемки 02.11.2017 г. и пространственным разрешением 110 см на пиксель [11]; космические снимки с зарубежных космических аппаратов WorldView-1, GeoEye-1, Pleiades-1 и WorldView-2 с датами съемки 12.09.2009 г., 06.05.2012 г., 17.09.2014 г. и 22.04.2019 г. соответственно и пространственным разрешением по данным [12] 46-50 см на пиксель [13].

Для выполнения картометрических работ указанные планово-картографические материалы и космические снимки были привязаны к плановой системе координат проекции Гаусса-Крюгера, зона 6N, в компьютерной программе – географической информационной системе с открытым исходным кодом QGIS.

Полевое обследование вымошек включало в себя инструментальную съемку рельефа вымошек техническим нивелиром НЗ в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точкой пересечения в относительном центре вымочки и интервалами между смежными съемочными точками 5 или 10 м в зависимости от размеров вымочки, а также панорамное фотографирование вымошек и описание их признаков.

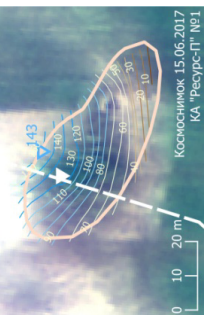
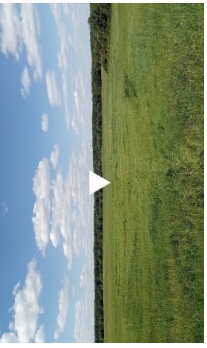
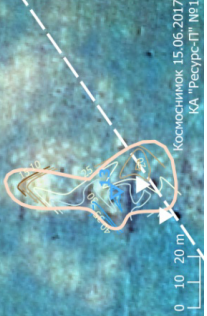

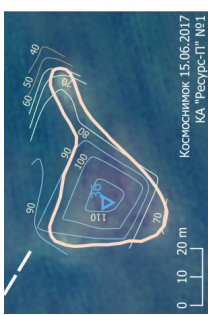
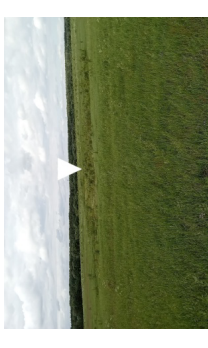

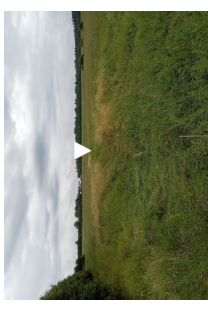
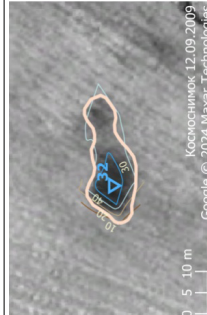


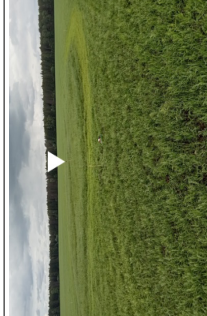


На основе результатов нивелирной съемки были получены сведения о максимальной глубине вымошек и форме их рельефа. Рельеф вымошек был построен на основе данных относительных высот в ГИС QGIS посредством последовательного использования модулей «Contour plugin» и «Generalizer». Работы по картированию вымошек, а также анализ устойчивости их контуров во времени осуществлены способом визуального дешифрирования космических снимков. Площадь вымошек определена картометрическим способом.

Данные о максимальной глубине вымошек, форме их рельефа, площади, и устойчивости их контуров во времени, а также сведения о наличии и состоянии закрытой дренажной системы в границах вымошек послужили основой для разработки классификации вымошек, а также для последующей оценки ключевых характеристик вымошек на основе космических снимков.




Результаты и их обсуждение. *Анализ характеристик вымошек по космическим снимкам.* План-схемы вымошек сельскохозяйственных культур с отображением их рельефа и других характеристик и панорамные фотографические снимки вымошек представлены в таблице 1 (условные обозначения к планам-схемам и фотографиям вымошек – в конце указанной таблицы).

Анализ фотоизображений вымошек на космических снимках показывает, что их дешифровочные признаки можно подразделить на две основные, преимущественно в ранневесенний период (см. план-схемы вымошек № 3, № 4, № 6 и № 7; контуры с угнетенной растительностью в вегетационный период (см. план-схемы вымошек № 1, № 2 и № 5). Полная характеристика вымошек по данным анализа космических снимков представлена в таблице 2.

Таблица 1. План-схемы и фотографии вымочек / Table 1. Layouts and photographs of overwettings

№ вымочек No overwettings	План-схема вымочки Overwetting plan and diagram	Фотография вымочки Photo of the overwetting	№ вымочек No overwettings	План-схема вымочки Overwetting plan and diagram	Фотография вымочки Photo of the overwetting
1			5		
2			6		
3			7		
4					

Условные обозначения / Conventional designations

<ul style="list-style-type: none">  Высококонтрастная точка/область мелиоративных сооружений  --- Закрытый коллектор  — Открытый канал 	<p>Вершиной треугольника на фотографиях обозначен относительный центр вымочки. <i>The apex of the triangle in the photographs indicates the relative center of the overwetting.</i></p> <p>Даты фотографий вымочек / Dates of the photographs of the overwettings: № 1-24.07.2024, №№ 2 и 7-10.06.2024, №№ 3 и 4-25.06.2024, № 5-20.08.2024 и № 6-12.07.2024</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Примечание – Вымочка № 1 и высококонтрастная область внутри ее границы карторованы с привлечением дополнительных снимков 26.03.2014, 06.08.2014 и 17.05.2017 годов, а вымочка № 5-06.05.2012 года.

Note: Overwetting No. 1 and the high-contrast area within its boundary were mapped using additional images taken on March 26, 2014, August 6, 2014, and May 17, 2017, and recess No. 5 on May 6, 2012.

Таблица 2. Характеристика вымочек по данным анализа космических снимков
 Table 2. Characteristics of overwettings based on satellite imagery analysis

№№ вымочек №№ overwettings	Площадь вымочки, <i>Overwetting area, m²</i>	Устойчивость контура вымочки во времени <i>Stability of the overwetting contour over time</i>	Форма рельефа вымочки <i>Relief shape of the overwetting</i>	Наличие закрытых коллекторов в границах вымочки <i>The presence of closed collectors within the overwetting boundaries</i>	Наличие контрастной точки вблизи закрытого коллектора внутри контура вымочки и дата космоснимка <i>The presence of a contrast point near a closed collector inside the contour of the overwetting and the date of the satellite image</i>
1	1291	Устойчивый <i>stable</i>	Котловина <i>basin</i>	Есть <i>present</i>	есть / <i>present</i> / 06.08.2014
2	1330	Устойчивый <i>stable</i>	Котловина <i>basin</i>	Отсутствует <i>missing</i>	закрытый коллектор отсутствует <i>closed collector is missing</i>
3	246	Неустойчивый <i>unstable</i>	Котловина <i>basin</i>	Отсутствует <i>missing</i>	закрытый коллектор отсутствует <i>closed collector is missing</i>
4	970	Неустойчивый <i>unstable</i>	Неопределенная <i>uncertain</i>	Есть <i>present</i>	Отсутствует <i>missing</i>
5	1282	Неустойчивый <i>unstable</i>	Неопределенная <i>uncertain</i>	Есть <i>present</i>	есть / <i>present</i> / 15.06.2017
6	679	Неустойчивый <i>unstable</i>	Неопределенная/вытянутая котловина <i>Uncertain / elongated basin</i>	Есть <i>present</i>	Есть / <i>present</i> / 22.04.2019
7	1621	Устойчивый <i>stable</i>	Котловина <i>basin</i>	Отсутствует <i>missing</i>	закрытый коллектор отсутствует <i>closed collector is missing</i>

Анализ космических снимков показывает, что для части вымочек первая группа дешифровочных признаков в течение вегетационного периода сменяется второй группой – вымочки № 1, № 2 и № 7. Остальные вымочки (№ 3, № 4, № 5 и № 6) имеют неустойчивый контур, который исчезает в течение вегетационного периода.

Как отмечено в работе [5], зарастание вымочек сорняками и кустарником является закономерным процессом. Анализ космических снимков показал, что внутренняя неоднородность контуров вымочек в вегетационный период существенно снижает информативность дешифровочного признака наличия древесно-кустарниковой растительности внутри их контура, и это затрудняет оценку вымочек по данной характеристике. Исключение составляют космические снимки, полученные в зимний период, на которых при наличии снежного покрова способом визуального дешифрирования можно обнаружить древесно-кустарниковую растительность по отбрасываемой ею тени.

Форма контура вымочек на космических снимках позволяет определить предполагаемую форму их рельефа: вымочки № 1-3 и № 7 имеют признаки котловины,

а вымочки № 4-6 – неопределенной формы рельефа (см. план-схемы в таблице 1).

Анализом результатов картирования закрытого дренажа [10] и контуров вымочек выделены те вымочки, в границах которых проходят трассы закрытых коллекторов, а именно вымочки № 1 и № 4-6. При этом на космических снимках вблизи трасс закрытых коллекторов внутри контуров вымочек № 1, № 5 и № 6 обнаружено наличие высококонтрастной точки или области (см. план-схемы в таблице 1).

Площадь вымочек, определенная по космическим снимкам, находится в пределах от 0,02 до 0,2 га.

Анализ характеристик вымочек по данным полевого обследования. Характеристика вымочек по данным полевого обследования представлена в таблице 3.

Признаки вымочек в натуре в вегетационный период были представлены закустаренностью, составом травостоя, наличием угнетенной растительности. Частичное зарастание вымочек кустарником характерно для большинства обследованных вымочек, а именно № 1-5. Отсутствие кустарника было отмечено для вымочек на пашне (вымочки № 6 и № 7).

Таблица 3. Характеристика вымочек по данным полевого обследования

Table 3. Characteristics of overwettings according to field survey data

№№ вымочек №№ overwettings	Отличительный признак вымочки <i>A distinctive feature of the overwetting</i>	Форма рельефа вымочки <i>Relief shape of the overwetting</i>	Максимальная глубина вымочки, см <i>Maximum overwetting depth, sm</i>	Техническое состояние закрытого коллектора в границах контура вымочки и ниже по его трассе <i>Technical condition of the closed collector within the boundaries of the overwetting contour and below its route</i>
1	слабо угнетенная растительность, одиночный кустарник <i>slightly oppressed vegetation, single shrub</i>	Ложбина <i>hollow</i>	143*	заиление / <i>siltation</i> 50%
2	состав травостоя, закустаренность <i>herbage composition, bushiness</i>	Котловина <i>basin</i>	36	закрытый коллектор отсутствует <i>closed collector is missing</i>
3	Закустаренность <i>bushiness</i>	Котловина <i>basin</i>	32	закрытый коллектор отсутствует <i>closed collector is missing</i>
4	густота травостоя, закустаренность <i>grass density, bushiness</i>	Агрогенный <i>agrogenic</i>	12	неисправен (устье не обнаружено) <i>defective (mouth not detected)</i>
5	Закустаренность <i>bushiness</i>	Смешанный <i>mixed</i>	13	Неисправен <i>faulty</i>
6	состав травостоя <i>composition of the herbage</i>	Смешанный <i>mixed</i>	11	Неисправен <i>faulty</i>
7	угнетенная растительность по краям вымочки <i>suppressed vegetation along the edges of the soak</i>	Котловина <i>basin</i>	40	закрытый коллектор отсутствует <i>closed collector is missing</i>

* – разность высот между наивысшей и наименьшей точками ложбины

* – the difference in height between the highest and lowest points of the hollow

Рельеф вымочек, установленный на основе результатов нивелирной съемки, представлен котловинами (вымочки № 2, № 3 и № 7), ложбиной (вымочка № 1), а также смешанной (вымочки № 5 и № 6) или агрогенной (вымочка № 4) формами рельефа (см. план-схемы в таблице 1). Агрогенный рельеф вымочки № 4 обусловлен разравниванием кавальеров открытого канала ОК-4, смежного с вымочкой, или другими причинами. Смешанный рельеф вымочки № 5 представляет собою ложбину в сочетании с локальными возвышенными и пониженными местами в границах вымочки, а вымочки № 6 – слабо выраженной котловины с переходом в вытянутую котловину на нижних отметках высот.

Наибольшую глубину, по данным нивелирной съемки, имеют вымочки в форме котловины (№ 2, № 3 и № 7) – 32-40 см. Остальные вымочки, за исключением № 1, а именно вымочки № 4-6, имеют глубину в пределах 11-13 см. Вымочка № 1 имеет форму ложбины, поэтому оценка по этой характеристике для нее неприменима.

По данным полевых обследований 2022-2024 гг., закрытые коллекторы, пересекающие вымочки № 4-6, повреждены и неработоспособны,

а закрытый коллектор в границах вымочки № 1 заилен с сохранением водопроводящей функции. В местах, где на космических снимках вблизи трасс закрытых коллекторов внутри контуров вымочек № 5 и № 6 были выявлены высококонтрастные точки, при полевом обследовании было обнаружено наличие выхода дренажных вод на поверхность, что свидетельствует о наличии неисправности закрытого коллектора в указанном месте или ниже по его трассе.

Подводя итоги анализа характеристик вымочек по космическим снимкам и в натуре, можно сделать следующие выводы. Вымочки с устойчивым во времени контуром имеют форму котловины, глубину 36 см и более и площадь более 0,1 га (вымочки № 2 и № 7). Вымочки, в границах контура которых проходит трасса закрытого коллектора, имеют большей частью неустойчивый во времени контур, неопределенную форму рельефа, глубину 13 см и менее и площадь менее 0,1 га (вымочки № 4-6).

С учетом того, что у обследованных вымочек, имеющих устойчивый во времени контур, глубина составляет 36 см и более, указанное значение было принято в качестве порогового для

оценки вероятной глубины вымочки по космическим снимкам.

Классификация вымочек. К ключевым с мелиоративной точки зрения классификационным характеристикам вымочек следует отнести наличие закрытых коллекторов в границах контура вымочки и устойчивость контуров вымочек во времени. Выявление первого классификационного признака позволяет установить вероятную причину возникновения вымочки как результата неисправности закрытого коллектора. Анализ по второму классификационному признаку позволяет оценить степень нарушения водно-воздушного режима почв в границах контура вымочки, и как следствие – его влияние на своевременность или запаздывание проведения агрономической обработки почвы, а также вероятность развития процессов закустаривания вымочки.

Оценка результативности анализа характеристик вымочек по космическим снимкам. Сопоставление представленных характеристик вымочек, полученных путем анализа космических снимков, с характеристиками вымочек, установленными при обследовании, позволяет выполнить оценку результативности такого анализа. Так, соответствие установленной по космическим снимкам формы рельефа вымочек фактической отмечается для вымочек в форме котловины (№ 2, № 3 и № 7) и вымочек со смешанной формой рельефа (вымочки № 4-6) или в целом для 86% общего числа вымочек. Несоответствие формы рельефа, а именно котловины ложбине, отмечено для вымочки № 1.

Соответствие установленной по космическим снимкам вероятной глубины вымочек относительно принятого порогового значения фактическим данным отмечено для 86% всех вымочек. При этом несоответствие такой оценки отмечено для вымочки № 1 по причине неприменимости для нее указанного показателя.

Соответствие оценки по космическим снимкам технического состояния закрытых коллекторов, трассы которых проходят внутри контура вымочек, фактическому их состоянию отмечается для вымочек № 5 и № 6, или для 50% общего количества таких вымочек. В то же время несоответствие такой оценки для вымочки № 1 объясняется следующим обстоятельством. Наличие

высококонтрастной области в нижней части вымочки вблизи трассы закрытого коллектора обусловлено снижением в указанном месте общего уклона ложбины с 3,6 до 1,9%, что приводит к аккумуляции и уменьшению скорости притекающего со склона поверхностного стока.

Выводы

Подводя итоги проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. Для обнаружения вымочек сельскохозяйственных культур целесообразно использовать серию архивных космических снимков, сделанных преимущественно в ранневесенний и осенний периоды.

2. Дешифровочные признаки вымочек на космических снимках представлены двумя основными группами: высококонтрастными переувлажненными контурами с признаками скопления воды преимущественно в ранневесенний период и контурами с угнетенной растительностью в вегетационный период. По степени устойчивости во времени указанные контуры подразделяются на временные и устойчивые; устойчивые контуры характерны для вымочек в форме котловины с глубиной 36 см и более и площадью не менее 0,1 га.

3. Для выяснения причины возникновения вымочки требуется осуществить картирование закрытых коллекторов внутри ее границ. Выявление высококонтрастной точки или участка вблизи трассы закрытого коллектора в границах контура вымочки может свидетельствовать о наличии неисправности закрытого коллектора в указанном месте или ниже по его трассе.

4. Ключевыми с мелиоративной точки зрения классификационными признаками вымочек на космических снимках являются наличие закрытых коллекторов в границах контура вымочки и устойчивость контуров вымочек во времени.

5. Результативность оценки характеристик обследованных вымочек по космическим снимкам: формы рельефа и вероятной глубины – 86%; причины возникновения вымочки как результата технической неисправности закрытого коллектора – 50%.

Благодарности. Автор признателен ведущему инженеру А.С. Старцеву за помощь в проведении нивелирной съемки.

Список использованных источников

1. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2021 году. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. 356 с.
2. Временные рекомендации по реконструкции осушительных систем в Нечерноземной зоне РСФСР. Л.: СевНИИГиМ, 1989. 70 с.

References

1. Report on the status and use of agricultural lands in the Russian Federation in 2021. Moscow: Federal State Budgetary Scientific Institution "Rosinformagrotech", 2022. 356 p.
2. Temporary recommendations for the reconstruction of drainage systems in the Non-chernozem of the RSFSR. L.: SevNIIGiM, 1989. 70 p.

3. Канцибер Ю.А. Особенности мелиоративно-гидротехнических изысканий при реконструкции осушительных систем / Реконструкция мелиоративных систем: сборник науч. тр. / Л.: СевНИИГиМ, 1990. С. 20-27.

4. Канцибер Ю.А., Золотов М.Е. Эффективность реконструкции осушительных систем в Ленинградской области // Реконструкция мелиоративных систем: сборник науч. трудов. Л.: СевНИИГиМ, 1990. С. 54-62.

5. Маслов Б.С. Вопросы повышения надежности дренажа переувлажненных земель / Б.С. Маслов, Ц.Н. Шкин-кис, Х.А. Смилга // Мелиорация и водное хозяйство. Серия 2. Осушение и осушительные системы. Экспресс информация. Вып. 5. 1980. 30 с.

6. Мейер Г.Я. Применение аэрометодов для картирования закрытых дренажных систем / Г.Я. Мейер, И.М. Кривоносов // Труды лаборатории аэрометодов. Том V.-М. – Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1956. С. 103.

7. Allred B., Martinez L., Fessehazion M.K., Rouse G., Williamson T.N., Wishart D., Koganti T., Freeland R., Eash N., Batschelet A., Featheringill R. Overall results and key findings on the use of UAV visible-color, multispectral, and thermal infrared imagery to map agricultural drainage pipes // *Agricultural Water Management*. 2020. Vol. 232, 106036. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106036

8. Koganti T, Ghane E, Martinez LR, Iversen BV, Allred BJ. Mapping of Agricultural Subsurface Drainage Systems Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery and Ground Penetrating Radar // *Sensors (Basel)*. 2021 Apr 15; 21(8):2800. DOI: 10.3390/s21082800.

9. Остапчук Г.Б. Картирование закрытого трубчатого дренажа по космическим снимкам сверхвысокого пространственного разрешения / Г.Б. Остапчук., А.Ф. Петрушин, Е.П. Митрофанов, А.С. Старцев // *Агрофизика*. 2024. № 1. С. 41-48.

10. Петрушин А.Ф. Определение состояния осушительных мелиоративных систем по данным дистанционного зондирования в Северо-Западном регионе Российской Федерации / А.Ф. Петрушин, Ю.Г. Янко, О.А. Митрофанова, Е.П. Митрофанов // *Агрофизика* № 2, 2023. С. 39-44. EDN: JOVSLT

11. Геопортал «Роскосмос». – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gptl.ru/> (дата обращения: 09.12.2024). – Режим доступа: по подписке.

12. Apollo Mapping. [Электронный ресурс]. URL: <https://imagehunter.apollomapping.com> (дата обращения: 28.02.2024).

13. Google Планета Земля. [Электронный ресурс]. URL: <https://earth.google.com/> (дата обращения: 28.02.2024).

3. Kantsiber Yu.A. Features of meliorative and hydraulic engineering surveys in the reconstruction of drainage systems / *Reconstruction of melioration systems: collection of scientific papers / L.: SevNIIGiM, 1990. P. 20-27.*

4. Kantsiber Yu.A., Zolotov M.E. Efficiency of drainage systems reconstruction in the Leningrad region // *Reconstruction of melioration systems: collection of scientific papers / L.: SevNIIGiM, 1990. P. 54-62.*

5. Maslov B.S. Issues of increasing the reliability of drainage overwetting lands / B.S. Maslov Ts.N. Shkinkis, H.A. Smilga // *Land reclamation and water management. Series 2. Drainage and drainage systems. Express information. Issue 5. 1980. 30 p.*

6. Meyer G.Ya. Application of aerial methods for mapping closed drainage systems/ Meyer G.Ya., I.M. Krivonosov // *Proceedings of the laboratory of aerial methods. Volume V.-M. – L.: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1956. – P. 103.*

7. Allred B., Martinez L., Fessehazion M.K., Rouse G., Williamson T.N., Wishart D., Koganti T., Freeland R., Eash N., Batschelet A., Featheringill R. Overall results and key findings on the use of UAV visible-color, multispectral, and thermal infrared imagery to map agricultural drainage pipes // *Agricultural Water Management*. 2020. Vol. 232, 106036. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106036

8. Koganti T, Ghane E, Martinez LR, Iversen BV, Allred BJ. Mapping of Agricultural Subsurface Drainage Systems Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery and Ground Penetrating Radar // *Sensors (Basel)*. 2021 Apr 15; 21(8):2800. DOI: 10.3390/s21082800.

9. Ostapchuk G.B., Petrushin A.F., Mitrofanov E.P., Startsev A.S. Mapping of agricultural closed drainage systems using ultra-high spatial resolution satellite images / G.B. Ostapchuk., A.F. Petrushin, E.P. Mitrofanov, A.S. Startsev // *Agrophysics*. 2024. No. 1. P. 41-48. .

10. Остапчук Г.Б. 10. Petrushin A.F., Yanko Yu.G., Mitrofanov O.A., Mitrofanov E.P. Determining the state of drainage systems using data of remote sensing in the north-west region of the Russian Federation // *Agrophysics*, No. 2, 2023. Pp. 39-44. EDN: JOVSLT

11. Roscosmos Geoportal [Electronic resource]. URL: <https://www.gptl.ru/> (date of access: 09.12.2024). – Access mode: by subscription.

12. Apollo Mapping. [Electronic resource]. URL: <https://imagehunter.apollomapping.com> (date of access: 28.02.2024).

13. Google Earth [Electronic resource]. URL: <https://earth.google.com/> (date of access: 28.02.2024).

Об авторе

Григорий Борисович Остапчук, канд. эконом наук; SPIN- 7905-9266; ID РИНЦ: 1268828; ost@agrophys.ru

¹ ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, Россия

About the authors

Grigory B. Ostapchuk, CSs (Econ); SPIN- 7905-9266; RSCI ID: 1268828; ost@agrophys.ru

¹ **Agrophysical Research Institute 14**, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, Russia, 195220

Критерии авторства / Criteria of authorship

Остапчук Г.Б. выполнил теоретические и практические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись, имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 11.02.2025

Поступила после доработки и рецензирования / Received after peer review 05.10.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 05.10.2025

Ostapchuk G.B. conducted theoretical and practical research, based on which he summarized and wrote the manuscript. He holds the copyright for the article and is responsible for any plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-23-30>

УДК 631.544.7:631.674.6:634.1(571.1)



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УКРЫВНЫХ И МУЛЬЧИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА УЧАСТКАХ С КАПЕЛЬНЫМ ОРОШЕНИЕМ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ВЫХОД И КАЧЕСТВО ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА САДОВЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСТЕПИ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.В. Шишкин¹, М.А. Рыжова², Д.М. Бенин³, Н.В. Гавриловская⁴, И.В. Гефке⁵

^{1,5} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет»; 656049 Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Красноармейский, 98, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий»; 656910, Алтайский край, г. Барнаул, Научный Городок, д. 35, Россия

^{3,4} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, Россия

¹ shishkin8@yandex.ru; ORCID0000-0003-2058-5627

² ryzhova.marina.20@mail.ru; ORCID0000-0003-4451-6589

³ dbenin@rgau-msha.ru; ORCID0000-0003-1265-407

⁴ gavrilovskayanv@rgau-msha.ru; ORCID0000-0001-5060-7837;

⁵ ivgefke@mail.ru; ORCID0000-0002-0804-015X

Аннотация. Исследования проведены в лесостепной зоне Алтайского края на участках с капельным орошением в 2025 г. согласно общепринятым методикам. Применялись укрывные и мульчирующие материалы при доращивании саженцев жимолости и облепихи, увлажнение лугово-черноземной почвы поддерживалось на уровне от 70% НВ. Цель работы – оценить влияние укрывных и мульчирующих материалов при выращивании саженцев жимолости и облепихи с капельным орошением в условиях лесостепи юга Западной Сибири. Выявлено, что применение укрывных и мульчирующих материалов положительно отразилось на качественных показателях саженцев жимолости сорта Берель. Высота саженцев в зависимости от варианта опыта увеличилась на 2,9-26,6%, диаметр штамба – на 31,7%, количество корней первого порядка – на 16,0-62,7%, длина корней – на 2,6-35,9% по сравнению с контрольным вариантом. Наибольшее количество саженцев высокого качества получено в вариантах с опилками и спанбондом черным (73,3%). Доращивание саженцев облепихи сорта Жемчужница с применением укрывных и мульчирующих материалов на участке с капельным орошением способствует повышению качества посадочного материала. Биометрические показатели повысились: на 6,5-14,8% (высота саженцев); на 3,6-21,9% (количество разветвлений надземной части); на 6,3-22,3% (диаметр штамба); на 10,1-27,5% (количество корней первого порядка); на 1,4-38,8% (длина корней). Наибольшее количество саженцев первого товарного сорта получено в вариантах с применением спанбонда черного (73,3%) и соломы (80,0%).

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минсельхоза России в рамках государственного задания на НИР ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ по проекту «Совершенствование технологии капельного орошения при доращивании саженцев плодово-ягодных культур в садах лесостепной зоны юга Западной Сибири» (№ госрегистрации темы 125030703245-8).

Ключевые слова: мелиорация, жимолость, облепиха, капельный полив, укрывные и мульчирующие материалы, саженцы

Формат цитирования: Шишкин А.В., Рыжова М.А., Бенин Д.М., Гавриловская Н.В., Гефке И.В. Оценка эффективности применения укрывных и мульчирующих материалов на участках с капельным орошением и его влияние на выход и качество посадочного материала садовых культур в условиях лесостепи юга Западной Сибири // Природообустройство. 2025. № 5. С. 23-30. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-23-30>

Original article

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF COVERING AND MULCHING MATERIALS IN AREAS WITH DRIP IRRIGATION ON THE YIELD AND QUALITY OF PLANTING MATERIAL OF HORTICULTURAL CROPS IN THE CONDITIONS OF THE FOREST-STEPPE OF THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

A.V. Shishkin¹, M.A. Ryzhova², D.M. Benin³, N.V. Gavrilovskaya⁴, I.V. Gefke⁵^{1,5} Altai State Agrarian University² Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnology^{3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy¹ shishkin8@yandex.ru;² ryzhova.marina.20@mail.ru; ORCID0000-0003-4451-6589³ dbenin@rgau-msha.ru; ORCID0000-0003-1265-407⁴ gavrilovskayanv@rgau-msha.ru; ORCID0000-0001-5060-7837⁵ ivgefke@mail.ru; ORCID0000-0002-0804-015X

Abstract. Studies were carried out in the forest-steppe zone of the Altai Territory in areas with drip irrigation in 2025 according with generally accepted methods. Covering and mulching materials were used when growing honeysuckle and sea buckthorn seedlings, meadow-chernozem soil moistening was maintained at the level of 70% of HB. **The aim of this study** is to evaluate the impact of covering and mulching materials on the cultivation of honeysuckle and sea buckthorn seedlings using drip irrigation in the forest-steppe conditions in the south of Western Siberia. It was found that the use of covering and mulching materials had a positive impact on the quality indicators of the Berel honeysuckle seedlings. Depending on the experimental variant, seedling height increased by 2.9-26.6%, trunk diameter by 31.7%, the number of primary roots by 16.0-62.7%, root length by 2.6-35.9% compared to the control variant. The most of high-quality seedlings were obtained in the variants with sawdust and black spunbond (73.3%). Growing Zhemchuzhnitsa sea buckthorn seedlings using covering and mulching materials in a drip-irrigated area improved the quality of the planting material. Biometric indicators increased by 6.5-14.8% (seedling height), 3.6-21.9% (number of aboveground branching), 6.3-22.3% (trunk diameter), 10.1-27.5% (number of primary roots), 1.4-38.8% (root length). The most of first-grade commercial seedlings were obtained in the variants using black spunbond (73.3%) and straw (80.0%).

Financing. The study was carried out with the financial support of the Ministry of Agriculture of Russia within the framework of the state assignment for the research of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Altai State Agrarian University under the project “Improving the technology of drip irrigation in the cultivation of seedlings of fruit and berry crops in the gardens of the forest-steppe zone of the south of Western Siberia” (No state registration of the topic – 125030703245-8)

Keywords: land reclamation, honeysuckle, sea buckthorn, drip irrigation, covering and mulching materials, seedlings

Citation format: Shishkin A.V., Ryzhova M.A., Beni D.M., Gavrilovskaya N.V., Gefke I.V. Assessment of the effectiveness of the use of covering and mulching materials in areas with drip irrigation on the yield and quality of planting material of horticultural crops in the conditions of the forest-steppe of the south of Western Siberia // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 23-30. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-23-30>

Введение. На современном этапе развития интенсивного садоводства выращиванию качественного посадочного материала уделяется особое внимание. В системе питомниководческих мероприятий, направленных на повышение выхода стандартных саженцев открытого грунта в засушливых районах, первостепенное значение имеет бесперебойное обеспечение растений достаточным количеством влаги [1].

За вегетационный период растения затрачивают значительное количество воды

на транспирацию. Потребляемая вода необходима для роста, образования тканей и протекания жизненных процессов [2, 3]. В условиях Алтайского края распределение осадков на протяжении вегетационного периода является довольно неравномерным, поэтому даже в относительно влажные годы отмечаются продолжительные засухи. Для производства конкурентоспособной продукции садоводства без орошения нельзя создать оптимальные условия для режима влажности почвы. Необходимость применения

искусственного орошения в поле питомника при доращивании саженцев жимолости в засушливых условиях является очевидной.

Одной из ресурсосберегающих технологий является капельное орошение, которое позволяет повысить качество и выход продукции сельскохозяйственных культур [4-7].

Практика использования капельно-орошаемых древесно-плодовых насаждений показала примеры их высокой продуктивности и экономической эффективности при относительно низкой ресурсоемкости в одних условиях и неоправданность ожиданий и некупаемости затрат на создание и использование систем капельного орошения промышленных садов – в других. Установлено, что достоинства способа и систем капельного орошения садов и их потенциальные возможности далеко не исчерпаны, установленные недостатки технологии не устранены, а известные разработки их компоновочно-конструктивных решений и расчетов нуждаются в совершенствовании [8].

В настоящее время применение укрывных и мульчирующих материалов садовых насаждений набирает широкую популярность [9-15]. При этом выделяется целый ряд преимуществ, среди которых основными являются подавление сорняков и экономия ручного труда на прополках, сохранение влаги в почве и улучшение температурного режима, усиление биологической активности почвы [16, 17].

В литературе не встречаются данные по применению спанбонда (нетканого материала), соломы и опилок на перешколках доращивания саженцев жимолости и облепихи с использованием капельного полива.

Цель исследований: оценить влияние укрывных и мульчирующих материалов при выращивании саженцев жимолости и облепихи с капельным орошением в условиях лесостепи юга Западной Сибири.

Материалы и методы исследований. Исследования проведены в 2025 г. на участке экспериментально-производственного отделения ФГБНУ ФАНЦА в отделе НИИСС имени М.А. Лисавенко, в лесостепной зоне Алтайского края, согласно программе и методике сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур [18]. Математическая обработка результатов произведена по методикам, описанным Б.А. Доспеховым [19].

Опыты по оценке эффективности применения укрывных и мульчирующих материалов при доращивании саженцев жимолости при капельном орошении включали в себя следующие

варианты: без укрытия – контроль; солома (слой 3-5 см); опилки древесные мелкие (слой 3-5 см); спанбонд черный (нетканый материал); спанбонд белый (нетканый материал).

Мульчирование вариантов опыта выполнялось после монтажа системы капельного орошения, которая состояла из стандартных капельных линий с диаметром трубки 16 мм и расстоянием между капельницами 20 см с нормой вылива воды 1,6 л/час. В качестве магистральных трубопроводов использовались гибкие армированные рукава «LayFlat» диаметром 100 мм.

Почвы опытного участка – лугово-черноземные, среднесуглинистые мелкопесчаные. Увлажнение поддерживалось на уровне от 70% НВ. Окорененные черенки жимолости сорта Берель и облепихи сорта Жемчужница после выкопки осенью из теплицы высаживали рано весной (начало мая) на доращивание в поле питомника по схеме посадки $0,7 \times 0,2$ м ($7,1$ шт/м²). Количество учетных растений в одной деланке составляло 30 шт. (450 шт. в опыте). Опыт проведен в трехкратной повторности, размещение вариантов в опыте – систематическое. Биометрические измерения саженцев проведены осенью 2025 г. после выкопки (конец сентября).

Приживаемость, рост и развитие любого посадочного материала зависят от температуры и количества осадков в течение вегетационного периода. Для саженцев жимолости и облепихи в вегетационный период 2025 г. сложились довольно благоприятные метеорологические условия. Основные их показатели представлены на рисунках 1, 2 (данные метеопункта отдела «НИИСС» ФГБНУ ФАНЦА).

Среднемесячная температура воздуха в вегетационный период экспериментального года была на уровне средне многолетних показателей.

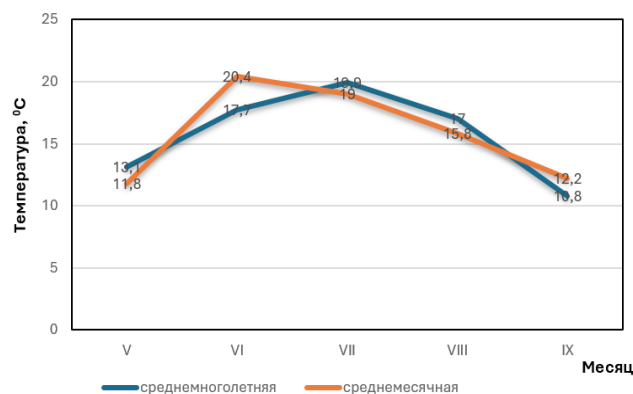


Рис. 1. Среднемесячная температура воздуха, °C

Fig. 1. Average monthly air temperature, °C

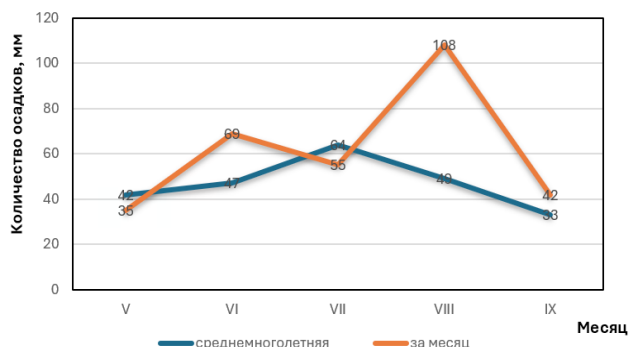


Рис. 2. Среднемесячная сумма осадков, мм
Fig. 2. Average monthly precipitation amount, mm

В мае 2025 г. среднемесячная температура воздуха была ниже многолетней на 1,3 °С. В июне этот показатель был на 2,7 °С выше, в июле и августе – на 0,9 и 1,2 °С ниже среднемесячной многолетней температуры.

За вегетационный период 2025 г. наблюдалось резкое отличие среднемесячных сумм осадков от среднемуголетней. Сумма осадков в мае 2025 г. составила 35 мм, что на 7 мм ниже многолетней. В июне этот показатель составил

69 мм, что в 1,5 раза больше многолетней суммы осадков.

Июль был засушливым, количество осадков составило 55 мм, что меньше нормы на 9 мм. Август был дождливым (108 мм), осадков выпало в 2,2 раза больше нормы. Количество осадков в сентябре было на 9 мм выше нормы. Количество осадков за вегетационный сезон 2025 г. было на уровне 309 мм.

Результаты и их обсуждение. Применение укрывных материалов положительно отразилось на биометрических показателях саженцев жимолости сорта Берель (табл. 1).

Высота саженцев в зависимости от варианта опыта увеличилась на 2,9-26,6%. Наибольшие значения отмечали в варианте с опилками – 73,3 см. В контрольном варианте этот показатель составил 57,9 см.

Количество разветвлений надземной части в среднем по опыту составило 5,3 шт. В вариантах со спанбондом (черным и белым) этот показатель на 9,3 и 24,1% ниже, чем в контроле. Опилки и солома способствовали получению

Таблица 1. Основные показатели качества саженцев жимолости сорта Берель при применении укрывных и мульчирующих материалов, 2025 г.

Table 1. Main quality indicators of honeysuckle seedlings of the Berel variety when using covering and mulching materials, 2025

Показатель Indicator	Контроль Control	Солома Straw	Опилки Sawdust	Спанбонд черный Spunbond black	Спанбонд белый Spunbond white	Среднее Average
Высота саженцев / height of seedlings						
См / cm	57,9	59,9	73,3	60,1	59,6	62,2
% к контролю / % control	0,0	+3,5	+26,6	+3,8	+2,9	–
НСР ₀₅	11,0					
Количество разветвлений надземной части Number of branches of the above-ground part						
шт. / pcs	5,4	6,2	5,8	4,1	4,9	5,3
% к контролю / % control	0,0	+14,8	+7,4	–24,1	–9,3	–
НСР ₀₅	$F_{\phi} < F_{\tau}$					
Диаметр штамба / trunk diameter						
Мм / mm	6,3	5,9	8,3	5,9	4,9	6,3
% к контролю / % control	0,0	–6,3	+31,7	–6,3	–22,2	–
НСР ₀₅	$F_{\phi} < F_{\tau}$					
Количество корней первого порядка / number of primary roots						
шт. / pcs	15,0	20,5	24,4	22,0	17,4	19,9
% к контролю / control	0,0	+36,7	+62,7	+46,7	+16,0	–
НСР ₀₅	8,3					
Длина корней / length of roots						
См / cm	15,3	14,7	15,7	20,8	15,3	16,4
% к контролю / % control	0,0	–3,9	+2,6	+35,9	0,0	–
НСР ₀₅	$F_{\phi} < F_{\tau}$					
Товарный выход саженцев, % / commercial yield of seedlings, %						
1 сорт / Grade 1	40,0	53,3	73,3	73,3	20,0	52,0
2 сорт / Grade 2	60,0	46,7	26,7	26,7	80,0	48,0

более разветвленных саженцев. Число надземных побегов в этих вариантах увеличилось на 7,4 и 14,8% по сравнению с контролем.

Диаметр штамба при применении опилок увеличился на 31,7%. В контроле он составил 6,3 мм, в варианте с соломой и спанбондом черным – по 5,9 мм, что ниже контроля на 6,3%, а в варианте со спанбондом белым – 4,9 мм (ниже на 22,2%).

Во всех вариантах с укрывными и мульчирующими материалами корневая система саженцев была более мощной, чем в варианте без укрытия. Количество корней первого порядка выросло на 16,0-62,7%. Так, этот показатель в контрольном варианте составил 15,0 шт., а в вариантах с укрывными и мульчирующими материалами – от 17,4 до 24,4 шт.

Длина корней в варианте со спанбондом белым осталась на уровне контроля и составила 15,3 см, в вариантах с соломой и спанбондом черным увеличилась на 2,6 и 35,9% (15,7 и 20,8 см соответственно), а в варианте с соломой снизилась на 3,9%.

По биометрическим показателям саженцев выделились варианты с опилками и спанбондом черным. Именно здесь получено наибольшее количество саженцев высокого качества (по 73,3%). В контрольном варианте этот показатель составил 40,0%. Наибольшее количество второсортных саженцев (80,0%) было отмечено в варианте со спанбондом белым. В вариантах с укрывными и мульчирующими материалами этот показатель составил 26,7-46,7% от общего числа саженцев. Применение укрывных и мульчирующих материалов при доращивании саженцев жимолости на участке с капельным орошением способствует получению большей доли высококачественных саженцев по сравнению с контрольным вариантом.

Применение укрывных материалов положительно отразилось на качественных показателях саженцев облепихи сорта Жемчужница (табл. 2).

Высота саженцев в контрольном варианте составила 67,5 см. Применение опилок, спанбонда черного способствовало увеличению этого

Таблица 2. Основные показатели качества саженцев облепихи сорта Жемчужница при применении укрывных и мульчирующих материалов, 2025 г.

Table 2. Main quality indicators of sea buckthorn seedlings of the Zhemchuzhnitsa variety when using covering and mulching materials, 2025

Показатель <i>Indicator</i>	Контроль <i>Control</i>	Солома <i>Straw</i>	Опилки <i>Sawdust</i>	Спанбонд черный <i>Spunbond black</i>	Спанбонд белый <i>Spunbond white</i>	Среднее <i>Average</i>
Высота саженцев / height of seedlings						
См / <i>cm</i>	67,5	77,5	71,9	75,3	67,1	71,9
% к контролю / % control	0,0	+14,8	+6,5	+11,6	-0,6	-
НСР ₀₅	3,4					
Количество разветвлений надземной части number of branches of the above-ground part						
шт. / <i>pcs</i>	16,9	19,9	20,6	17,5	20,6	19,1
% к контролю / % control	0,0	+17,8	+21,9	+3,6	+21,9	-
НСР ₀₅	3,4					
Диаметр штамба / trunk diameter						
Мм / <i>mm</i>	7,9	9,7	9,7	8,4	7,3	8,6
% к контролю / % control	0,0	+22,3	+22,3	+6,3	-7,6	-
НСР ₀₅	$F_{\phi} < F_{\tau}$					
Количество корней первого порядка / number of primary roots						
шт. / <i>pcs</i>	10,9	12,0	13,7	13,9	10,6	12,2
% к контролю / % control	0,0	+10,1	+25,7	+27,5	-2,8	-
НСР ₀₅	$F_{\phi} < F_{\tau}$					
Длина корней / length of roots						
См / <i>cm</i>	13,9	19,3	14,1	15,1	14,2	15,3
% к контролю / % control	0,0	+38,8	+1,4	+8,6	+2,2	-
НСР ₀₅	3,8					
Товарный выход саженцев, % / commercial yield of seedlings, %						
1 сорт / <i>Grade 1</i>	46,7	80,0	66,7	73,3	40,0	61,3
2 сорт / <i>Grade 2</i>	53,3	20,0	33,3	26,7	60,0	38,7

показателя на 6,5-11,6% (71,9 и 75,3 см соответственно). Наибольшее значение отмечали в варианте с соломой (77,5 см), что выше контроля на 14,8%. В варианте со спанбондом белым наблюдалось незначительное снижение высоты саженцев на 0,6% (67,1 см).

Количество разветвлений надземной части в среднем по опыту составило 19,1 шт., в контрольном варианте – 16,9 шт. Все варианты опыта способствовали получению более разветвленных саженцев. Число надземных побегов увеличилось на 3,6-21,9% по сравнению с контролем.

В среднем по опыту диаметр штамба составил 8,6 мм. При применении мульчирующих и укрывных материалов этот показатель увеличился на 6,3-22,3%, и лишь в варианте со спанбондом белым наблюдали снижение на 7,6%. В контроле он составил 7,9 мм, в вариантах с соломой и опилками – по 9,7 мм.

Количество корней первого порядка в среднем по опыту составило 12,2 шт., в контрольном варианте – 10,9 шт. При применении укрывных и мульчирующих материалов произошло увеличение на 10,1-27,5%. Наибольшее значение зафиксировано в варианте с применением спанбонда черного (13,9 шт.). Спанбонд белый снизил этот показатель на 2,8%.

Длина корней в среднем по опыту составила 15,3 см, в зависимости от варианта увеличившись на 1,4-38,8% по сравнению с контрольным вариантом, где этот показатель составлял 13,9 см. Мульчирование соломой и опилками делянок способствовало повышению этого параметра до 19,3 и 14,1 см, укрытие спанбондом черным и спанбондом белым – повышению до 15,1 и 14,2 см соответственно.

Выход саженцев первого товарного сорта в среднем по опыту составил 61,3%. В контрольном варианте получено 46,7% саженцев высокого качества. Применение опилок и спанбонда

черного способствовало получению 66,7 и 73,3% первосортных саженцев. Наибольшее количество посадочного материала высокого качества зафиксировано в варианте с соломой (80,0%). В связи с тем, что при применении спанбонда белого биометрические показатели саженцев были ниже, получено всего 40,0% саженцев первого товарного сорта.

Применение соломы, опилок и спанбонда черного при доращивании саженцев облепихи сорта Жемчужница на участке с капельным орошением способствует получению большей доли высококачественных саженцев по сравнению с контрольным вариантом.

Выводы

Применение укрывных и мульчирующих материалов положительно отразилось на качественных показателях саженцев жимолости сорта Берель. Высота саженцев в зависимости от варианта опыта увеличилась на 2,9-26,6%, диаметр штамба – на 31,7%, количество корней первого порядка – на 16,0-62,7%, длина корней – на 2,6-35,9% по сравнению с контрольным вариантом. Наибольшее количество саженцев высокого качества получено в вариантах с опилками и спанбондом черным (73,3%).

Доращивание саженцев облепихи сорта Жемчужница с применением укрывных и мульчирующих материалов на участке с капельным орошением способствует повышению качества посадочного материала. Биометрические показатели повысились: на 6,5-14,8% (высота саженцев); на 3,6-21,9% (количество разветвлений надземной части); на 6,3-22,3% (диаметр штамба); на 10,1-27,5% (количество корней первого порядка); на 1,4-38,8% (длина корней). Наибольшее количество саженцев первого товарного сорта получено в вариантах с применением опилок (66,7%), спанбонда черного (73,3%) и соломы (80,0%).

Список использованных источников

1. Курапина Н.В. Влияние капельного орошения и удобрений на приживаемость и биометрические показатели саженцев черешни / Н.В. Курапина, О.А. Никольская О.А. // Плодоводство и ягодоводство России. 2018. Т. 55. С. 226-230.
2. Безух Е.П. Пути повышения эффективности и производства саженцев плодовых и ягодных культур с закрытой корневой системой // Плодоводство и ягодоводство России. 1999. Т. 6. С. 117-120. EDN: YWOSHR
3. Овчинников А.С. Применение ресурсосберегающих способов полива при возделывании сельскохозяйственных культур // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2007. № 1. С. 46-49.
4. Дубенок Н.Н. Особенности водного режима почвы при капельном орошении сельскохозяйственных культур

References

1. Kurapina N.V. The effect of drip irrigation and fertilizers on the survival rate and biometric parameters of cherry seedlings / N.V. Kurapina, O.A. Nikolskaya // Fruit and berry growing in Russia. 2018. Vol. 55. P. 226-230.
2. Bezukh E.P. Ways to increase the efficiency and production of seedlings of fruit and berry crops with a closed root system // Fruit and berry growing in Russia. 1999. Vol. 6. P. 117-120. EDN: YWOSHR
3. Ovchinnikov A.S. The use of resource-saving irrigation methods in the cultivation of agricultural crops // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa. 2007. No. 1. P. 46-49.
4. Dubenok N.N. Features of the soil water regime during drip irrigation of agricultural crops / N.N. Dubenok, V.V. Borodychev, M.N. Lytov, O.A. Belik // Achievements of science

/ Н.Н. Дубенок, В.В. Бородычев, М.Н. Лытов, О.А. Белик // Достижения науки и техники АПК. 2009. № 4. С. 22-24.

5. Дубенок Н.Н. Выращивание баклажан при капельном орошении с использованием тоннельных укрытий для получения ранней продукции / Н.Н. Дубенок, В.В. Бородычев, Е.В. Шенцева, Е.А. Стрижакова, К.Б. Шумакова // Достижения науки и техники АПК. 2012. № 9 С. 38-42. EDN: PCYGGQV

6. Дубенок Н.Н. Формирование корневой системы саженцев сливы при капельном орошении и распределение влаги по почвенному профилю в условиях Нечерноземной зоны / Н.Н. Дубенок, А.В. Гемонов // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. № 4. С. 9-13. EDN: UYXML0

7. Дубенок Н.Н. Технология возделывания раннего репчатого лука при капельном орошении: монография / Н.Н. Дубенок, В.В. Бородычев, М.П. Богданенко, В.В. Выборнов, К.Б. Шумакова. М.: Проспект, 2016. 176 с.

8. Шкура В.Н. Системы капельного орошения садов: научно-практическое издание / В.Н. Шкура, Р.С. Масный, А.С. Штанько. М.: Росинформагротех, 2023. 300 с.

9. Рыжова М.А. Как и когда мульчировать почву // Удачка. 2015. № 4. С. 36-38.

10. Рязанова Л.Г. Влияние мульчирующего материала на водный режим растений яблони в неблагоприятных погодных условиях южного региона / Л.Г. Рязанова, Н.А. Борисенко // Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год: Сборник трудов конференции, Краснодар, 05 февраля 2025 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2025. С. 487-489.

11. Дубина А.В. Продуктивность земляники садовой в зависимости от сорта и способов полива / А.В. Дубина, В.В. Скорина // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 2. С. 77-80.

12. Ожерельев В.Н. Мульчирование междурядий ягодных культур соломой / В.Н. Ожерельев // Современные тенденции развития аграрной науки+: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 01-02 декабря 2022 года / Брянский государственный аграрный университет. Том Часть 2. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2022. С. 190-194.

13. Попов В.Г. Влияние орошения и минерального питания на продуктивность деревьев яблони / В.Г. Попов, А.В. Панфилов, Е.Г. Панфилова, Р.В. Марискин // Аграрные конференции. 2022. № 2(32). С. 11-17.

14. Мишина М.Н. Мульчирование в интенсивном саду яблони / М.Н. Мишина, Т. Г.Г. Алиев, Р.А. Струкова // Наука и Образование. 2021. Т. 4, № 4. EDN: HDDHQR

15. Алиев, Т.Г.Г. Мульчирование – альтернатива химическому методу в садоводстве / Т. Г.Г. Алиев, Е.Г. Титова // Агротехнический метод защиты растений от вредных организмов: Материалы VIII международной научно-практической конференции, посвящается 95-летию Кубанского государственного аграрного университета, Краснодар, 19-23 июня 2017 года / Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017. С. 20-24. EDN: PDMHRV

16. Бодягин Я.М. Приемы борьбы с сорняками // Защита и карантин растений. 2003. № 6. С. 33-34.

17. Рязанова Л.Г. Влияние мульчирующего материала на водный режим растений яблони в неблагоприятных погодных условиях южного региона / Л.Г. Рязанова, Н.А. Борисенко // Сборник статей по материалам ежегодной

and technology of the agroindustrial complex. 2009. No. 4. P. 22-24.

5. Dubenok N.N. Eggplant cultivation with drip irrigation using tunnel shelters for early production / N.N. Dubenok, V.V. Borodychev, E.V. Shentseva, Strizhakova E.A., Shumakova K.B. // Achievements of science and technology of the agroindustrial complex. 2012.No. 9, P. 38-42. EDN: PCYGGQV

6. Dubenok N.N. Formation of the root system of plum seedlings during drip irrigation and distribution of moisture along the soil profile in the non-Chernozem zone / N.N. Dubenok, A.V. Gemonov // Land reclamation and water management. 2018. No. 4. P. 9-13. EDN: UYXML0

7. Dubenok N.N. Technology of cultivating early onions with drip irrigation: a monograph / N.N. Dubenok, V.V. Borodychev, M.P. Bogdanenko, V.V. Vybornov, K.B. Shumakova. Moscow: Prospekt, 2016. 176 p.

8. Shkura V.N. Drip irrigation systems of gardens: scientific and practical edition / V.N. Shkura, R.S. Masny, A.S. Shtanko. Moscow: Rosinformagrotech, 2023. 300 p.

9. Ryzhova M.A. How and when to mulch the soil // Udachka. 2015. No. 4. P. 36-38.

10. Ryazanova L.G. The influence of mulching material on the water regime of apple trees in adverse weather conditions in the southern region / L.G. Ryazanova, N.A. Borisenko // Collection of articles based on the materials of the annual scientific and practical conference of teachers on the results of research in 2024: Proceedings of the conference, Krasnodar, February 05, 2025. Krasnodar: I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, 2025. P. 487-489.

11. Dubina A.V. Productivity of garden strawberries depending on the variety and irrigation methods / A.V. Dubina, V.V. Skorina // Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy. 2025. No. 2. P. 77-80.

12. Kolerev V.N. Mulching berry crop aisles with straw / V.N. Kolerev // Modern trends in the development of agricultural science: Proceedings of the international Scientific and practical conference, Bryansk, December 01-02, 2022 / Bryansk State Agrarian University. Volume Part 2. Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2022. P. 190-194.

13. Popov V.G. The influence of irrigation and mineral nutrition on the productivity of apple trees / V.G. Popov, A.V. Panfilov, E.G. Panfilova, R.V. Mariskin // Agrarian conferences. 2022. No. 2(32). P. 11-17.

14. Mishina M.N. Mulching in an intensive apple orchard / M.N. Mishina, T. G.G. Aliyev, R.A. Strukova // Science and Education. 2021. Vol. 4, No. 4. EDN: HDDHQR

15. Aliev, T.G.G. Mulching as an alternative to the chemical method in horticulture / T. G.G. Aliev, E.G. Titova // Agrotechnical method of plant protection from harmful organisms: Proceedings of the VIII International scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of Kuban State Agrarian University, Krasnodar, June 19-23, 2017 / Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 2017. P. 20-24. EDN: PDMHRV

16. Bodyagin Ya.M. Methods of weed control // Protection and quarantine of plants. 2003. No. 6. P. 33-34.

17. Ryazanova L.G. The influence of mulching material on the water regime of apple trees in adverse weather conditions in the southern region / L.G. Ryazanova, N.A. Borisenko // Collection of articles based on the materials of the annual scientific and practical conference of teachers on the results of research in 2024: Proceedings of the conference, Krasnodar, February 05, 2025. Krasnodar: I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, 2025. P. 487-489. EDN: NJMRUT

научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год: Сборник трудов конференции, Краснодар, 05 февраля 2025 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2025. С. 487-489. EDN: NJMRUT

18. Программа и методика селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Орел: 1995. С. 483-494.

19. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (3-е изд., перераб. и доп.) / Б.А. Доспехов. М.: «Колос», 1973. 336 с.

Об авторах

Александр Викторович Шишкин, канд. с.-х. наук., доцент; ORCID: 0000-0003-2058-5627; SPIN-код: 2824-1939, Author ID: 501403; shishkin8@yandex.ru

Марина Анатольевна Рыжова, канд.с.-х. наук., ORCID: 0000-0003-4451-6589; SPIN-код 2172-3856 AuthorID: 1054435; ryzhova.marina.20@mail.ru

Дмитрий Михайлович Бенин, канд. с.-х. наук., доцент; ORCID: 0000-0003-1265-4071; SPIN-код 6243-0567; AuthorID708496; dbenin@rgau-msha.ru

Надежда Владимировна Гавриловская, канд. техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0001-5060-7837; SPIN-код 6622-7736; AuthorID576125; gavrilovskayanv@rgau-msha.ru

Ирина Валентиновна Гефке, канд.с.-х. наук., доцент; ORCID: 0000-0002-0804-015X; SPIN-код 6256-9640; AuthorID: 502492; ivgefke@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Шишкин А.В., Рыжова М.А., Бенин Д.М., Гавриловская Н.В., Гефке И.В. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 28.08.2025

Поступила после доработки и рецензирования / Received after peer review 06.11.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 06.11.2025

18. The program and methods of breeding fruit, berry and nut crops. Orel: 1995. P. 483-494.

19. Dospikhov B.A. Methodology of field experience (3rd ed., revised and add.) Moscow: Kolos, 1973. 336 p.

About the Authors

Alexander V. Shishkin, CSc (Agro), Associate Professor; ORCID: 0000-0003-2058-5627; SPIN code: 2824-1939, Author ID: 501403; shishkin8@yandex.ru

Marina A. Ryzhova, CSc (Tech), ORCID: 0000-0003-4451-6589; SPIN code 2172-3856 Authorid: 1054435; ryzhova.marina.20@mail.ru

Dmitri M. Benin, CSc (Agro), Associate Professor; ORCID: 0000-0003-1265-4071; SPIN code 6243-0567; AuthorID708496; dbenin@rgau-msha.ru

Nadezhda V. Gavrilovskaya, CSc (Tech), Associate Professor; ORCID: 0000-0001-5060-7837; SPIN code 6622-7736; AuthorID576125; gavrilovskayanv@rgau-msha.ru

Irina Valentinovna Gefke, Ph.D., Senior Researcher, Associate Professor; ORCID: 0000-0002-0804-015X SPIN code 6256-9640; AuthorID: 502492; ivgefke@mail.ru

Shishkin A.V., Ryzhova M.A., Benin D.M., Gavrilovskaya N.V., Gefke I.V. performed the research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have the copyright for the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-31-38>

УДК 631.674:634



К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛИВНОЙ НОРМЫ ПРИ КАПЕЛЬНОМ ОРОШЕНИИ САДОВ

А.С. Штанько^{1✉}, В.Н. Шкура²

^{1,2} Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации; 346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, 190, Россия

¹ shtanko.77@mail.ru; orcid.org/0000-0002-6699-5245

² vnshkura@yandex.ru; orcid.org/0000-0002-4639-6448

Аннотация. Целью исследований явилась разработка способа определения поливной нормы при капельном орошении древесных плодовых культур, обеспечивающей формирование зон увлажнения почвы с заданными геометрическими и влажностными параметрами. Экспериментальную основу предлагаемого способа составили материалы исследований контуров увлажнения почвы, выполненных на 12 опытных площадках в садах Ростовской области. Методологический подход к разработке предусматривал обобщение, систематизацию и последовательное использование авторских зависимостей и методик при решении задачи по определению значения поливной нормы. При расчете поливной нормы капельного орошения садов рекомендуется использовать такое понятие, как норма водоподачи, которое означает объем воды, подаваемый одной капельницей за один полив в почвенное пространство и обеспечивающий формирование в почвенной толще контура увлажнения с заданными геометрическими размерами и влажностными параметрами. Сформулирована концепция авторского подхода к определению поливной нормы капельного орошения садов, предусматривающая формирование в почвенном пространстве зон увлажнения с заданными геометрическими и влажностными параметрами с учетом: характеристик почвенного покрова; климатических условий; фенологических характеристик возделываемых культур; технологических параметров капельного полива и конструктивных решений поливной сети. В результате разработана методика определения поливной нормы капельного орошения промышленных садов, включающая в себя авторские зависимости для расчета: нормы водоподачи одной капельницей, геометрических параметров локального контура капельного увлажнения почвы, площади питания возделываемых культур, требуемых площади увлажнения каждого растения и количества капельниц для его полива.

Ключевые слова: капельное орошение, поливная норма, норма водоподачи, зона питания, контур увлажнения почвы, поливной модуль, капельница

Формат цитирования: Штанько А.С., Шкура В.Н. К вопросу определения поливной нормы при капельном орошении садов // Природообустройство. 2025. № 5. С. 31-38. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-31-38>

Original article

ON THE ISSUE OF DETERMINING THE IRRIGATION RATE FOR DRIP IRRIGATION OF GARDENS

A.S. Shtanko^{1✉}, V.N. Shkura²

^{1,2} Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, 346421, Rostov region, Novocherkassk, Baklanovsky Ave., 190, Russian Federation

¹ shtanko.77@mail.ru; orcid.org/0000-0002-6699-5245

² vnshkura@yandex.ru; orcid.org/0000-0002-4639-6448

Abstract. The purpose of the study is to develop a method for determining the water supply rate for drip irrigation of woody fruit crops, which ensures the formation of soil moisture zones with specified geometric and humidity parameters. The experimental basis of the proposed method was made up of materials from studies of humidification contours performed at 12 experimental sites in the gardens of the Rostov region. The methodological approach to the development provided for the generalization, systematization and consistent use of copyright dependencies and techniques in solving the problem of determining the value of the irrigation rate. When calculating the irrigation rate for drip irrigation of gardens, it is recommended to use the concept of the water supply rate, which refers to the volume of water supplied by one dropper per irrigation into the soil space and ensuring the formation of a humidification contour in the soil column

with specified geometric dimensions and humidity parameters. The concept of the author's approach to determining the irrigation rate of drip irrigation of gardens is formulated, which provides for the formation of humidification zones in the soil space with specified geometric and humidity parameters, taking into account: characteristics of the soil cover, climatic conditions, phenological characteristics of cultivated crops, technological parameters of drip irrigation and constructive solutions of the irrigation network. As a result, a methodology has been developed for determining the irrigation rate of drip irrigation of industrial gardens, including the author's dependencies for calculating: the rate of water supply by one drip, the geometric parameters of the local contour of drip moistening of the soil, the area of nutrition of cultivated crops, the required area of humidification of each plant and the number of drippers for watering it.

Keywords: drip irrigation, irrigation rate, water supply rate, feeding zone, soil moisture contour, irrigation module, dripper

Citation format: Shtanko A.S., Shkura V.N. On the issue of determining the irrigation rate in drip irrigation of gardens // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 31-38. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-31-38>

Введение. Одним из параметров, характеризующих режим орошения сельскохозяйственных культур, является поливная норма. Несмотря на продолжительную историю и широкое применение термина «поливная норма», в справочных и нормативных изданиях, а также в научных публикациях он определяется по-разному. Примером этого являются приведенные ниже в разной степени полные и точные толкования данного термина.

1. По А.Н. Костякову [1]: «Поливная норма m есть количество воды, даваемое в почву, занятую данной культурой, на 1 га за один полив».

2. По Б.Б. Шумакову [2]: «Поливная норма – объем воды, подаваемой на 1 га орошаемой площади за один полив».

3. По Мелиоративной энциклопедии [3]: «Норма поливная – количество воды, подаваемое на 1 га орошаемой площади за один полив. Ее измеряют в $\text{м}^3/\text{га}$ и мм слоя воды».

4. По Г.В. Ольгаренко [4]: «Поливная норма (разовая норма полива) представляет собой количество воды, подаваемое на гектар орошаемой площади в $\text{м}^3/\text{га}$ (или мм слоя воды)».

5. По ГОСТ 26967-86¹: поливная норма – «Объем воды, подаваемый на единицу площади нетто поливного участка за один полив».

6. По ГОСТ Р 58331.3-2019²: поливная норма – «Количество воды, подаваемое на один гектар посева орошаемой культуры за один полив, зависящее от глубины корнеобитаемого слоя почвы, подлежащего увлажнению, особенностей культуры и фазы ее развития, гранулометрического состава и водно-физических свойств почвы, вида, способа и технологии полива».

¹ ГОСТ 26967-86. Гидромелиорация. Термины и определения.

² ГОСТ Р 58331.3-2019. Системы и сооружения мелиоративные. Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур. Общие требования.

Учет достоинств и недостатков вышеприведенных и других известных толкований позволяет предложить авторское определение рассматриваемого термина: «Поливная норма (норма полива) – количество воды (объем в м^3 , л, или слой в мм), подаваемое на единицу орошаемой площади нетто (га , м^2) сельскохозяйственного угодья за один полив ($N_{\text{пол}}$, $\text{м}^3/\text{га}$, $\text{л}/\text{м}^2$, мм).

Отметим, что в ряде публикаций в качестве измерителя и при ином толковании рассматриваемого термина используются такие параметры, как $\text{м}^3/\text{растение}$, $\text{м}^3/\text{куст}$, $\text{м}^3/\text{дерево}$ ($\text{м}^3/\text{раст.}$, $\text{м}^3/\text{куст}$, $\text{м}^3/\text{дер.}$), а применительно к способу и технологии капельного орошения – $\text{м}^3/\text{капельница}$ ($\text{м}^3/\text{кап.}$) или $\text{м}^3/\text{контур}$ ($\text{м}^3/\text{кон.}$) [5, 6].

Указанные варианты измерителей имеют реальное основание и определенную целесообразность применения, особенно в терминологическом аппарате, используемом при капельном орошении, но не соответствуют общепринятому толкованию термина «поливная норма».

Во избежание взаимного недопонимания и возможных недоразумений, а также с учетом целесообразности применения при расчетах норм капельного полива измерителя в виде $\text{л}/\text{капельница}$ предложено использовать термин «норма водоподачи», под которым понимается объем воды (поливного раствора), подаваемый одной капельницей за один полив в почвенное пространство и обеспечивающий формирование в почвенной толще контура увлажнения с заданными геометрическими размерами и влажностными параметрами.

Введение предложенного термина вызвано необходимостью решения задачи и разработки способа определения поливной нормы капельного полива, существенно отличающегося от применяемых для технологий «сплошного» орошения (поверхностного и дождевания) способов расчета поливной нормы. Локальность увлажнения почвенного пространства при капельном

орошении качественно отличает данную технологию полива от вышеуказанных технологий «сплошного» полива сельскохозяйственных культур. Указанное обстоятельство предопределило необходимость и целесообразность разработки новых подходов к определению поливной нормы, соответствующих особенностям технологии капельного орошения.

Разработке зависимостей, методик и способов расчета поливных норм для условий капельного орошения растений посвящены работы А.Д. Ахмедова, В.С. Бочарникова, М.К. Гаджиева, Е.Ю. Галиуллиной, А.И. Голованова, Е.В. Кузнецова, М.Н. Лытова, Е.В. Мелиховой, М.П. Мещерякова, Г.В. Ольгаренко, А.Н. Пронько, В.И. Торбовского, Ю.С. Уржумовой, Е.А. Ходякова, М.Ю. Храброва, О.Е. Ясониди и других специалистов.

В основу предложенных зависимостей для определения капельной поливной нормы положена классическая формула А.Н. Костякова, разработанная для технологий «сплошного» орошения сельскохозяйственных культур:

$$N_{\text{пол}} = 100 \cdot \gamma_{\text{об}} \cdot h_{\text{увл}} \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}), \text{ м}^3/\text{га}, \quad (1)$$

где 100 – корректирующий параметр, обеспечивающий соблюдение размерности и количественного значения поливной нормы в зависимости; $N_{\text{пол}}$ – поливная норма, $\text{м}^3/\text{га}$; $\gamma_{\text{об}}$ – средняя по увлажняемому почвенному слою плотность почвы, $\text{т}/\text{м}^3$; $h_{\text{увл}}$ – расчетная глубина увлажнения почвенной толщи, м; $\beta_{\text{п/п}}$ и $\beta_{\text{д/п}}$ – средняя по глубине увлажняемого слоя послеполивная и дополивная влажность почвы, % МСП.

В первой группе предложений (О.Е. Ясониди [7], используемых Ю.С. Уржумовой, Л.Г. Дудниковой, В.И. Торбовским, Г.А. Сенчуковым, М.К. Гаджиевым и др.) отличие в структуре увлажняемого почвенного пространства при сплошном (дождевание) и локальном (капельном) увлажнении предлагалось учитывать введением в формулу (1) корректирующего параметра $\Pi_{\omega} = \omega_{\text{увл}} / \omega_{\text{пит}}$ и приведением ее к виду:

$$N_{\text{пол}} = 100 \cdot \Pi_{\omega} \cdot \gamma_{\text{об}} \cdot h_{\text{увл}} \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}), \text{ м}^3/\text{га}, \quad (2)$$

где $\omega_{\text{увл}}$ – площадь капельно-увлажняемого почвенного пространства, м^2 ; $\omega_{\text{пит}}$ – площадь питания культивируемого растения, м^2 .

Условность принимаемых в зависимости от климатических и фенологических условий значений Π_{ω} в пределах от 0,1 до 0,8 и экспериментальная неподтвержденность значений $\omega_{\text{увл}}$ приводили к значительным погрешностям в определении поливной нормы при капельном поливе [8].

Вторая группа предложений по расчету поливной нормы капельного полива разработана исходя из условия формирования вдоль ряда

растений сплошной полосы увлажнения и использования зависимости [4, 9, 10]:

$$N_{\text{пол}} = 100 \cdot \gamma_{\text{об}} \cdot h_{\text{увл}} \cdot \frac{n_{\text{кап}} \cdot \omega_{\text{кап}}}{L_{\text{м/р}} \cdot B_{\text{м/р}}} \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}), \text{ м}^3/\text{га}, \quad (3)$$

где $n_{\text{кап}}$ – количество капельниц, орошающих одно растение, шт.; $\omega_{\text{кап}}$ – площадь почвенного пространства, увлажняемого одной капельницей, или площадь одного локального контура увлажнения почвы, м^2 ; $B_{\text{м/р}}$ и $L_{\text{м/р}}$ – расстояния между рядами растений и между соседствующими растениями в ряду, принимаемые в соответствии со схемой посадки, м.

Опыт применения данного способа в процессе культивирования растений показал необходимость использования опытно устанавливаемого корректирующего коэффициента, уточняющего значения расчетной поливной нормы.

Известны предложения А.И. Голованова, Е.В. Кузнецова, М.Ю. Храброва, В.К. Гудина и Н.Г. Колесовой, А.Д. Ахмедова и Е.Ю. Галиуллиной [5, 11, 12], базирующиеся на учете при определении поливной нормы объемов капельно-увлажняемого почвенного пространства (локального контура увлажнения) в пределах зон питания (распространения корневой системы) растения с использованием нижеприведенной обобщающей зависимости:

$$N_{\text{пол}} = 100 \cdot W_{\text{кон}} \cdot n_{\text{кап}} \cdot \gamma_{\text{об}} \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}) \cdot n_{\text{рас}}, \text{ м}^3/\text{га}, \quad (4)$$

где $W_{\text{кон}}$ – объем локального контура капельного увлажнения, формирующегося в почве при поливе одной капельницей, м^3 ; $n_{\text{кап}}$ – количество капельниц, орошающих одно растение, шт.; $n_{\text{рас}}$ – количество растений, культивируемых на 1 га насаждения, шт.

Разработка предложений по определению поливной нормы капельного полива продолжается до настоящего времени [13-17]. Одна из попыток экспериментально обоснованного решения поставленной задачи реализована авторами настоящих исследований, целью которых являлась разработка способа определения поливной нормы при капельном орошении древесных плодовых культур, обеспечивающей формирование зон увлажнения почвы с заданными геометрическими и влажностными параметрами.

Цель исследований: разработка способа определения поливной нормы при капельном орошении древесных плодовых культур, обеспечивающей формирование зон увлажнения почвы с заданными геометрическими и влажностными параметрами.

Материалы и методы исследований. Экспериментальную основу предлагаемого способа составили материалы исследований контуров увлажнения, выполненных на 12 опытных площадках в садах Ростовской

области, представленных более чем в 60 публикациях и, в частности, в работах [18-20]. Опытные данные получены для широкого спектра почвенных условий капельного полива черноземных, темно- и светло-каштановых почв, характеризуемых: содержанием физической глины $W_r = (14,0 - 72,0) \% \text{ МСП}$; наименьшей влагемкостью $W_{\text{НВ}} = (12,0 - 31,0) \% \text{ МСП}$; плотностью сложения $\gamma_{\text{об}} = (1,10 - 1,30) \text{ т / м}^3$. Фенологические условия древесно-плодовых насаждений характеризуются различными схемами посадки яблоневых культур $B_{\text{м/р}} \times L_{\text{м/р}}$ от $3,0 \times 1,0$ м до $5,0 \times 3,0$ м при высоте растений H_p от 2,0 до 4,0 м и диаметре кроны $D_{\text{кр}}$ от 1,0 м до 2,8 м. Технологические условия капельного полива характеризуются: значениями допозливной влажности почвы $\beta_{\text{д/п}} = (0,58 - 0,75) \beta_{\text{НВ}}$, где $\beta_{\text{НВ}}$ – влажность почвы, соответствующая наименьшей влагемкости; средним уровнем постполивной влажности в контуре $\beta_{\text{п/п}} = (0,85 - 0,95) \beta_{\text{НВ}}$; глубиной увлажнения W_r и расходом капельниц $W_{\text{НВ}}$.

Эмпирическую основу разработки составили многофакторные модели и базирующиеся на их использовании методики по определению геометрических параметров контуров увлажнения, необходимого количества капельниц, обеспечивающих требуемую площадь увлажнения зоны питания культур для различных климатических условий садов, характеризуемых значениями коэффициента природного увлажнения территории: $\gamma_{\text{об}} = 0,32-0,60$ [18-20].

Методологический подход к разработке предусматривает обобщение, систематизацию и последовательное использование авторских зависимостей и методик расчета при решении задачи по определению значения поливной нормы, обеспечивающей соответствующее условиям промышленного сада капельное орошение древесно-плодовых культур.

Результаты и их обсуждение. Из всего многообразия известных предложений по расчету поливной нормы капельного орошения для различных почвенных, климатических, фенологических и технологических условий полива наиболее обоснованным является подход, базирующийся на учете геометрических и влажностных параметров локальных контуров увлажнения, формирующихся в почвенной толще в процессе капельного полива. Данный подход реализован в авторском способе определения поливной нормы [18-20]. Предлагаемый способ предусматривает использование при расчете поливной нормы капельного полива: зависимостей по определению нормы водоподдачи одной капельницей, обеспечивающей формирование

в почвенном пространстве контура увлажнения с заданными глубиной и влажностью; зависимостей по определению пространственно-влажностных параметров контуров увлажнения, учитывающих характеристики почвенного покрова и технологические параметры капельного полива; объема зон капельно-увлажняемой почвенной толщи; количества капельниц (локальных контуров), обеспечивающих влагопотребность растения и количество растений на 1 га насаждения (или количество капельниц на 1 га орошаемой площади нетто).

В соответствии с рабочей гипотезой предлагаемый способ определения поливной нормы при капельном поливе предусматривает последовательную реализацию нижеследующих позиций.

1. Сбор исходных данных и условий проведения капельного полива.

2. Определение нормы водоподдачи одной капельницей, обеспечивающей в заданных условиях формирование контура увлажнения требуемой глубины и влажности.

3. Установление количества капельниц, необходимых для полива одного растения и обеспечивающих необходимую растению площадь увлажнения почвенного пространства.

4. Расчет поливной нормы капельного орошения 1 га древесно-плодового сада.

Сбор исходных данных, перечисленных в разделе «Материалы и методы исследований», осуществляется в процессе комплексных изысканий, проводимых в действующем саду при его обустройстве системой капельного орошения или в процессе проектирования закладываемого промышленного сада.

Формула для расчета объема контура увлажнения почвы предложена для универсальной формы контура, описываемой эмпирической математической моделью, учитывающей почвенные и технологические условия капельного полива. Обстоятельная информация по вопросам формирования контуров увлажнения почвы в различных почвенных и технологических условиях капельного полива представлена в монографии [21].

Норма водоподдачи на одну капельницу определяется по зависимости:

$$(N_{\text{в/п}})_{\text{кап}} = k_{\text{пот}} / 100 \cdot \gamma_{\text{об}} \cdot W_{\text{кон}} \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}), \text{ м}^3 / \text{кап.}, \quad (5)$$

где $k_{\text{пот}} = 1,02-1,05$ – коэффициент, учитывающий потери воды при поливе;

$$W_{\text{кон}} = 0,102 \cdot h_{\text{увл}}^3 \cdot (0,670 + 0,0095 \cdot W_r + 0,0345 \cdot W_{\text{НВ}})^2 \times \left(\frac{q_{\text{кап}}}{2,0} \right)^{0,2 W_r / W_{\text{НВ}}} \cdot \left(\frac{W_r}{W_{\text{НВ}}} \right)^{0,8} \cdot \left(1,0 - \frac{\beta_{\text{д/п}}}{\beta_{\text{п/п}}} \right)^{0,22 W_r / W_{\text{НВ}}}, \text{ м}^3. \quad (6)$$

Необходимое количество капельниц для полива одного растения устанавливается в соответствии с методикой, представленной на рисунке.

Требуемое количество капельниц на одно растение обеспечивается устройством одно-, двух- или трехниточных поливных модулей с шагом размещения капельных мироводовыпусков на капельной трубке, соответствующим схеме посадки и размерам контуров увлажнения почвы [20].

Поливная норма для капельного орошения 1 га древесно-плодового сада определится по зависимости:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = k_{\text{пот}} \cdot (N_{\text{в/п}})_{\text{кап}} \cdot (n_{\text{кап}})_{\text{тр}} \cdot n_{\text{рас/га}}, \text{ м}^3/\text{га}, \quad (7)$$

где $n_{\text{рас/га}}$ – количество растений на 1 га древесно-плодового сада.

Предложенный способ расчета поливной нормы апробирован при проектировании системы

капельного орошения на участке существующего плодоносящего яблоневого сада в СПК «Прогресс» Неклиновского района Ростовской области. Исходные данные и условия территории сада характеризуются следующими показателями: $k_{\text{увл}} = 0,52$; $W_{\text{г}} = 48,9\%$ МСП; $W_{\text{НВ}} = 24,8\%$ МСП; $\gamma_{\text{об}} = 1,27 \text{ т/м}^3$; $h_{\text{увл}} = h_{\text{кон}} = 0,9 \text{ м}$; $\beta_{\text{л/п}} = 17,36\%$ МСП; $\beta_{\text{п/п}} = 22,32\%$ МСП; $B_{\text{м/р}} = 4,0 \text{ м}$; $L_{\text{м/р}} = 2,0 \text{ м}$; $H_{\text{р}} = 4,0 \text{ м}$; $D_{\text{кр}} = 2,0 \text{ м}$; $q_{\text{кап}} = 2,0 \text{ л/ч}$; $\beta_{\text{НВ}} = 24,8\%$ МСП; $n_{\text{рас/га}} = 1250 \text{ шт.}$

Для указанных характеристик капельного полива и в соответствии с зависимостью (6) объем формирующегося в почвенном пространстве локального контура увлажнения составит:

$$W_{\text{кон}} = 0,102 \cdot 0,9^3 \cdot (0,670 + 0,0095 \cdot 48,9 + 0,0345 \cdot 24,8)^2 \times \left(\frac{2,0}{2,0}\right)^{0,248,9/24,8} \cdot \left(\frac{48,9}{24,8}\right)^{0,8} \cdot \left(1,0 - \frac{17,36}{24,8}\right)^{0,2248,9/24,8} = 0,301 \text{ м}^3.$$

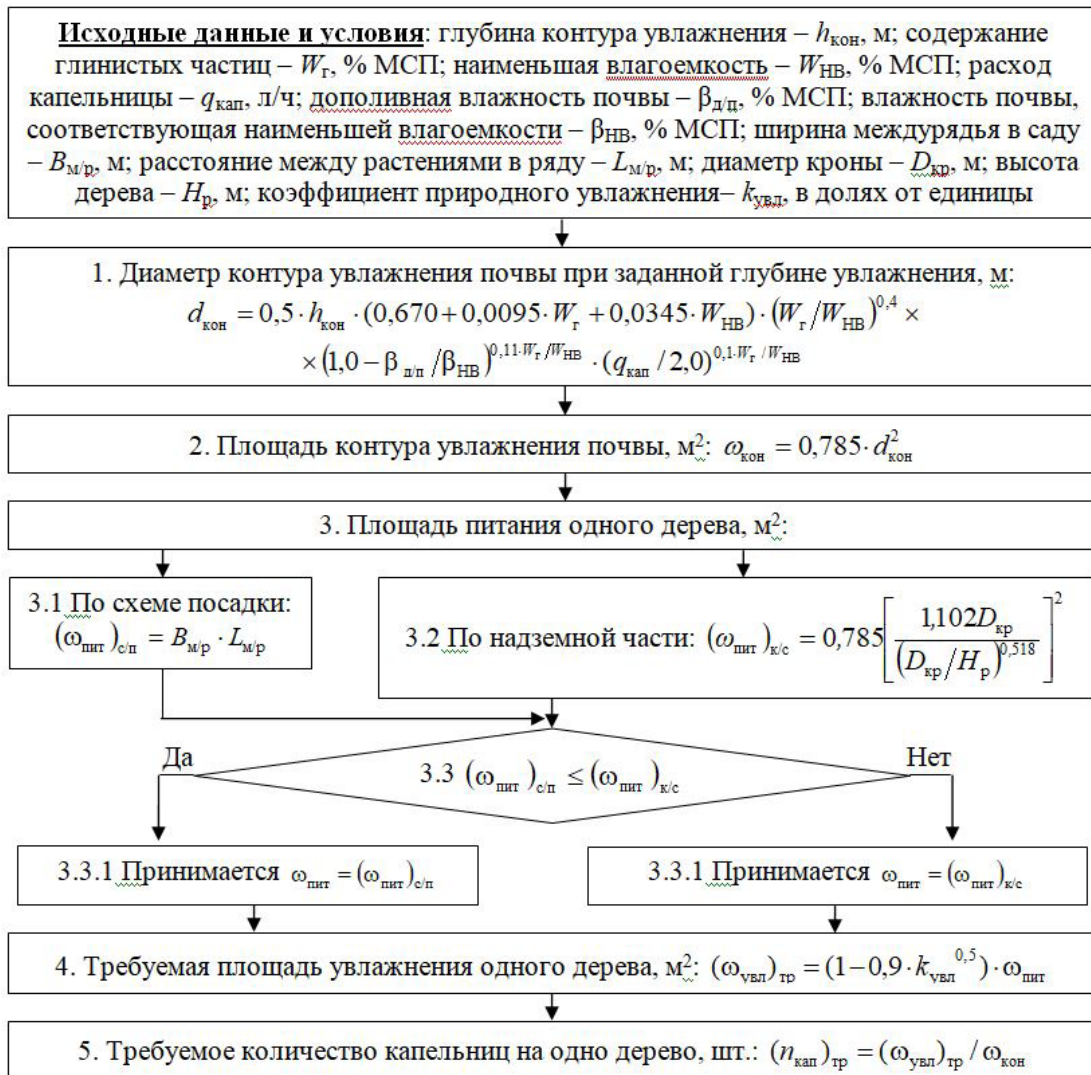


Рис. Блок-схема методики определения необходимого количества капельниц для орошения одного древесно-плодового растения

Fig. Flowchart of the methodology for determining the required amount of drippers for irrigation of one woody-fruit plan

В соответствии с (5) норма водоподачи на одну капельницу составит:

$$(N_{в/п})_{кап} = 1,02/100 \cdot 1,27 \cdot 0,301 \cdot (22,32 - 17,36) = 0,0193 \text{ м}^3/\text{кап.}$$

Расчетами, выполненными в соответствии с блок-схемой по рисунку, установлены нижеприведенные параметры орошаемого садового насаждения:

$$d_{кон} = 0,5 \cdot 0,9 \times (0,670 + 0,0095 \cdot 48,9 + 0,0345 \cdot 24,8) \times 1 \times \left(\frac{48,9}{24,8}\right)^{0,4} \cdot \left(1,0 - \frac{17,36}{24,8}\right)^{0,11 \cdot 48,9/24,8} \times \left(\frac{2,0}{2,0}\right)^{0,1 \cdot 48,9/24,8} = 0,905 \text{ м.}$$

$$2. \omega_{кон} = 0,785 \cdot 0,905^2 = 0,643 \text{ м}^2.$$

3. Площадь питания одного дерева:

$$3.1. (\omega_{пит})_{с/п} = 4,0 \cdot 2,0 = 8,0 \text{ м}^2.$$

$$3.2. (\omega_{пит})_{к/с} = 0,785 \cdot \left(\frac{1,102 \cdot 2,0}{(2,0/4,0)^{0,518}}\right)^2 = 7,82 \text{ м}^2.$$

$$3.3. \text{Принято } \omega_{пит} = 7,82 \text{ м}^2.$$

$$4. (\omega_{увл})_{тр} = (1 - 0,9 \cdot 0,52^{0,5}) \cdot 7,82 = 2,74 \text{ м}^2.$$

$$5. (n_{кап})_{тр} = 2,74/0,643 = 4,26 \text{ шт.}$$

Требуемое количество капельниц для полива одного дерева $(n_{кап})_{тр}$ обеспечивается устройством двухниточного поливного модуля с шагом размещения капельных водовыпусков на поливной трубке: $l_{м/к} = 0,9 \text{ м.}$

С учетом полученных результатов и в соответствии с (7) поливная норма на 1 га орошаемой площади нетто древесно-плодового сада составит:

$$(N_{пол})_{кап} = 1,03 \cdot 0,0193 \cdot 4,26 \cdot 1250 = 105,9 \text{ м}^3/\text{га.}$$

Выводы

1. При расчете поливной нормы капельного орошения садов необходимо использовать понятие «норма водоподачи на одну капельницу», под которым понимается объем воды, подаваемый одной капельницей за один полив в почвенное пространство зоны питания возделываемых культур и обеспечивающий формирование в почвенной толще контура увлажнения с заданными

геометрическими размерами (глубина, максимальный диаметр, площадь и объем контура увлажнения) и влажностными параметрами (дополнительная влажность почвы, послеполивная влажность почвы и ее средневзвешенное значение в контуре), которые являются исходными данными или определяются в процессе расчета.

2. Сформулирована концепция авторского подхода к определению поливной нормы капельного орошения древесных плодовых садов, предусматривающая формирование в почвенном пространстве зон увлажнения с заданными глубиной и влажностью с учетом: характеристик почвенного покрова (содержания физической глины, наименьшей влагоемкости и плотности сложения увлажняемого почвенного слоя); климатических условий, характеризующих коэффициентом природного увлажнения территории; фенологических характеристик возделываемых культур (высоты растения и диаметра его кроны, схемы посадки растений); технологических параметров капельного полива (уровней доливной и послеполивной влажности почвы, расхода капельницы, требуемой глубины увлажнения почвы); конструктивных решений поливной сети (количеством капельниц, обеспечивающих полив одного растения, площадь зоны увлажнения). Все перечисленные факторы влияния являются исходными данными либо определяются в процессе расчета по предлагаемой методике.

3. Разработана методика определения поливной нормы капельного орошения древесно-плодовых садов, включающая в себя авторские зависимости для расчета: нормы водоподачи одной капельницей; геометрических параметров локального контура капельного увлажнения почвы; площади питания возделываемых культур; требуемых площади увлажнения каждого растения и количества капельниц для его полива. Апробация предложенной методики в условиях существующего плодоносящего яблоневого сада в СПК «Прогресс» Неклиновского района Ростовской области показала ее практическую применимость.

Список использованных источников

1. Костяков А.Н. Основы мелиораций. 6-е изд., доп. и перераб. М.: Сельхозгиз, 1960. 622 с.
2. Мелиорация и водное хозяйство. Справочник. Орошение. под. ред. Б.Б. Шумакова. М.: Колос, 1999. 432 с.
3. Мелиоративная энциклопедия. Т. 2 (К–П). М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2004. 444 с.
4. Ресурсосберегающие энергоэффективные экологические безопасные технологии и технические средства орошения: справочник / Г.В. Ольгаренко и др.; [под. общ.

References

1. Kostyakov A.N. Fundamentals of land reclamation. 6th ed., add. and reprint M.: Selkhozgiz, 1960. 622 p.
2. Land reclamation and water management. Guide. Irrigation. edited by B.B. Shumakov. Moscow: Kolos, 1999. 432 p.
3. Meliorative encyclopedia. Vol. 2 (K–P). Moscow: FGNU "Rosinformagrotech", 2004. 444 p.
4. Resource-saving energy-efficient ecological safe technologies and technical means of irrigation: a handbook / G.V. Olgarenko et al.; [under the general editorship

- ред. Г.В. Ольгаренко]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. 263 с.
5. Голованов А.И. Основы капельного орошения / А.И. Голованов, Е.В. Кузнецов. Краснодар: КГАУ, 1996. 96 с.
 6. Олейник А.М. Характер формирования контуров увлажнения почвы при капельном орошении / А.М. Олейник, М.К. Гаджиев // Режимы орошения и водопотребление сельскохозяйственных культур на Северном Кавказе: сб. науч. тр. / Новочеркасск: ЮжНИИГиМ., 1984. С. 129-133.
 7. Ясониди О.Е. Капельное орошение на Северном Кавказе. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 1987. 80 с.
 8. Мелихова Е.В. Моделирование и обоснование ресурсосберегающих параметров капельного орошения при возделывании корнеплодов: Монография. Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2017. 112 с. EDN: ZHVNIIP
 9. Капельное орошение: пособие к СНиП 2.06.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения»: утв. Приказом Союзводпроект от 11 апреля 1986 г. № 113 // ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интернет [Электронный ресурс]. – Кодекс Юг, 2024.
 10. Патент 2204241 Российская Федерация, МПК A01G 25/02. Способ определения поливных норм при капельном орошении томатов / Кружилин И.П., Салдаев А.М., Кружилин Ю.И., Ходяков Е.А., Галда А.В.; заявитель и патентообладатель государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия». № 001128337/13; завл. 18.10.2001; опубл. 20.05.2003, Бюл. № 14. 5 с.
 11. Храбров М.Ю. Определение технологических параметров систем капельного орошения / М.Ю. Храбров, В.К. Губин, Н.Г. Колесова // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 1(61). С. 132-136. EDN: VRCUDB
 12. Ахмедов А.Д. Контурные увлажнения почвы при капельном орошении / А.Д. Ахмедов, Е.Ю. Галиуллина // Известия Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высш. проф. образование. 2012. № 3. С. 183-188. EDN: PCXLGR
 13. Козыкеева А.Т. Система капельного орошения для предгорных зон с небольшим поверхностным перепадом воды / А.Т. Козыкеева, А.О. Жатканбаева // Мелиорация и водное хозяйство. 2016. № 1. С. 37-39. EDN: WHAWVR
 14. Рогачев А.Ф. Компьютерное моделирование и параметризация в среде MathCAD контуров увлажнения при капельном орошении / А.Ф. Рогачев, Е.В. Мелихова // Известия НВ АУК. 2021. 4(64). 367-378. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-37. EDN: VBOPAO
 15. Пронько Н.А. Расчет поливных норм при капельном орошении в условиях сухостепного Заволжья / Н.А. Пронько [и др.] // Основы рационального природопользования: материалы VI Национальной конференции с международным участием. Саратов, 2020. С 55-59.
 16. Dubenok N.N., Gemonov A.V., Lebedev A.V. Moisture consumption by plum seedlings under drip irrigation in the Central Nonchernozem zone of Russia // RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. 2020. Vol. 15. No 2. P. 191-199. DOI: 10.22363/2312-797X-2020-15-2-191-199.
 17. Дубенок Н.Н. Водопотребление малины при капельном орошении в условиях центрального нечерноземья / Н.Н. Дубенок, А.В. Гемонов, А.В. Лебедев // Природобустройство. 2023. № 2. С. 6-14. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-2-6-14>
 18. Патент 2802955 Российская Федерация МПК⁰⁶ A01G 25/00, СПК²³ A01G 25/00. Способ определения поливной нормы при капельном орошении сельскохозяйственных культур / Масный Р.С., Шкура В.Н., Штанько А.С.; of G.V. Olgarenko]. Moscow: FSBI "Rosinformagrotech", 2015. 263 p.
 5. Golovanov A.I. Fundamentals of drip irrigation / A.I. Golovanov, E.V. Kuznetsov. Krasnodar: KGAU, 1996. 96 p.
 6. Oleinik A.M., Gadzhiev M.K. The nature of the formation of soil moisture contours during drip irrigation / A.M. Oleinik, Gadzhiev M.K. // Irrigation regimes and water consumption of crops in the North Caucasus: collection of scientific works / Novocherkassk: YuzhNIIGiMgim, 1984. P. 129-133.
 7. Yasonidi O.E. Drip irrigation in the North Caucasus. Rostov n/D.: Publishing House of the University of Rostov, 1987. 80 p.
 8. Melikhova E.V. Modeling and substantiation of resource-saving parameters of irrigation in the cultivation of root crops: Monograph. Volgograd: Volgograd State Agrarian University, 2017. 112 p. EDN: ZHVNIIP
 9. Drip irrigation: a manual for SNiP 2.06.03-85 "Reclamation systems and equipment": approved by By Order of Soyuzvodproekt, No. 113 dated April 11, 1986 // IS "Techexpert: 6th generation" Internet [Electronic resource]. – Codex South, 2024.
 10. Patent 2204241 Russian Federation, IPC A01G 25/02. A method for determining irrigation standards for drip irrigation of tomatoes / Kruzhilin I.P., Saldaev A.M., Kruzhilin Yu.I., Khodiakov E.A., Galda A.V.; applicant and patent holder state Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture". No. 001128337/13; published on 18.10.2001; published on 20.05.2003, Byul. No. 14. 5 p.
 11. Khrabrov M.Yu. Determination of technological parameters of drip irrigation systems / M.Yu. Khrabrov V.K. Gubin, N.G. Kolesova // Ways to increase the efficiency of irrigated agriculture. 2016. No. 1(61). P. 132-136. EDN: VRCUDB
 12. Akhmedov A.D. Contours of soil moisture during drip irrigation / A.D. Akhmedov E.Y. Galiullina // Izvestia Nizhnevolszhsy. agrounive. Complex: science and higher Prof. education. 2012. No. 3. P. 183-188. EDN: PCXLGR
 13. Kozykееva A.T. Drip irrigation system for foothill areas with a small surface water drop / A.T. Kozykееva, A.O. Zhatkanbayeva // Land reclamation and water management. 2016. No. 1. P. 37-39. EDN: WHAWVR
 14. Rogachev A.F. Computer modeling and parameterization in the MathCAD environment of humidification contours during drip irrigation / A.F. Rogachev, E.V. Melikhova // Izvestia NV AUK. 2021. 4(64). 367-378. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-37. EDN: VBOPAO
 15. Calculation of irrigation norms for drip irrigation in the conditions of the dry-steppe Zavolzhye / N.A. Pronko [et al.] // Fundamentals of rational nature management: proceedings of the VI National Conference with international participation. Saratov, 2020. P. 55-59.
 16. Dubenok N.N., Gemonov A.V., Lebedev A.V. Moisture consumption by plum seedlings under drip irrigation in the Central Nonchernozem zone of Russia // RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. 2020. Vol. 15. No 2. P. 191-199. DOI: 10.22363/2312-797X-2020-15-2-191-199.
 17. Dubenok N.N. Raspberry water consumption during drip irrigation in central non-Chernozem region / N.N. Dubenok, A.V. Gemonov, A.V. Lebedev // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 2. P. 6-14. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-2-6-14>
 18. Patent 2802955 Russian Federation IPK06 A01G 25/00, SPK23 A01G 25/00. A method for determining the irrigation rate for drip irrigation of agricultural crops

заявитель и патентообладатель Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. № 2023107704; заявл. 30.03.2023; опубл. 05.09.2023, Бюл. № 25.

19. Штанько А.С. Определение поливной нормы для формирования первичного локального контура капельно-увлажненной почвы / А.С. Штанько, В.Н. Шкура // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 1. С. 19-38. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-19-38>. EDN: ZXMTKO

20. Штанько А.С., Шкура В.Н. Расчет поливной нормы при капельном орошении древесно-плодовых культур в садовых насаждениях // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 1. С. 1-18. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-1-1-18>. EDN: SGFBXC

21. Системы капельного орошения садов: науч.-практ. изд. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 300 с. ISBN 978-5-7367-1777-4.

/ Masny R.S., Shkura V.N., Shtanko A.S.; applicant and patent holder of the Russian Scientific Research. institute of Land Reclamation problems. No. 2023107704; application no. 30.03.2023; published 05.09.2023, Byul. no. 25.

19. Shtanko A.S. Determination of the irrigation rate for the formation of the primary local contour of drip-moistened soil / A.S. Shtanko, V.N. Shkura // Land reclamation and hydraulic engineering. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 19-38. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-19-38>. EDN: ZXMTKO

20. Shtanko A.S., Shkura V.N. Calculation of the irrigation rate for drip irrigation of fruit and tree crops in garden plantings // Melioration and hydraulic engineering. 2024. Vol. 14, No. 1. P. 1-18. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-1-1-18> EDN: SGFBXC

21. Drip irrigation systems for gardens: scientific and practical publishing house, Moscow: Rosinform-grotech, 2023. 300 p. ISBN 978-5-7367-1777-4.

Об авторах

Андрей Сергеевич Штанько, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; ID РИНЦ 619732; <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>; shtanko.77@mail.ru

Виктор Николаевич Шкура, канд. техн. наук, профессор, вед. науч. сотр.; ID РИНЦ 734199; <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>; vnshkura@yandex.ru

About the authors

Andrey S. Stanko, CSc (Eng), leading researcher; ID РИНЦ 619732; <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>; shtanko.77@mail.ru

Viktor N. Shkura, CSc (Eng), professor, leading researcher; ID РИНЦ 734199; <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>; vnshkura@yandex.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Штанько А.С., Шкура В.Н. выполнили теоретические и практические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Штанько А.С., Шкура В.Н. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

Статья поступила в редакцию / The article was received at the editorial office on 19.02.2025

Одобрена после рецензирования / Accepted for publication on 13.10.2025

Принята к публикации после доработки / Approved after review on 13.10.2025

Shtanko A.S., Shkura V.N. performed theoretical and practical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript. Shtanko A.S., Shkura V.N. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-39-46>

УДК 631.67:631.674.6



ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОРОШАЕМОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БУРУНДИ

И. Ичитегетсе^{1✉}, С.А. Максимов²

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

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

^{1.1} citegetseinnocent@gmail.com; citegetseinnocent@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-5052-4803>;

^{2.2} s.a.maksimov@rgau-msha.ru; s.a.maksimov@mail.ru; SPIN-код: 1836-1054

Аннотация. В статье рассматриваются текущее состояние и перспективы развития орошаемого земледелия в Бурунди – стране, где сельское хозяйство играет важнейшую роль в национальной экономике. Анализ охватывает различные методологии орошения: от традиционных практик до современных систем, а также проблемы и перспективы улучшения ситуации в орошаемом земледелии Бурунди. Потенциал орошения в Бурунди оценивается в 122 701 га, но в настоящее время орошается лишь часть этих площадей (33%). Отсутствие научно обоснованных инженерных решений, технические и социально-экономические ограничения, высокая стоимость оборудования, неподготовленная водохозяйственная инфраструктура сдерживают развитие ирригационных систем. Тем не менее появляются технологические инновации и перспективные стратегические рекомендации для повышения эффективности ирригации в стране.

Ключевые слова: ирригационные системы и технологии, Республика Бурунди, традиционные методы орошения, дождевание, капельное орошение

Формат цитирования: Ичитегетсе И., Максимов С.А. Текущее состояние и перспективы развития орошаемого земледелия в Республике Бурунди // Природообустройство. 2025. № 5. С. 39-46. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-39-46>

Original article

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF IRRIGATED AGRICULTURE IN THE REPUBLIC OF BURUNDI

I. Icitegetse^{1✉}, S.A. Maksimov²

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

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

^{1.1} citegetseinnocent@gmail.com; citegetseinnocent@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-5052-4803>;

^{2.2} s.a.maksimov@rgau-msha.ru; s.a.maksimov@mail.ru; SPIN-код: 1836-1054

Abstract. This article examines the current state and prospects for the development of irrigated agriculture in Burundi, a country where agriculture plays a crucial role in the national economy. The analysis covers different irrigation methodologies, from traditional practices to modern systems, as well as the challenges and prospects for improving the situation in irrigated agriculture in Burundi. The irrigation potential in Burundi is estimated at 122,701 hectares, but only a fraction of this area (33%) is currently irrigated. The lack of scientifically based engineering solutions, technical and socio-economic limitations, the high cost of equipment, and unprepared water infrastructure hinder the development of irrigation systems. However, technological innovations and forward-looking policy recommendations to improve the efficiency of irrigation in the country are emerging.

Keywords: irrigation systems and technologies, Republic of Burundi, traditional irrigation methods, sprinkling, drip irrigation

Citation format: Icitegetse I., Maksimov S.A. Current state and prospects of development of irrigated agriculture in the Republic of Burundi // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 39-46. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-39-46>

Введение. Ирригация имеет большое значение для обеспечения населения Бурунди продовольствием [1-3]. Эта сельскохозяйственная практика, позволяющая точно регулировать подачу воды к культурам, является ключевым фактором оптимизации сельскохозяйственного производства. В более широком смысле ирригационные системы способствуют диверсификации сельскохозяйственных культур и значительно повышают доходы фермеров, одновременно снижая их уязвимость перед климатическими угрозами.

Республика Бурунди, страна с богатыми водными ресурсами включая болота, реки и озера, обладает значительным потенциалом в этой области [4, 5]. Однако неравномерное распределение водных ресурсов по территории страны представляет собой серьезную проблему для развития сельского хозяйства. Статистические данные свидетельствуют о явном недостаточном использовании имеющихся ресурсов: используется только 33% потенциала ирригации, хотя этот потенциал гораздо выше.

Кроме того, ирригационная система в Бурунди сталкивается с рядом проблем, главная из которых – отсутствие развитой ирригационной инфраструктуры.

Следует отметить, что в ирригации заключен значительный потенциал для развития сельского хозяйства в Бурунди, поскольку исследования показали возможность повышения урожайности за счет применения передовых методов управления и технологий в мелких ирригационных системах по всей Африке [6]. Кроме того, было доказано, что ирригация повышает урожайность сои и арахиса в Бурунди [1].

Разработка программы развития ирригации в Республике Бурунди и ее реализация требуют значительных усилий и комплексного подхода к решению этой проблемы. Гармонизация потребностей сельского хозяйства, с одной стороны, и сохранение экосистем – с другой, являются ключевыми для будущего орошаемого земледелия в стране. Эта целостная перспектива должна лежать в основе будущих комплексных инициатив по развитию ирригационных систем в стране.

Цель исследований: изучение текущего состояния и перспектив развития орошаемого земледелия в Бурунди.

Материалы и методы исследований: при изучении проблемы использованы различные методологии орошения – от традиционных

практик до современных систем, а также рассмотрены проблемы и перспективы улучшения ситуации в орошаемом земледелии Бурунди.

Традиционное поверхностное орошение в Республике Бурунди. Этот гидромелиоративный прием основан на использовании эффекта самотечного безнапорного распределения воды (только под действием гравитации). Поверхностное орошение применяется в сельскохозяйственных районах Бурунди, где используются преимущества рельефа (естественных уклонов местности) для распределения воды оросительной воды на орошаемых полях.

Поверхностное орошение имеет значительные преимущества для бурундийских фермеров. Оно относительно простое в применении, не требует дорогостоящего оборудования и поэтому доступно для мелких фермеров (рис. 1).

Поверхностные методы орошения в Республике Бурунди – такие, как полив по бороздам, полив по полосам или полив на рисовых оросительных системах, сопряжены с определенными трудностями. Поверхностное орошение может привести к неравномерному распределению воды, когда одни участки поля получают слишком много воды, а другие – слишком мало. Это может негативно сказаться на урожайности.

Еще одной проблемой является эрозия почвы по причине чрезмерного стока, особенно на склонах. Кроме того, этот метод может привести к перенасыщению почвы, что повышает риск возникновения дренажа и болезней растений. Исследования показали, что фермеры часто применяют избыточное количество воды, превышая водоудерживающую способность почвы и вызывая потери воды через сток и глубокую инфильтрацию [7, 8]. Такое перенасыщение создает благоприятные условия для патогенов, потенциально способствуя развитию эпидемий заболеваний [9]. Более того, исследования показали, что это способствует вымыванию нитратов, что может повысить риск заболеваний растений ввиду дисбаланса питательных веществ [10].

Поверхностное орошение в Бурунди ввиду своих относительно невысоких эксплуатационных и капитальных затрат является доминирующим. Такие культуры, как сорго и сладкий картофель, кофе, чай и сахарный тростник, дают устойчивые и высокие урожаи при условии поддержания оптимальной влажности почвы при орошении.

Поверхностное орошение в Бурунди применяется при выращивании таких культур, как рис, батат, картофель, овощи, бананы и пр., существенно повышая продуктивность сельскохозяйственных земель.

Исследования показывают, как различные системы бороздкового орошения влияют на урожайность. Традиционное бороздковое орошение при 100%-ной ЕТс позволило получить 7,99 т/га, в то время как фиксированное бороздковое орошение при 50%-ной ЕТс дало только 4,24 т/га, что подчеркивает влияние орошения [11].

Традиционное для Бурунди поверхностное орошение, призванное обеспечивать повышение урожайности сельскохозяйственных культур, поддерживая необходимую для растений влажность почвы, расширенное воспроизводство плодородия земель и повышение потенциала производства сельскохозяйственных культур, имеет ряд недостатков [1]. Эффективность поверхностных способов полива снижается такими явлениями, как деградация и ирригационная эрозия почв [12]. Традиционные методы поверхностного орошения часто страдают от низкой производительности и неэффективного управления водными ресурсами. Исследования показали, что в некоторых районах эффективность орошения составляет менее 50%, причем в верхних водосборных бассейнах орошение избыточное, а в нижних – недостаточное [7].

Несмотря на свои недостатки, поверхностное орошение, обеспечивая получение устойчивых урожаев, может помочь в развитии мелкотоварного сельскохозяйственного производства и местной экономики. Инициативы по внедрению простых и надежных технических средств управления поверхностными поливами помогут повысить эффективность поверхностного орошения, обеспечивая более высокую устойчивость сельскохозяйственного производства в условиях характерной для региона погодной изменчивости и тенденций климатических изменений, происходящих в восточной части Центральной Африки.

Поверхностное орошение остается важнейшим способом и при использовании водных ресурсов в сельском хозяйстве Республики Бурунди. Благодаря своей относительной простоте оно может использоваться для орошения различных культур, является простым и экономичным, что делает его предпочтительным вариантом для малых фермерских хозяйств.

Поверхностное орошение в Республике Бурунди широко применяется при осуществлении поливов на землях с холмистым рельефом. Этот

метод является частью более широкой концепции «микроирригации», или малого орошения, которое, по мнению ФАО, играет решающую роль в обеспечении продовольственной устойчивости в сельских районах [13]. Такая концепция основана на создании небольших отводных плотин – так называемых «микроплотин», выше по течению водотоков. Эти сооружения, построенные в основном из уплотненного грунта, в современной гидрологии называют «обратными плотинами». Их скромные размеры особенно подходят для ограниченных потоков горных ручьев. Вода поступает по сети самотечных каналов, прорытых вручную с помощью традиционных инструментов – таких, как мотыги и лопаты. Этот подход похож на системы «контурных каналов», описанные в литературе по ирригации в холмистой местности [14].

Община разработала сложную систему управления водными ресурсами, основанную на принципе временной ротации. Эта организация основана на строгом почасовом распределении воды между различными частями холмов, а также на индивидуальном управлении на уровне участка с использованием ручных методов распределения. Каждый фермер контролирует поток воды на своем поле, временно перекрывая каналы ногами, а затем распределяет воду по культурам с помощью емкостей.

Система земледелия, связанная с этим орошением, позволяет вести диверсифицированное сельское хозяйство. Фермеры одновременно выращивают овощи: лук, баклажаны, амарант и капусту, клубни (такие, как сладкий картофель), фрукты – как, например, японская слива (*Prunus salicina*), и зерновые (в частности, кукурузу). Такой тип смешанного земледелия имеет ряд преимуществ: оптимизирует использование водных и земельных ресурсов страны, позволяет получать гарантированные урожаи сельскохозяйственных культур, помогает поддерживать плодородие почвы и снижает фитосанитарные риски благодаря разнообразию культивируемых видов растений.

Традиционные методы орошения в Бурунди часто включают в себя самотечные системы, которые берут воду из рек, источников или небольших водохранилищ (рис. 1). Фермеры используют простые инструменты для создания борозд и ручного управления потоком воды. Для многих мелких фермеров в Бурунди главной задачей является производство достаточного количества продуктов питания для своих семей. Они часто полагаются на традиционные методы, передающиеся из поколения в поколение,



Рис. 1. Иллюстрация традиционной ирригационной системы в Бурунди
(фото автора И. Ичигетесе)

Fig. 1. Illustration of the traditional irrigation system in Burundi
[Photo by I. Ichitegetse]

которые в основном не предусматривают точного измерения или оптимизации расхода воды; учатся путем наблюдений, проб и ошибок, со временем адаптируя свои методы в зависимости от того, что кажется эффективным в их конкретных условиях.

Кроме того, выполнение точных размеров борозды и управление потоком воды могут потребовать дополнительных трудозатрат или ресурсов, которые фермеры не могут себе позволить.

Оптимизация размеров борозд и скорости потока воды может повысить эффективность орошения, тем не менее реальность для многих фермеров в Бурунди такова, что они работают с ограниченными ресурсами и отдают предпочтение насущным потребностям, часто полагаясь на традиционные знания и практику. Однако важно отметить, что неправительственные организации и государственные учреждения прилагают усилия для внедрения более эффективных методов орошения и обучения фермеров. Это постепенно приведет к повышению осведомленности и внедрению оптимизированных методов.

В исследованиях, проведенных в соседних странах, испытывались различные комбинации. При этом длина борозды варьировалась от 10 до 50 м, а скорость потока – от 0,45 до 1,6 л/с [15-19]. Скорость потока значительно влияла на урожайность культур и производительность воды во всех исследованиях, в то время как влияние длины борозды было менее последовательным. Оптимальные комбинации варьировались в зависимости от культуры и типа почвы: длина борозды 48 м и скорость потока 0,79 л/с рекомендованы для кукурузы на глинистой почве [19]; 50 м и 1,2 л/с – для хлопка на глинистой почве [17]; 30 м и 0,89 л/с – для картофеля [15].

Для улучшения этой традиционной системы можно рассмотреть ряд технических инноваций. Внедрение более эффективных технологий орошения – таких, как капельное орошение, позволит экономить воду. Использование более прочных материалов для каналов также снизит потребности в обслуживании. Внедрение надежных систем фильтрации поможет предотвратить засорение поливных форсунок, а установка приборов для измерения расхода воды будет способствовать более точному управлению водными ресурсами. В этой связи перспективным подходом для развития орошаемого земледелия в Республике Бурунди, по нашему мнению, будет подход, обеспечивающий учет и оптимальное сочетание экономических, технологических и социально-экологических факторов [2].

Современные ирригационные системы. Дождевание представляет собой значительный прогресс в технологиях орошения в Бурунди. Дождевание, или спринклерное орошение, – технологическая инновация, которая за счет давления в трубопроводах создает искусственный дождь. Спринклерное орошение особенно эффективно на участках со сложным рельефом, где традиционные методы неприменимы [20]. Дождевальные установки обеспечивают более равномерное распределение воды и могут быть адаптированы к специфическим потребностям различных культур.

Спринклерное орошение в условиях Республики Бурунди может быть использовано при выращивании зерновых культур – таких, как кукуруза (*Zea mays*), сорго и пр. Овощные культуры, особенно пасленовые, – такие, как томаты (*Solanum lycopersicum*), также выигрывают от точного регулирования влажности почвы,

что значительно ограничивает распространение грибковых заболеваний.

Основные ограничивающие факторы распространения дождевания в Бурунди – технические и экономические трудности. Высокая первоначальная стоимость является основным препятствием для мелких фермеров. Потребление энергии требует глубокого анализа экономической целесообразности системы.

На эффективность дождевания также влияют погодные условия: в частности, скорость ветра и потенциальное испарение. По данным исследований, потери составляют от 1,5 до 45% от внесенной воды [21, 22]. Скорость ветра и дефицит давления пара являются ключевыми факторами, влияющими на потери при испарении [23]. Чистые потери на испарение при дождевании составили 8,3% от общего количества внесенной воды, причем потери выше при дневном (9,8%) по сравнению с ночным (5,4%) поливами [23].

Перспективы использования дождевания в Республике Бурунди требуют повышенного внимания и включают в себя интеграцию автоматизированных технологий управления и систем мониторинга в режиме реального времени. Использование датчиков влажности почвы и автоматических метеостанций позволяет обеспечивать оперативное управление поливами, точно регулировать подачу воды, максимально повышая эффективность использования ресурсов.

Капельное орошение является инновационным в орошаемом земледелии в Бурунди. Оно основано на сложной распределительной системе, состоящей из труб, регуляторов давления, магнитных клапанов, капельных водовыпусков, спринклеров подкранового микроорошения, калиброванных эмиттеров и пр., обеспечивающих постепенное и дозированное распределение воды [20]. Высокая эффективность этой системы обусловлена высокой точностью распределения воды и снижением потерь на испарение. Анализ агрономических параметров выявил значительное физиологическое воздействие на развитие растений. Локализованное распределение воды способствует оптимальному развитию корней и улучшает усвоение питательных веществ. С фитопатологической точки зрения этот метод имеет значительные преимущества, так как снижает заболеваемость грибковыми болезнями. Поддержание контролируемой влажности на уровне корней, не допуская насыщения водой листовой, создает условия, неблагоприятные для развития патогенов. Точное регулирование влажности почвы также оптимизирует полезную ризосферную микрофлору.

Экологические последствия этой технологии очень важны в контексте изменения климата. Эффективное использование воды помогает экономно расходовать водные ресурсы, а уменьшение промывного режима и снижение вымыва питательных веществ в подстилающие горизонты почвы сохраняют плодородие почвы и минимизируют негативное воздействие на окружающую среду. Такой подход полностью соответствует принципам устойчивого развития сельского хозяйства.

Внедрение этой технологии в сельскохозяйственные системы Бурунди – значительный шаг на пути к более устойчивому и продуктивному сельскому хозяйству. Однако экономические и технологические проблемы, связанные с внедрением этих систем, требуют особого внимания. Высокая первоначальная стоимость и необходимость технического обслуживания являются ограничивающими факторами, которые должны учитываться при анализе затрат и выгод. Техническое обучение фермеров и регулярный мониторинг установок необходимы для обеспечения долгосрочной эффективности системы. Кроме того, раздробленность сельскохозяйственных участков, характерная для бурундийского сельского хозяйства, усложняет установку единых и эффективных ирригационных систем. Также отметим, что в настоящее время в Бурунди данный метод орошения находится на стадии эксперимента (рис. 2) и еще не получил широкого распространения среди фермеров.

Проблема развития ирригации в Республике Бурунди имеет следующие аспекты:

Технический. Анализ ирригационных систем в Бурунди выявил значительные технические ограничения, которые препятствуют оптимизации использования водных ресурсов [24]. Гидросельскохозяйственная инфраструктура, особенно в традиционной системе, имеет серьезные структурные недостатки, характеризующиеся неадекватным проектированием систем транспортировки воды и недостаточным обслуживанием существующих сооружений.

Системы поверхностного орошения, которые широко используются в регионе, имеют неоптимальную гидравлическую эффективность – в основном ввиду значительных потерь от испарения и инфильтрации в незащищенных каналах. Эта проблема усугубляется отсутствием регулярных анализов качества воды и систем мониторинга стока, что снижает эффективность гидросельскохозяйственных мероприятий. Неравномерное распределение водных ресурсов



Рис. 2. Эксперименты по капельному орошению в Бурунди
(фото по материалам: © MediaBox)

Fig. 2. Drip irrigation experiments in Burundi
[Photo based on materials: – © MediaBox]

по территории Бурунди также является серьезной технической проблемой. Более 99% орошаемых полей расположено на равнинах Имбо, Мосо и Бугезера, а также на болотах. На орошение в горах, как, например, в Рвире в провинции Бурури, приходится лишь небольшая доля – менее 1% от общей площади орошаемых земель. Такое положение требует различных технических решений, адаптированных к местным условиям.

Социально-экономический. Социально-экономические ограничения оказывают существенное влияние на эффективность ирригационных систем [25, 26]. Анализ экономических тенденций показывает значительный рост стоимости ирригационного оборудования, что представляет собой существенный финансовый барьер для мелких фермеров, для которых в большинстве случаев площадь орошаемых земель составляет менее 5 га. Инфляция цен также влияет на приобретение основных сельскохозяйственных ресурсов – таких, как семена и средства защиты растений. Влияние этих экономических ограничений четко отражается на урожайности сельскохозяйственных культур.

Институциональный. Существуют также значительные пробелы в институциональном потенциале, характеризующиеся:

- нехваткой квалифицированного технического персонала в государственных учреждениях;
- нехваткой финансовых ресурсов для создания и поддержания инфраструктур;
- отсутствием эффективной нормативно-правовой базы для управления водными ресурсами;

- отсутствием программы по обучению фермеров и повышению их осведомленности о современных методах ирригации.

Эти многофакторные ограничения требуют комплексного подхода, сочетающего инновационные технические решения и целевые социально-экономические мероприятия. Поэтому развитие ирригации, повышение эффективности ирригационных систем в Бурунди требуют целостной стратегии, учитывающей технические, социально-экономические и институциональные аспекты проблемы.

Перспективы совершенствования. Технологические инновации открывают многообещающие перспективы для совершенствования ирригационных систем в Бурунди. Внедрение современных технологий – таких, как капельное и дождевальное орошение, позволяет более эффективно использовать водные ресурсы. Эти системы могут быть адаптированы к различным регионам страны с учетом их специфических географических и климатических особенностей.

Для оптимизации поверхностного орошения крайне важным является эффективное управление водными ресурсами. Используя такие методы, как мониторинг влажности почвы, фермеры могут определить, когда и сколько воды нужно вносить. Это позволяет избежать избыточного полива и обеспечивает использование воды только в случае необходимости.

Адаптация поверхностного орошения к различным типам рельефа, например, к склонам, также помогает сократить потери воды. Террасирование, например, может задерживать воду и уменьшать сток. Системы каналов могут быть

спроектированы таким образом, чтобы направлять воду более эффективно, сводя к минимуму потери по причине стока на слишком крутых склонах.

Посадка покровных культур между рядами не только защищает почву от эрозии, но и уменьшает испарение воды. Это позволяет сохранить влажность почвы и увеличить влагозарядку, что особенно полезно для культур в периоды засухи.

Модификация существующих систем поверхностного орошения также способна помочь повысить эффективность. Например, бассейновое орошение, при котором вокруг растений создаются впадины, может улучшить сбор воды и уменьшить стоки. Аналогичным образом чередование поливов, при котором разные поля орошаются в разное время, позволяет оптимизировать использование воды, обеспечивая каждое поле водой в нужное время.

Создание систем мониторинга орошения может помочь фермерам оценить эффективность орошения. С помощью таких технологий, как датчики влажности почвы и системы дистанционного зондирования, можно собирать информацию о состоянии воды в почве, что позволяет корректировать потребности в орошении в режиме реального времени.

Кроме того, необходимо обучать и наращивать кадровый потенциал фермеров. Необходимо разработать программы обучения, чтобы

повысить осведомленность фермеров об эффективных методах орошения и устойчивом управлении водными ресурсами. Финансовая поддержка, особенно в виде программ субсидирования, способна помочь мелким фермерам получить доступ к современным технологиям ирригации.

Наконец, необходимо стратегическое планирование ирригации на уровне провинций включая разработку генеральных планов, адаптированных к местным условиям. Такое планирование должно включать в себя определение наиболее подходящих технологий для каждого региона.

Выводы

Несмотря на многочисленные технические и социально-экономические проблемы, текущее состояние ирригационных систем в Бурунди раскрывает значительный потенциал для повышения производительности сельского хозяйства. Предлагаемые технологические инновации и стратегические рекомендации позволят оптимизировать использование водных и земельных ресурсов, а также укрепить продовольственную безопасность страны. Успех этих улучшений будет зависеть от совместной приверженности государственных учреждений, организаций по развитию и фермеров к внедрению более эффективных и устойчивых методов ирригации.

Список использованных источников / References

1. Ndikumwenayo A., Kwizera C. Effects of irrigation Method on Household Food Security at Mugerero in Gihanga commune of Burundi // IJASRE. 2024. Т. 10, № 07. С. 67-71.
2. Mpererekumana P. и др. Assessing the Capacity of the Water–Energy–Food Nexus in Enhancing Sustainable Agriculture and Food Security in Burundi // Sustainability. 2023. Т. 15, № 19. С. 14117.
3. Nhundu K., Mushunje A. Irrigation Development: A Food Security and Household Income Perspective // Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management / под ред. Kumar M. InTech, 2012.
4. Barrat J.-M., Gutierrez A. Cartographie & Validation des Potentialités en Eaux Souterraines en Domaine de Socle sous Climat Tropical: Exemple du Burundi // Aquifères de socle: le point sur les concepts et les applications opérationnelles. La Chapelle-Hermier, 2015.
5. Gutierrez A., Barrat J.-M. Groundwater resources of Burundi. New elements and decision making tools // 35th International Geological Congress: IGC2016. 2016.
6. Fanadzo M. и др. Improving Productivity of Smallholder Irrigation in Africa Through Adoption of Best Management Practices and Technologies // Towards Sustainable Food Production in Africa / под ред. Fanadzo M. и др. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. С. 115-133.
7. Teshome Y. и др. Evaluating performance of traditional surface irrigation techniques in Cheleleka watershed in Central Rift Valley, Ethiopia // Appl Water Sci. 2018. Т. 8, № 8. С. 219.
8. Vico G., Porporato A. Traditional and microirrigation with stochastic soil moisture // Water Resources Research. 2010. Т. 46, № 3. С. 2009WR008130.
9. Rotem J., Palti J. Irrigation and Plant Diseases // Annu. Rev. Phytopathol. 1969. Т. 7, № 1. С. 267-288.
10. Yu H. и др. Water drainage and nitrate leaching under traditional and improved management of vegetable-cropping systems in the North China Plain // Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 2006. Т. 169, № 1. С. 47-51.
11. Birhan T.S. Effect of Furrow Irrigation Systems and Irrigation Levels on Maize Agronomy and Water Use Efficiency in Arba Minch, Southern, Ethiopia. 2023.
12. Megerle H.E., Niragira S. The Challenge of Food Security and the Water-Energy-Food Nexus: Burundi Case Study // World Review of Nutrition and Dietetics / под ред. Biesalski H.K.S. Karger AG, 2020. Т. 121. С. 183-192.
13. Oteng-Darko P. и др. Promoting smallholder irrigation for food Security – A review // Afr J Food Integ Agr. 2018. № 2. С. 1-7.
14. Kumar K., Satyal G.S., Kandpal K.D. Farmer and state managed hill irrigation systems in Kumaun Himalayas // Indian Journal of Traditional Knowledge. CSIR, 2006. Т. 5, № 1. С. 132-138.

15. Asefa A. и др. Effect of Appropriate Furrow Length and Flow Rate for Potato (&i> Solanum tuberosum&i> &l&t; I> L&t;/I>) Production Using Furrow Irrigation Under Smallholder Farmers Condition at Kersa, South Western Ethiopia // *AJPB*. 2023.

16. Kore G.G. Effect of furrow irrigation technical parameters on field application performances of short furrow and yield of onion crop in Bako, Ethiopia // *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2020. Т. 9. С. 1692-1698.

17. Robi F. и др. Determination of Appropriate Furrow Length and Flow Rate for Furrow Irrigation Practice Under Semi-Arid Climate Condition at Middle Awash, Ethiopia // *SR*. 2023.

18. Yadeta B. и др. Performance evaluation of furrow irrigation water management practice under Wonji Shoa Sugar Estate condition, in Central Ethiopia // *J. Eng. Appl. Sci.* 2022. Т. 69, № 1. С. 21.

19. Yigezu T.T., Kannan N., Hordof T. Effect of Furrow Length and Flow Rate on Irrigation Performances and Yield of Maize // *IJERT*. 2016. Т. V5, № 04. С. IJERTV5IS040846.

20. Attri M. и др. Improved Irrigation Practices for Higher Agricultural Productivity: A Review // *IJECC*. 2022. С. 51-61.

21. Uddin Md.J. Measurements of evaporation during sprinkler irrigation: University of Southern Queensland Repository: PhD Thesis. University of Southern Queensland, 2012. 300 с.

22. Yazar A. Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions // *Agricultural Water Management*. 1984. Т. 8, № 4. С. 439-449.

23. Stambouli T. и др. Sprinkler evaporation losses in alfalfa during solid-set sprinkler irrigation in semiarid areas // *Irrig Sci.* 2013. Т. 31, № 5. С. 1075-1089.

24. Ndayitwayeko W.M., Korir M. Determinants of technical efficiency in rice production in Gihanga (Burundi) Irrigation Scheme: A stochastic production frontier approach // *Egerton J. Sci. & Technol.* Egerton University, 2012. № 2. С. 1-12.

25. Chantal K., Astère D. Socio Economic Effects of Water Management on household livelihoods at Busiga commune of Ngozi Province in Burundi // *IJASRE*. 2023. Т. 09, № 11. С. 46-51.

26. Van Maanen N. и др. Accounting for socioeconomic constraints in sustainable irrigation expansion assessments // *Environ. Res. Lett.* 2022. Т. 17, № 7. С. 075004.

Об авторах

Инносент Ичитегетсе, аспирант; SPIN-код: 3352-4984, Author ID: 1273590; <https://orcid.org/0009-0004-5052-4803>; citegetseinnocent@gmail.com; citegetseinnocent@mail.ru

Сергей Алексеевич Максимов, профессор, главный научный сотрудник, зав. отделом мелиорации земель; SPIN-код: 1836-1054, Author ID: 190775; s.a.maksimov@rgau-msha.ru; s.a.maksimov@mail.ru

Information about the author

Innocent Icetegetse, post graduate student; SPIN code: 3352-4984, AuthorID: 1273590, <https://orcid.org/0009-0004-5052-4803>, citegetseinnocent@gmail.com; citegetseinnocent@mail.ru

Sergey A. Maksimov, Doctor of Technical Sciences, professor, chief researcher, head of the department of land reclamation; SPIN code: 1836-1054, Author ID: 190775; <https://orcid.org/0000-0001-7359-2228>, s.a.maksimov@rgau-msha.ru; s.a.maksimov@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Ичитегетсе И., Максимов С.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 no conflicts of interests

Вклад авторов

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

Статья поступила в редакцию / The article was received by the editors on 25.04.2025

Одобрена после рецензирования / Accepted for publication on 25.04.2025

Принята к публикации после доработки / Approved after review on 13.10.2025

Icetegetse I., Maksimov S.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have the copyright for the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-47-54>

УДК 628.35:504.4: 577.472.597



ОЧИСТКА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ С РАЗНЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

В.И. Сметанин^{1✉}, В.А. Шевченко²^{1,2}Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, корп. 2, Россия¹ smetanin2000@yandex.ru; ORCID iD: 0009-0004-0134-1234² shevchenko.v.a@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-5444-9693; ID РИНЦ 479685

Аннотация. Ежегодно в мире добывают около $4508,4 \times 10^6$ т нефти, в том числе $541,7 \times 10^6$ т – в России. Добываемая нефть бывает «легких» и «тяжелых» сортов. Независимо от сорта добываемая нефть поступает на перерабатывающие заводы (НПЗ), где производители нефтепродуктов легкие сорта пускают на получение светлого очищенного топлива, а тяжелые – на изготовление темных, более тяжелых видов нефтепродуктов, включая мазут, обладающих различной плотностью и вязкостью. В процессе транспортирования добытого сырья и переработанных нефтепродуктов в аварийных ситуациях происходит разлив, приводящий к тяжелым экологическим последствиям как на суше, так и на воде. Наибольшее негативное воздействие на водные экосистемы оказывают разливы тяжелых сортов сырья и нефтепродуктов. Использование танкерного флота для перевозки большей части добытой нефти и переработанных нефтепродуктов морским путем сопряжено с высокими рисками негативного воздействия на водные экосистемы в случае возникновения аварийных ситуаций. Наибольшую экологическую проблему создают аварийные ситуации при разливе тяжелой нефти и замазученных нефтепродуктов. Обнажили эту проблему две аварии танкеров 15 декабря 2024 г. в Керченском проливе Черного моря, перевозивших топливный мазут марки 100. В статье приведены технические решения ликвидации проливов нефти и нефтепродуктов, обладающих свойствами как вязких, так вязко-пластичных жидкостей, находящихся на водной поверхности, в притоленном состоянии и на дне.

Ключевые слова: водный объект, аварии, бункеровка, терминалы, шельф, нефть, нефтепродукты, вязкие, вязко-пластичные жидкости, технологии очистки

Формат цитирования: Сметанин В.И., Шевченко В.А. Очистка водных объектов от загрязнения нефтью и нефтепродуктами с разными физико-механическими свойствами // Природообустройство. 2025. № 5. С. 47-54. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-47-54>

Original article

CLEANING OF WATER BODIES FROM POLLUTION BY OIL AND OIL PRODUCTS WITH DIFFERENT PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

V.I. Smetanin^{1✉}, V.A. Shevchenko²^{1,2}All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya str, 44, building 2, Russia¹ smetanin2000@yandex.ru; ORCID iD: 0009-0004-0134-1234;² shevchenko.v.a@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-5444-9693; ID РИНЦ 479685

Abstract. About 4508.4×10^6 tons of oil are produced annually in the world, including 541.7×10^6 tons in Russia. Produced oil can be of “light” and “heavy” grades. Regardless of the grade, the oil produced is supplied to refineries, where producers of oil products use light grades to produce light refined fuel, and heavy grades to produce darker types of oil products, including fuel oil with different densities and viscosities. In the process of transporting extracted raw materials and refined petroleum products in accident situations, a spill occurs, leading to severe environmental consequences both on land and on water. The greatest negative impact on aquatic ecosystems is caused by spills of heavy grades of raw materials and oil products. The use of the tanker fleet for the transportation of a large part of the produced oil and refined petroleum products by sea is associated with high risks of negative impact on aquatic ecosystems in the event of emergencies. The greatest environmental problem is created by emergencies during the spill

of heavy oil and oil-contaminated petroleum products. This problem was exposed by two accidents of tankers on December 15, 2024 in the Kerch Bay of the Black Sea, carrying fuel oil of grade 100. The article presents technical solutions for the elimination of spills of oil and oil products with the properties of both viscous and viscous-plastic liquids located on the water surface, in a submerged state and at the bottom.

Keywords: water body, accidents, bunkering, terminals, shelf, oil, oil products, viscous, viscous-plastic liquids, treatment technologies

Citation format: Smetanin V.I., Shevchenko V.A. Cleaning of water bodies from pollution by oil and oil products with different physical and mechanical properties // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 47-54. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-47-54>

Введение. В системе обращения с нефтью и нефтепродуктами случаются аварийные ситуации различного масштаба, в результате которых происходит загрязнение водных объектов, нанося социальный, экономический и экологический ущерб сложившимся экосистемам различной степени опасности. Обострилась эта проблема после аварии танкеров 15 декабря 2024 г. в Керченском проливе Черного моря, перевозивших топочный мазут. В отличие от других видов нефтепродуктов топочный мазут обладает высокой плотностью, что вызвало определенные сложности при устранении последствий аварии (табл. 1).

Цель исследований: разработка и обоснование методов защиты прибрежных зон от разлива легких нефтепродуктов, находящихся в течение продолжительного времени на плаву, и очистки водных объектов от тяжелых нефтепродуктов с водной поверхности, из-под воды и со дна.

Материалы и методы исследований. Известно, что воздействие нефти и нефтепродуктов на представителей морской фауны может иметь весьма трагические последствия. Попадание нефти на перья птиц вызывает потерю теплопроводности оперения, что приводит к переохлаждению и гибели пернатых, а при попадании

нефти на поверхность яйца нарушается кислородный режим, и ввиду нехватки кислорода погибает зародыш. От загрязнения водной среды нефтью и нефтепродуктами чаще погибают покрытые мехом млекопитающие.

Образовавшаяся нефтяная пленка на водной поверхности затрудняет процессы аэрации водной среды. Недостаток кислорода приводит к заморам гидрофауны и изменению гидрофлоры, и как результат – к потере кормовой базы для гидробионтов. Попадание нефти и нефтепродуктов на водную поверхность наносит громадный экологический ущерб не только водной среде, но и прибрежным территориям, особенно зонам рекреации.

Постоянно растущий объем грузоперевозок нефти и нефтепродуктов, bunkеровка судов, заливка танкерного флота на выносных и прибрежных терминалах, добыча полезных ископаемых на шельфе повышают риски аварийных ситуаций разлива на воде. Это наиболее распространенный перечень источников поступления жидких углеводородов в водную среду морей и океанов.

С учетом того, что нефть и нефтепродукты могут обладать свойствами как вязких, так и вязко-пластичных жидкостей, требуются различные

Таблица 1. Возможное состояние разлива нефти и нефтепродуктов в зависимости от их физических показателей

Table 1. Possible state of oil and oil products spill depending on their physical characteristics

№	Нефть, нефтепродукты <i>Oil, oil products</i>	Плотность, г/см ³ <i>Density, g / cm³</i>	Вид жидкости <i>Type of liquid</i>	Возможное состояние <i>Possible state</i>
1	Суперлегкая / <i>Super light</i>	0,78	Проявляют свойства вязких жидкостей <i>They exhibit the properties of viscous liquids</i>	Большую часть времени находится наплаву <i>Most of the time they are afloat</i>
2	Сверхлегкая / <i>Ultralight</i>	0,78-0,82		
3	Легкая / <i>Light</i>	0,82-0,87		
4	Средней тяжести / <i>Moderate heavy</i>	0,87-0,92	Проявляют свойства вязко-пластичных жидкостей <i>They exhibit the properties of viscous-plastic fluids</i>	Часть находится наплаву, другая – в притоленном состоянии, третья – осевшем на дне <i>Part is afloat, the other is in a submerged state, the third is settled at the bottom</i>
5	Тяжелая / <i>Heavy</i>	0,92-1,00		
6	Сверхтяжёлая / <i>Super Heavy</i>	>1,00		
7	Топочный мазут <i>Heating oil</i>	0,96-1,015 (структурная вязкость 50... 59 мм ² /с) 0,96-1,015 (structural viscosity 50... 59 mm ² / s)		

подходы к разработке технологий по их удалению с водной поверхности.

Из данных таблицы 1 следует, что в зависимости от физико-механических свойств нефть и нефтепродукты по-разному ведут себя при разливах на воде: одни, обладая вязкими свойствами, растекаются тонким слоем по водной поверхности и в течение достаточно продолжительного времени находятся на плаву, перекатываясь, как «ртуть», по волнам; другие обладают вязко-пластичными свойствами (например, «тяжелый» топочный мазут, который застывает при температуре $+25^{\circ}\text{C}$, имеет плотность, близкую к воде, но при этом тяжелее ее). В отличие от первых такие загрязнения вначале держатся на поверхности, но при волнении происходит их разделение на «фракталы», которые затем попеременно опускаются на дно или остаются в толще воды в придонной зоне [1].

Собрать тяжелые нефтепродукты с водной поверхности достаточно сложно, особенно в ветреную погоду. Практически отсутствуют технологии ликвидации аварийных ситуаций на море с замазученными нефтепродуктами.

Научная гипотеза заключается в физико-математическом обосновании технических решений, направленных на удаление с водной поверхности проливов нефти и нефтепродуктов, обладающих свойствами как вязких, так и вязко-пластичных жидкостей.

Основными при ликвидации разлива нефти и нефтепродуктов являются механический, физико-химический, термический, биологический методы.

Механический и физико-химический методы очистки. В случае аварийной ситуации в море пораженный участок ограждают

боновыми заграждениями и применяют различные нефтесборные механические системы и устройства, работающие по принципу «листьевого хвоста», или на загрязненный участок высыпают сорбенты, адсорбенты либо диспергенты. Более действенными являются синтетические сорбенты: полипропилен, поролон, синтепон, каучуковая крошка нефтесорб и т.д. Они характеризуются более высокой нефтепоглощающей способностью, термостойкостью, высокой устойчивостью к химическим и физическим воздействиям. При их применении на загрязненный участок водной поверхности высыпается сорбент, после чего ожидают, когда сорбент сорбирует на своей поверхности нефть или нефтепродукты. Затем сорбент с нефтепродуктами собирают для утилизации на берегу (рис. 1) [2-4].

Термический метод, основанный на выжигании нефти, применяется при достаточной толщине слоя нефти сразу же после аварии, до образования эмульсий с водой, и применяется в сочетании с другими методами ликвидации (рис. 2) [2].

К *биологическим способам очистки воды* относят использование биопрепаратов на основе различных видов микроорганизмов, биоремедиацию (bio – жизнь, remedio – лечение).

Биологический метод используется после применения механического и физико-химического методов при толщине пленки не менее 0,1 мм.

Биоремедиация – это технология очистки нефтезагрязненной воды, в основе которой лежит использование специальных углеводородоокисляющих микроорганизмов или биохимических препаратов. Число микроорганизмов, способных ассимилировать нефтяные углеводороды, относительно невелико. В первую очередь,

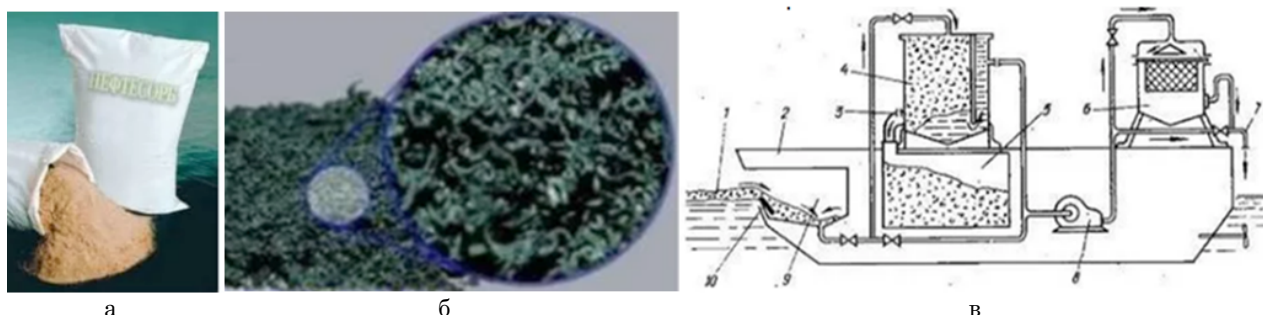


Рис. 1. Физико-химический способ очистки водной среды от нефти и нефтепродуктов:

- а – нефтесорб до использования; б – после впитывания;
в – принципиальная схема судна-нефтесборщика (1 – сорбент, насыщенный нефтью;
2 – судно; 3 – клапан; 4 – гравитационный сепаратор; 5 – емкость-накопитель;
6 – кассетный адсорбер; 7 – сброс очищенной воды; 8 – насос)

Fig. 1. Physico-chemical method of purification of the aquatic environment from oil and oil products:

- a – oil sorb before use, b – after absorption; c – schematic diagram of an oil collector vessel:
1 – sorbent saturated with oil; 2 – vessel; 3 – valve; 4 – gravity separator; 5 – storage tank;
6 – cassette adsorber; 7 – discharge of the purified water; 8 – pump



Рис. 2. Термический метод очистки водной среды от нефти и нефтепродуктов:
а – на воде; б – в прибрежной зоне

Fig. 2. Thermal method of purification of the aquatic environment from oil and oil products:
a – on the water; b – in the coastal area

это бактерии, в основном представители рода *Pseudomonas*, и определенные виды грибов и дрожжей. При температуре воды 15...25°C и достаточной насыщенности кислородом микроорганизмы могут окислять нефтепродукты со скоростью до 2 г/м² водной поверхности в день. При низких температурах бактериальное окисление замедляется, и нефтепродукты могут оставаться в водоемах в течение длительного времени – до 50 лет [5-7].

Все перечисленные методы ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов имеют свои преимущества и недостатки. Самое главное – они применяются в основном тогда, когда аварийная ситуация уже произошла и любые методы приемы, но не всегда эффективны.

Согласно основному закону вязкого течения отдельные виды нефти и нефтепродукты обладают свойствами вязких (ньютоновских) жидкостей:

$$\tau = \eta \times J, \quad (1)$$

где τ – касательные напряжения сдвига, вызывающие течение жидкости, н/м²; η – коэффициент динамической вязкости, Па·с; J – градиент напора, равный отношению $J = \frac{h}{l}$; h – высота волны, м; l – длина волны, м.

Попадая на воду, такая нефть и нефтепродукты в спокойную погоду растекаются по водной поверхности в виде тонкой пленки, которую собирают одним из возможных способов. Однако в ветреную погоду при плотности нефтепродуктов ($\rho_{н/п}$) меньше плотности воды (ρ_0) сплошность нарушается, и по мере возрастания градиента напора (увеличения волн) загрязнения начинают перетекать с гребней волн в ложбины, накапливаясь в них. С использованием этого явления в 2002 г. был получен патент на изобретение РФ № 2178039 «Устройство для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоема» [8]. Внешний вид и принцип работы предлагаемого устройства напоминают плавающую морскую медузу,

перемещающуюся с гребня в ложбину и покачивающуюся на волнах, пропускающая через себя морскую воду, очищая ее от многих загрязняющих ингредиентов.

Опытный модельный образец устройства для очистки водной поверхности от нефтепродуктов был испытан в лабораторных условиях (рис. 3а, б).

Устройство состоит из корпуса (резервуара-накопителя), выполненного в виде цилиндра с верхним и нижним основаниями. Верхнее основание снаружи имеет форму обратного усеченного конуса с отверстием по центру. Образующая коническая поверхность служит приемным устройством воды и нефтепродуктов с набегающих волн. Внизу резервуар-накопитель ограничен днищем с отверстием по центру. Внутри корпуса размещена подвижная система клапанов, выполненных в виде двух шаров, соединенных между собой штоком, свободно перемещающимся в направляющей втулке, раскрепленной крестовиной в средней части резервуара-накопителя.

Длина клапанной системы определяется возможностью попеременно закрывать и открывать отверстия: сверху – впускное, снизу – выпускное, в зависимости от схода или наката волны. При сходе волны верхний клапан поднимается в верхнее положение и перекрывает впускное отверстие, тем самым предотвращая вылив из резервуара-накопителя уже собранных нефтепродуктов. При подъеме волны из заполненного приемного устройства нефтепродуктами и водой открывается впускное отверстие, и происходит загрузка нефтепродуктов внутрь резервуара-накопителя, постепенно отжимая через открытое нижнее отверстие осветленную избыточную воду за его пределы. Подвижная система двух клапанов выполнена массой, обеспечивающей ее самостоятельную остойчивость в водно-нефтяной среде внутри устройства. Само устройство поддерживается на плаву с помощью поплавков,



Рис. 3. Действующая модель устройства для очистки водной поверхности водных объектов от нефтепродуктов и плавающего мелкого мусора:

- а – действующая модель; б – демонстрация устройства и его работы
 (1 – корпус (резервуар-накопитель); 2, 3 – соответственно нижнее и верхнее основания с отверстиями; 4, 6 – верхний и нижний шаровидные клапаны соответственно; 5 – шток с регулируемой длиной, соединяющий верхний и нижний шаровидные клапаны; 7 – направляющая втулка; 8 – опорная крестовина в средней части резервуара-накопителя)

Fig. 3. Current model of a device for cleaning the water surface of water bodies from petroleum products and floating small debris:

- а – current model; б – demonstration of the device and its operation; 1 – housing (storage tank); 2, 3 – lower and upper bases with holes, respectively; 4, 6 – upper, respectively and lower spherical valves; 5 – a rod with an adjustable length connecting the upper and lower spherical valves; 7 – a guide sleeve; 8 – a supporting crosspiece in the middle part of the storage tank; 9 – floats

прикрепленных к корпусу, также обеспечивающих самостоятельную его устойчивую плавучесть.

Наибольшая эффективность сбора устройством легкой нефти и светлых нефтепродуктов с водной поверхности достигается при волнении: чем выше высота волн, тем выше эффективность. При волнении на море нефтепродукты, стекая с гребней волн, скапливаются в ложбинах, а устройство, находясь в закоренном положении, постоянно балансируя на волнах, совершая вертикальные перемещения в независимых устойчивых состояниях самого корпуса и клапанной группы, обеспечивает как бы «черпание» нефтепродуктов, скапливаемых в ложбине волн.

Поскольку нефтепродукты легче воды, они скапливаются в верхней части резервуара-накопителя, а очищенная вода уходит через нижнее отверстие при приоткрытом положении нижнего клапана. После заполнения резервуара-накопителя нефтепродуктами манипулятор приподнимает устройство над водой, и нижний клапан перекрывает нижнее отверстие, предотвращая самопроизвольное опорожнение содержимого из резервуара-накопителя. Далее манипулятор перемещает устройство в точку разгрузки приподнимает систему клапанов в верхнее положение, и происходит опорожнение содержимого в наливную баржу с последующей утилизацией на берегу. Устройство после разгрузки перемещают в зону загрязнения, ставят на якорь для продолжения работы по сбору нефтепродуктов.

Наибольшую проблему создают «тяжелые» нефти, замазученные нефтепродукты и мазут, плотность ($\rho_{н/п}$) которых соизмерима с плотностью (ρ_0) воды или в отдельных случаях превышает, или равна $\rho_{н/п} \geq \rho_0$, а вязкость таких жидкостей приобретает аномальные значения и не характеризуют их течение [9, 10]:

$$\tau \neq \eta \times J. \quad (2)$$

Такие жидкости относятся к вязко-пластичным, их характерной чертой является наличие предела упругости (начального напряжения сдвига), после превышения которого структура жидкости разрушается:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{nl} \times J, \quad (3)$$

где τ – динамическое напряжение сдвига, н/м^2 ; τ_0 – начальное напряжение сдвига, н/м^2 ; η_{nl} – пластическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; J – градиент напора, равный отношению $J = \frac{h}{l}$; h – высота волны, м; l – длина волны, м.

Попадая в воду в спокойную погоду, такие нефть и нефтепродукты, обладая структурной вязкостью, растекаются по водной поверхности толстым слоем, который вначале достаточно уверенно держится на плаву. Однако при увеличении градиента напора (появление волнения), приводящего к увеличению динамического напряжения сдвига, система начинает разрушаться на отдельные «фракталы». («Фрактал» – оторвавшаяся часть от нефтяного массива, обладающего вязко-пластичными свойствами.) При этом отдельные «фракталы», имеющие плотность ($\rho_{н/п}$),

большую или равную плотности воды (ρ_0), держатся на плаву, другие уходят под воду, третьи оказываются в придонной зоне или на дне. Собрать их и удалить, как находящихся на водной поверхности или в толще воды, так и осевших на дно, обычными методами сложно, а иногда практически невозможно.

Для очистки водных объектов от «тяжелой» нефти, замазученных нефтепродуктов и мазута предлагается устройство в виде нового рабочего органа, подвешиваемого к крюку плавучего подъемного крана, требуемой грузоподъемности в зависимости от массы рабочего органа, заполненного тяжелыми нефтепродуктами и морской водой.

Рабочий орган выполнен в виде металлического цилиндра с загрузочным раструбом с диафрагмой и отверстием в ней, клапанной системой в виде двух герметичных шаров, днищем с разгрузочным отверстием (рис. 4). Масса рабочего органа должна обеспечивать свободное погружение через нефтепродукты, находящиеся на плаву, для их поступления в загрузочный раструб (воронку). Загрузочная воронка от корпуса отделена диафрагмой с впускным отверстием, изнутри перекрываемым верхним шаровым клапаном, который при погружении загрузочное отверстие перекрывает, а при подъеме – открывает. Снизу корпус перекрыт днищем с выпускным отверстием, оборудованным нижним шаровым клапаном, при подъеме перекрывающим выпускное отверстие, а при погружении – открывающим.

Шаровые клапаны соединены штоком с изменяющейся его длиной, позволяющей настроить требуемый размер щели, образующейся между кромкой впускного отверстия и шаровой поверхностью, в зависимости от степени фрактальности нефтяных сгустков-«фракталов», оторвавшихся от нефтяного массива, обладающего вязко-пластичными свойствами.

После наполнения внутреннего пространства рабочего органа нефтепродуктами, при его извлечении из воды, нижний клапан перекрывает нижнее выпускное отверстие, предотвращая самопроизвольный вылив нефтепродуктов. Для работоспособности клапанной системы внутри рабочего органа предусмотрена опорная крестовина, обеспечивающая вертикальное перемещение клапанов. Кроме того, масса подвижной клапанной системы должна соответствовать «стойчивому» ее состоянию в нефте-водной среде.

Рабочий орган подвешивается на стропах к крюку плавучего подъемного крана и, совершая рабочие манипуляции («майна-вира»), осуществляет постепенное заполнение внутреннего

пространства рабочего органа нефтью или нефтепродуктами.

При обнаружении загрязненного участка нефтью или нефтепродуктами загрязненную акваторию огораживают бонами и осуществляют сбор и удаление загрязнителей одним из возможных способов. Как отмечалось выше, продолжительность нахождения нефтесодержащих материалов на плаву зависит от их свойств: легкие находятся на плаву в течение достаточно продолжительного времени, более тяжелые постепенно начинают тонуть – вплоть до осаждения на дно.

Любая технология является более жизнеспособной тогда, когда удаляемый загрязнитель находится на плаву. В случае, когда нефтепродукты находятся в толще воды или осели на дно, процесс очистки водных объектов должен включать в себя дополнительный этап, обеспечивающий всплытие отдельных «фракталов» на водную поверхность. Подъем нефтепродуктов, находящихся в толще воды, не достигших дна, предлагается осуществлять аэрированием толщи воды подачей сжатого воздуха в придонную зону. Образующиеся

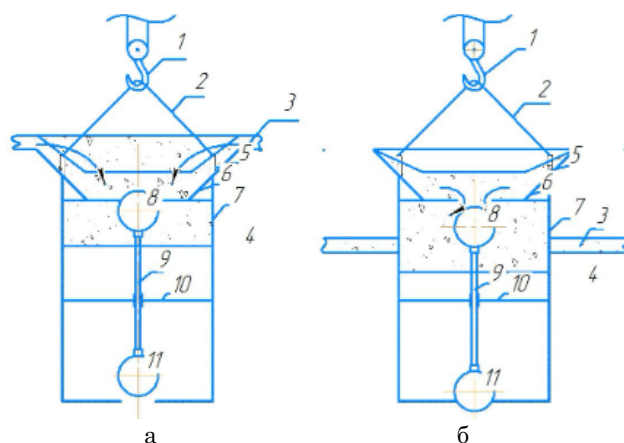


Рис. 4. Устройство для удаления разлива «тяжелых» нефти и нефтепродуктов с водной поверхности:

- а – процесс погружения; б – процесс подъема
 1 – крюк плавучего подъемно-транспортного средства; 2 – стропы; 3 – нефтепродукты;
 4 – морская вода; 5 – загрузочный раструб;
 6 – диафрагма; 7 – корпус (цилиндр);
 8 – верхний шар клапанной системы;
 9 – шток; 10 – опорная крестовина;
 11 – нижний шар клапанной системы)

Fig. 4. Device for removing the spill of «heavy» oil and oil products from the water surface:

- a – immersion process; b – lifting process;
 1 – hook of a floating lifting and transporting vehicle;
 2 – slings; 3 – oil products; 4 – seawater; 5 – feed socket;
 6 – diaphragm; 7 – housing (cylinder);
 8 – upper ball of the valve system; 9 – plunger;
 10 – supporting crosspiece;
 11 – lower ball of the valve system

пузырьки воздуха в придонной зоне, поднимаясь вверх, налипают на отдельные «фракталы», находящиеся в толще воды, повышают их плавучесть и поднимают их на поверхность. Подъем нефтепродуктов, находящихся на дне, осуществляют подачей водо-воздушной струи в придонную зону, которая при ударе о дно разрушает слежавшиеся нефтепродукты на более мелкие «фракталы». При этом струя воды, разрушая мазут, отмывает его от песка, а воздух, приликая к облегченным «фракталам», поднимает их наверх. После всплытия на поверхность тяжелые нефтепродукты удаляют соответствующим способом (рис. 4).

Существуют источники диффузного (рассредоточенного) распространения нефтяных загрязнений, постоянно перемещающиеся по акватории моря, приносимые ветром в прибрежную зону и выбрасываемые прибоем на берег (рис. 5а) [11].

Предотвратить загрязнение береговой линии нефтезагрязнителями, выбрасываемыми ветровым нагоном со стороны моря, практически не всегда удается. Наибольшую проблему при очистке загрязненных территорий создают замазученные нефть и нефтепродукты, обладающие высокой степенью налипания (адгезией). С учетом этого процессы очистки зависят и от вида

горных пород, слагаемых береговую линию, на которые были выброшены загрязнители. Это могут быть несвязные (пески), связные (суглинки и супеси) грунты или скальные породы.

Очистку песчаных берегов осуществляют удалением вручную, сгребанием нефтепродуктов с замазученным песком в мешки для последующего удаления из зоны загрязнения (рис. 5б). В этом случае нефтепродукты и замазученный песок, удаляемые с пляжей, целесообразно временно размещать на специально подготовленных площадках, минимизирующих негативное воздействие опасного отхода на окружающую среду. Учитывая временный характер размещения опасного отхода, замазученный песок можно непосредственно использовать при приготовлении асфальта или обезвредить его термически, обжигая во вращающихся печах цементного типа либо в пиролизных установках, оборудованных устройствами очистки отходящих газов в процессе обжига и пиролиза. Очищенный песок возвращать на пляж не рекомендуется.

Очистка территорий, представленных скальными породами, галькой и щебнем, а также связными породами грунтов, требует проведения дополнительных исследований.



Рис. 5. Очистка береговой линии после выброса мазута в прибрежную зону:

а – сбор мазута вместе с песком и загаривание в мешки вручную;

б – собранные нефтепродукты с песком в мешках

Fig. 5. Cleaning of the coastline after the release of fuel oil into the coastal zone:

a – collecting fuel oil together with sand and packing it into bags manually; b – collected oil products with sand in bags

Выводы

1. Действующая модель устройства для очистки акваторий от нефтепродуктов прошла лабораторные испытания, которые показали ее жизнеспособность. Таким образом, она может быть рекомендована для очистки и защиты водной поверхности от легких нефтей, плотность которых не превышает $0,82-0,87 \text{ г/см}^3$, относящихся к вязким жидкостям.

2. Разработанные рабочее устройство и технология для очистки водных объектов от «тяжелой» нефти, замазученных нефтепродуктов и мазута, обладающих плотностью более $0,87 \text{ г/см}^3$, способны собирать с водной поверхности нефтепродукты, мелкие сгустки мазута в виде отдельных «фракталов», первоначально находящихся на плаву или поднятых на поверхность, ранее ушедших под воду или осевших на дне.

Список использованных источников

1. Двадненко М.В. / Воздействие нефти на окружающую среду / М.В. Двадненко, Р.В. Маджигатов,

References

1. Dvadenko M.V. / Impact of oil on the environment / M.V. Dvadenko, R.V. Madzhigatov, N.A. Rakityansky

Н.А. Ракитянский // Международный журнал экспериментального образования. 2017. № 3-1. С. 89-90. EDN: YFUIGV

2. Башкин В.Н. Аварийные разливы углеводородов в водную среду: проблемы и пути их решения / В.Н. Башкин, Р.В. Галиулин, Р.А. Галиулина // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. Вып. 11. С. 4-7. EDN: NBIDIL

3. Собгайда Н.А. Новые углеродные сорбенты для очистки воды от нефтепродуктов / Н.А. Собгайда, А.И. Финаенов // Экология и промышленность России. 2005. Вып. 12. С. 8-11. EDN: JXUJWB

4. Панкеев В.В. Модификация целлюлозосодержащих отходов, обеспечивающая создание сорбентов с высокой удельной нефтеемкостью / В.В. Панкеев, Л.Г. Панова, Е.С. Свешникова // Технические науки – от теории к практике. 2012. Вып. 7-2. С. 59-63. EDN: JXUJWB

5. Xue J. Marine Oil-Degrading Microorganisms and Biodegradation Process of Petroleum Hydrocarbon in Marine Environments: A Review / J. Xue, Y. Yu, Y. Bai // Current microbiology. 2015. Т. 71, V. 2. P. 220-228.

6. Куликова И.Ю. Микробиологические способы ликвидации последствий аварийных разливов нефти в море / И.Ю. Куликова, И.С. Держинская // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2008. Вып. 5. С. 24-29.

7. Сребренникова М.К. Биологические способы очистки нефтезагрязненных сточных вод (обзор) / М.К. Сребренникова, М.С. Тудвасева, М.С. Куюкина // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2015. Вып. 1. С. 15-30. EDN: TYWGAX

8. Патент на изобретение РФ № 2178039. Устройство для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоема / Сметанин В.И., Авинель В.И. Дата подачи заявки: 30.05.2000; Дата начала действия: 30.05.2000; Дата публикации: 10.01.2002.

9. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология. Концепции, методы, приложения. – М.: Профессия, 2007. 560 с. ISBN 978-5-93913-139-1, 1-895198-33-X

10. Малкин А.Я., Сафиева Р.З. Реология нефти и нефтепродуктов: Теория и практика. Учебник. М.: Профессия, 2019. 178 с.

11. Лыжин И.Д. Нефтяные выбросы в Чёрное море как техногенная катастрофа / И.Д. Лыжин. Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2025. № 21 (572). С. 150-153. URL: <https://moluch.ru/archive/572/125647/>.

// International Journal of Experimental Education. 2017 No 3-1. P. 89-90. EDN: YFUIGV

2. Bashkin V.N. Emergency spills of hydrocarbons in the water environment: problems and ways of their solution / V.N. Bashkin, R.V. Galiulin, R.A. Galiulina // Environmental protection in the oil and gas industry. 2010. Iss. 11. P. 4-7. EDN: NBIDIL

3. Sobgayda N.A., Finaenov A.I. New carbon sorbents for water purification from oil products / N.A. Sobgayda, A.I. Finaenov // Ecology and Industry of Russia. 2005. Iss. 12. P. 8-11. EDN: JXUJWB

4. Pankeev V.V. Modification of cellulose-containing waste, ensuring the creation of sorbents with high specific oil capacity / V.V. Pankeev, V. V., V.V. Panova, L.G. Panova, E. Sveshnikova // Technical sciences – from theory to practice. 2012. Iss. 7-2. P. 59-63. EDN: JXUJWB

5. Xue J. Marine Oil-Degrading Microorganisms and Biodegradation Process of Petroleum Hydrocarbon in Marine Environments: A Review / J. Xue, Y. Yu, Y. Bai // Current microbiology. 2015. Т. 71, V. 2. P. 220-228.

6. Kulikova I.Yu. Microbiological methods of liquidating the consequences of emergency oil spills in the sea / I.Yu. Kulikova I.S. Dzerzhinskaya. 2008. Iss. 5. P. 24-29.

7. Serebrennikova M.K. Biological methods of cleaning oil-contaminated wastewater (review) / M.K. Serebrennikova, M.S. Tudvaseva, M.S. Kuyukina // Bulletin of Perm University. Series: Biology. 2015. Iss. 1, P. 15-30. EDN: TYWGAX

8. Patent for the invention of the Russian Federation No 2178039 Device for collecting oil pollution from the surface of a water body / Smetanin V.I., Avinel V.I. Application date: 30.05.2000; Effective date: 30.05.2000; Date of publication: 10.01.2002.

9. Malkin A.Ya., Isaev A.I. Rheology. Concepts, methods, applications. – Moscow: Profession, 2007. – 560 p. ISBN 978-5-93913-139-1, 1-895198-33-X

10. Malkin A.Y., Safieva R.Z. Rheology of Oil and Petroleum Products: Theory and Practice. Moscow: Profession, 2019. 178 p.

11. Lyzhin I.D. Oil emissions into the Black Sea as a technogenic catastrophe / I.D. Lyzhin. Text: immediate // Young scientist. 2025. № 21 (572). P. 150-153. URL: <https://moluch.ru/archive/572/125647/>.

Об авторах

Владимир Иванович Сметанин, д-р техн. наук, профессор; ORCID iD: 0009-0004-0134-1234; smetanin2000@yandex.ru

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

Критерии авторства / Authorship criteria

Сметанин В.И., Шевченко В.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 interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

Статья поступила в редакцию / The article was received the editorial office on 28.08.2025

Одобрена после рецензирования / Accepted for publication on 28.10.2025

Принята к публикации после доработки / Approved after review on 28.10.2025

About the authors

Vladimir I. Smetanin, DSs (Tech), Professor; ORCID iD: 0009-0004-0134-1234; metanin2000@yandex.ru

Victor A. Shevchenko, DSs (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

Smetanin V.I., Shevchenko V.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have the copyright for the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-55-62>

УДК 631.674.6:628.171:635.34



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ БЕЛОКОЧАННОЙ ПОЗДНЕЙ КАПУСТЫ НА ОСНОВЕ ИСПАРЯЕМОСТИ ПРИ КАПЕЛЬНОМ ПОЛИВЕ

В.В. Пчелкин^{1✉}, Е.А. Попова²

^{1,2} ФГБОУ ВО 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

¹9766793@mail.ru; ORCID ID: 0000-0003-3625-9949

²kkk97@list.ru; ORCID ID: 0000-0002-5281-4714

Аннотация. Возделывание овощных культур в засушливые периоды вегетации в Нечерноземной зоне России требует проведения орошения. Использование капельного способа полива обеспечивает стабильное получение урожая белокочанной поздней капусты и сохранение плодородия почвы. При расчете режима орошения белокочанной поздней капусты необходима формула для расчета суммарного водопотребления. Несмотря на большое количество исследований по определению суммарного водопотребления овощных культур, формулы для расчета суммарного водопотребления белокочанной поздней капусты на дерново-подзолистых почвах Нечерноземной зоны России при капельном способе полива с использованием испаряемости отсутствуют. В этой связи были проведены исследования в 2022-2023 гг. на территории Сергиево-Посадского городского округа Московской области, позволившие получить формулу для расчета суммарного водопотребления белокочанной поздней капусты с использованием испаряемости в рассматриваемых условиях. К данной формуле были определены коэффициенты ($K_{пер.}$) перехода испаряемости к потенциальному водопотреблению белокочанной поздней капусты, а также биологические коэффициенты ($K_{биол.}$) и коэффициенты ($K_{вл.}$), учитывающие понижение влажности почвы ниже оптимальных значений для исследуемой культуры. Сопоставление расчетных данных суммарного водопотребления белокочанной поздней капусты с фактическими данными показало сильную связь. При этом коэффициент корреляции данной связи составил $0,975 \pm 0,0315$.

Ключевые слова: водопотребление, орошение, испаряемость, вода, белокочанная поздняя капуста, почва

Формат цитирования: Пчелкин В.В., Попова Е.А. Определение водопотребления белокочанной поздней капусты на основе испаряемости при капельном поливе // Природообустройство. 2025. № 5. С. 55-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-55-62>

Scientific article

DETERMINING THE WATER CONSUMPTION OF LATE WHITE CABBAGE BASED ON EVAPORATION UNDER DRIP IRRIGATION

V.V. Pchelkin^{1✉}, E.A. Popova¹

^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Timiryazevskaya str., 49, Russia

¹9766793@mail.ru ORCID ID: 0000-0003-3625-9949

²kkk97@list.ru; ORCID ID: 0000-0002-5281-4714

Abstract. Cultivation of vegetable crops during dry periods of vegetation in the Non-Chernozem zone of Russia requires irrigation. The use of drip irrigation ensures a stable yield of white cabbage and preserves soil fertility. When calculating the irrigation regime for white cabbage, a formula is needed to calculate the total water consumption. Despite a large number of studies on determining the total water consumption of vegetable crops, there are no formulas for calculating the total water consumption of white cabbage on sod-podzolic soils in the Non-Chernozem zone of Russia using drip irrigation and evaporation. In this regard, studies were conducted in 2022-2023 on the territory of the Sergiyev-Posadsky urban district of the Moscow Region, which allowed us to obtain a formula for calculating the total water consumption of white cabbage using evaporation under the conditions under consideration. The following coefficients were determined for this formula: the coefficients ($K_{per.}$) of the transition from evaporation to the potential water consumption of white cabbage; as well as the biological coefficients ($K_{biol.}$) and the coefficients ($K_{vl.}$) that

take into account the decrease in soil moisture below the optimal values for the studied crop. Comparison of the calculated data on the total water consumption of white cabbage with the actual data showed a strong correlation. The correlation coefficient of this relationship was 0.975 ± 0.0315 .

Keywords: water consumption, irrigation, evaporation, water, white late cabbage, soil

Format of citation: Pchelkin V.V., Popova E.A. Determining the water consumption of late white cabbage based on evaporation under drip irrigation // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 55-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-55-62>

Введение. Орошение в комплексе с агротехническими мероприятиями является значимым способом повышения урожайности сельскохозяйственных культур в России. В этой связи изучение режимов орошения белокочанной поздней капусты при капельном способе полива на дерново-подзолистых почвах является актуальным вопросом исследований в Нечерноземной зоне. Это вызвано тем, что опыт по режимам орошения белокочанной поздней капусты, накопленный в других природно-климатических зонах при иных способах полива, является неприемлемым в Нечерноземной зоне. Суммарное водопотребление является важным параметром в мелиоративных исследованиях и используется при расчете режима орошения сельскохозяйственных культур.

Установлением зависимостей между суммарным водопотреблением сельскохозяйственных культур и метеорологическими характеристиками в России занимались такие исследователи, как А.М. Алпатыев [1], А.И. Голованов, В.В. Пчёлкин, М.М.А. Абдельазим [2], Н.В. Данильченко [3], Н.Н. Дубенок, Г.В. Ольгаренко, Р.В. Калининченко [4], Г.К. Льгов [5], Е.В. Мелихова [6], Дж. Монтейта [7], И.В. Ольгаренко, М.С. Эфендиев, И.В. Ольгаренко, М.С. Эфендиев [8], В.В. Пчёлкин [9-12] и др. Среди иностранных исследований известны работы таких ученых, как М.А. Aboamara, S.M. Aly, Y.M. Aha [13], R.G. Allen, L.S. Pereira [14], K. Djaman, K. Koudahe, M. Sall, I. Kabenge, D. Rudnick, S. Irmak, G.E. Greaves, Y.M. Wang [15], E. Farg, S.M. Arafat, M.S. Abd El-Wahed, A.M. El-Gindy [16], G.E. Greaves, Y.M. Wang, Yield Response [17], H.L. Penman, [16], T.K. Zin El-Abedin [18] и др.

Обзор источников литературы показал, что единой универсальной формулы по определению

суммарного водопотребления белокочанной поздней капусты с учетом испаряемости при капельном способе полива и глубоком залегании грунтовых вод в южно-таежной подзоне не существует. В этой связи были проведены исследования, на основании которых получена формула для расчета суммарного водопотребления белокочанной поздней капусты с использованием испаряемости. К данной зависимости получены коэффициент ($K_{пер.}$) связи испарения с водной поверхностью с потенциальным водопотреблением, а также биологические коэффициенты ($K_{биол.}$) и коэффициенты ($K_{в.}$), учитывающие снижение влажности почвы ниже оптимальных значений.

Цель исследований: определение водопотребления белокочанной поздней капусты на основе испаряемости при капельном поливе.

Материалы и методы исследований. Южно-таежная подзона более чем на 50% расположена на дерново-подзолистых почвах. Благоприятный климат и орошение в этой подзоне способствуют интенсивному развитию земледелия. В Московской области орошаемые земли составляют 139, 5 тыс. га [6]. При этом доля овощей, выращенных на орошаемых землях, составляет 75%, а кормовых культур – 25%. Дальнейшее развитие интенсификации сельскохозяйственного производства овощей будет связано с более широким применением капельного способа полива.

Климат и почвы. Южно-таежная подзона имеет умеренно-теплый и неустойчивый по влажности климат. Дефицит влаги в почве наблюдается в течение 4...30 суток. Основные метеорологические показатели представлены таблице 1.

В период проведения исследований (май-сентябрь) среднесуточная температура воздуха в 2022 г. составила $18,1^{\circ}\text{C}$, а в 2023 г. – $15,9^{\circ}\text{C}$, причем осадков выпало 205 и 246 мм

Таблица 1. Основные метеорологические показатели в южно-таежной подзоне

Table 1. Main meteorological indicators in the southern taiga subzone

Осадки за год, мм <i>Precipitation for the year, mm</i>	Сумма среднесуточные значения активных температур воздуха, $^{\circ}\text{C}$ <i>Sum of average daily values of active air temperatures, $^{\circ}\text{C}$</i>	Продолжительность безморозного периода, сут <i>Duration frost-free period, days</i>
550...650	1700...2400	110...140

соответственно. Таким образом, 2022 г. был теплым и засушливым, а 2023 г. по данным показателям был средним.

Дерново-подзолистые почвы содержат небольшое количество азота, фосфора и кальция. При этом показатель гумуса составляет менее 2%, а pH – 4,0...5,5, то есть данные почвы имеют повышенную кислотность.

В естественном состоянии дерново-подзолистые почвы имеют малую биологическую активность. Гранулометрическая структура почвы опытного участка состоит из среднесуглинистых отложений.

Водно-физические и агрохимические свойства почв опытного участка. Плотность ненарушенной структуры почвы составляет 1,37...1,80 т/м³, а плотность ее твердой фазы – 2,40...2,70 т/м³. Порозность почвы составляет 0,46...0,38 в долях от объема, м³/м³. Величина полной влагоемкости (ПВ) составляет 0,42...0,35 м³/м³, а наименьшая влагоемкость (НВ) – 0,38...0,35 м³/м³.

Значение порозности, полной влагоемкости (ПВ) и наименьшей влагоемкости (НВ) в расчетном слое почвы принята равной: пористость – 0,46; ПВ – 0,42; НВ – 0,38 м³/м³ [10]. Максимальная и минимальная граница гигроскопичности имеет параметры 0,05...0,10 м³/м³. Скорость перетекания воды через почву при ее полном насыщении и единичном градиенте напора (коэффициент фильтрации почвы) в расчетном слое (0,4 м) составляет 0,22 м/сут., а на глубине 0,8 м – 0,43 м/сут.

Гумус объекта исследований находится в пределах 1,09...3,71%, при этом среднее значение составляет 2,4%. Почва участка исследований является близкой к нейтральной в среднем (Ph = 7,2) и слабо изменяется (в диапазоне 6,6...7,8). Почва опытного участка имеет повышенную обеспеченность подвижным фосфором P₂O₅ (185...215 мг/кг) и низкую – подвижным калием (K₂O 52...86).

Исследования проводились в 2022-2023 гг. на территории Сергиево-Посадского городского округа Московской области на дерново-подзолистых почвах [7].

Опыты были размещены на четырех делянках в трехкратной повторности. Площадь отдельно взятой делянки составляла 50 м². Делянки представляли собой варианты, на которых моделировались различные интервалы влажности почвы. Интервалы относительной влажности почвы на вариантах представлены в таблице 2.

Ежегодная норма внесения удобрений в почву составила N₉₀P₁₀₀K₉₀ [7].

Один раз в 3 года вносили торфонавозные компосты из расчета 30 т/га. Орошение осуществлялось с помощью системы капельного полива [7]. Измерение влажности почвы осуществляли в слое 0...0,5 м через 0,1 м по глубине в 5 точках прибором HH2-SM300 (DELTA-T DEVICES LTD).

Обработку опытных данных производили методом регрессивного и корреляционного анализа с использованием стандартных компьютерных программ. Суммарное водопотребление белокочанной поздней капусты получали с помощью водобалансовых лизиметров. Применялись круглые металлические лизиметры высотой 1,8 м и диаметром 1,6 м. Способ строительства лизиметров, разработанный В.В. Пчелкиным и Н.П. Буниной [9], позволил установить лизиметры с монолитом почвы ненарушенной структуры. Агрохимические и водно-физические показатели определялись в специализированной лаборатории [7].

Расчет водопотребления белокочанной поздней капусты. Суммарное водопотребление белокочанной поздней капусты получали с помощью круглых металлических лизиметров [11]. Уравнение водного баланса зоны аэрации лизиметров и делянок в слое 0,5 м имеет следующий вид, мм:

$$\delta\omega = P + m \pm g - E_i, \quad (1)$$

где $\delta\omega = \omega_k - \omega_n$ – влагозапасы почвы в зоне аэрации лизиметров, слое 0,5 м делянок в конце пентады ω_k и в ее начале ω_n ; P – дождевые осадки; m – поливная норма; g – влагообмен в зоне аэрации лизиметров и слоя почвы 0,5 м делянок с нижерасположенными слоями; g – переток влаги из зоны аэрации лизиметров и слоя 0,5 м делянок в нижерасположенные слои; g – подпитывание зоны аэрации лизиметров и слоя почвы 0,5 м со стороны нижерасположенных слоев; E_i – суммарное водопотребление белокочанной поздней капусты.

Таблица 2. Интервалы относительной влажности почвы на вариантах

Table 2. Ranges of relative soil moisture in the variants

Номер делянки / Plot number	Варианты / Options	Интервалы влажности почвы / Soil moisture intervals
1	1	0,7...0,8 НВ
2	2	0,8...0,9 НВ
3	3	0,9...1,0 НВ
Контроль / Control	4	Без полива / No watering

Составляющие водного баланса лизиметров $\delta\omega$, P , m , g измеряли в период проведения опыта, а E_i определяли как неизвестное в уравнении (1).

Потенциальное суммарное испарение белокочанной поздней капусты рассчитывали по формуле (2) В.В. Пчёлкина (2003) [10]:

$$E_p = a \sum_{i=1}^{np} d_{si}^b, \quad (2)$$

где E_p – потенциальное суммарное испарение белокочанной поздней капусты, мм/пент.; a , b – коэффициенты уравнения регрессии, зависящие от природно-климатической зоны, типа почвы и вида растений; np – количество пентад за период вегетации белокочанной поздней капусты; $\sum d_{si}$ – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха в i пентаду периода роста и развития белокочанной поздней капусты, мб/пент.

Результаты и их обсуждение. Ряд эмпирических формул устанавливает связь суммарного испарения с дефицитом влажности воздуха

и другими метеорологическими факторами. Отдельные метеорологические станции проводят измерение испарения с водной поверхности, применяемое в зависимостях Х.Л. Пенмана [14] и др. Однако, чтобы увязать испаряемость с суммарным водопотреблением конкретной культуры, нужно иметь следующие коэффициенты: K_{pp} , K_δ , K_B .

Для расчета суммарного водопотребления авторами была предложена следующая формула [12]:

$$E_{pp} = K_{pp} K_\delta K_B E_o, \quad (3)$$

где E_o – испарение с водной поверхности (испаряемость), мм/пент.; E_{pp} – суммарное водопотребление при возделывании белокочанной поздней капусты, мм/пент.; K_{pp} – коэффициенты перехода испаряемости к потенциальному водопотреблению белокочанной поздней капусты; K_δ – биологические коэффициенты белокочанной поздней капусты; K_B – коэффициенты, учитывающие понижение влажности почвы ниже оптимальных значений для белокочанной поздней капусты.

Таблица 3. Результаты расчета (E_o), (E_p) и (K_{pp}) для белокочанной поздней капусты

Table 3. Results of calculation of (E_o), (E_p) and (K_{pp}) for late white cabbage

Месяц <i>Month</i>	Пентады <i>Pentads</i>	Годы / Years							
		2022				2023			
		d_s , мб/пент <i>mb / pent</i>	E_o , мм/пент. <i>mm / pent</i>	E_p , мм/пент. <i>mm / pent</i>	K_{pp}	d_s , мб/пент. <i>mb / pent</i>	E_o , мм/пент. <i>mm / pent</i>	E_p , мм/пент. <i>mm / pent</i>	K_{pp}
VI	3	39	21,5	16,5	0,77	33	18,3	14,8	0,81
	4	43	23,7	17,6	0,74	35	19,4	15,4	0,79
	5	56	30,8	20,9	0,68	30	16,6	13,9	0,84
	6	62	34,1	22,4	0,66	26	14,4	12,6	0,88
VII	1	74	40,5	25,2	0,62	42	23,2	17,3	0,74
	2	58	31,9	21,4	0,67	34	18,8	15,1	0,80
	3	68	37,3	23,8	0,64	18	10,0	9,9	0,99
	4	48	26,4	18,9	0,72	23	12,8	11,6	0,91
	5	57	31,3	21,2	0,68	23	12,8	11,6	0,91
	6	89	48,7	28,4	0,58	23	12,8	11,6	0,91
VIII	1	53	29,2	20,2	0,69	34	18,8	15,1	0,80
	2	26	14,4	12,6	0,88	39	21,5	16,5	0,77
	3	40	22,1	16,8	0,76	23	12,8	11,6	0,91
	4	56	30,8	20,9	0,68	26	14,4	12,6	0,88
	5	66	36,2	23,3	0,64	29	16,1	13,6	0,84
	6	58	31,9	21,4	0,67	29	16,1	13,6	0,84
IX	1	37	20,5	15,9	0,78	25	13,9	12,3	0,88
	2	37	20,5	15,9	0,78	19	10,6	10,3	0,97
	3	27	15,0	12,9	0,86	30	16,6	13,9	0,84
	4	26	14,4	12,6	0,88	28	15,5	13,3	0,86
	5	17	9,5	9,5	1,00	25	13,9	12,3	0,88
	6	11	6,2	7,2	1,16	19	10,6	10,3	0,97
X	1	7	3,9	5,3	1,36	16	8,9	9,2	1,03
	2	18	10,0	9,9	0,99	5	2,8	4,3	1,53
	3	17	9,5	9,5	1,00	16	8,9	9,2	1,03
	4	5	2,8	4,3	1,53	9	5,1	6,3	1,23

$K_{\text{рп}}$ следует рассчитывать по формуле:

$$K_{\text{рп}} = E_{\text{р}} / E_0. \quad (4)$$

Испаряемость за пентадные периоды рекомендуется определять по формуле (5) [8]:

$$E_0 = a_1 d_s^{n_1}, \quad (5)$$

где a_1 , n_1 – коэффициенты уравнения регрессии ($a_1 = 0,58$; $n_1 = 0,99$); d_s – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха, мм/пент.

Потенциальное суммарное водопотребление белокочанной поздней капусты при оптимальной влажности почвы за пентадные периоды следует определять по формуле (6) [6]:

$$E_0 = a_2 d_s^{n_2}, \quad (6)$$

где E_0 – потенциально возможное суммарное водопотребление для белокочанной капусты, мм/пент.; a_2 , n_2 – коэффициенты уравнения регрессии, учитывающие климатическую зону и почвы ($a_2 = 1,47$; $n_2 = 0,65$).

Результаты расчета (E_0), ($E_{\text{р}}$) и ($K_{\text{рп}}$) для белокочанной поздней капусты представлены в таблице 3.

Биологические коэффициенты для белокочанной поздней капусты были получены ранее в работе [6] и представлены в таблице 4.

Значения $E_{\text{рп}}$ и $E_{\text{рф}}$, рассчитанные по формулам (3) и (7), и испаряемость E_0 для белокочанной поздней капусты представлены в таблице 4:

$$E_{\text{рф}} = K_6 a_2 d_s^{n_2}. \quad (7)$$

Закономерность изменения $K_{\text{рп}}$ от испаряемости (E_0) при выращивании белокочанной поздней капусты в условиях капельного полива показана на рисунке 1.

Из данных рисунка 1 следует, что закономерность изменения $K_{\text{рп}}$ от испаряемости (E_0) при выращивании белокочанной поздней капусты

Таблица 4. Результаты расчета по формулам (3) и (7) $E_{\text{рп}}$ и $E_{\text{рф}}$, биологические коэффициенты K_6 , и испаряемость E_0 для белокочанной поздней капусты

Table 4. Results of calculation according to formulas (3) and (7) $E_{\text{рп}}$ and $E_{\text{рф}}$, biological coefficients K_6 , and evaporation E_0 for white late cabbage

Месяц Month	Пентады Pentads	2022				2023			
		K_6	$E_{\text{рф}}$	$E_{\text{рп}}$	E_0	K_6	$E_{\text{рф}}$	$E_{\text{рп}}$	E_0
VI	3	0,7	16,5	11,6	21,5	0,7	14,8	10,4	18,3
	4	0,78	17,6	13,7	23,7	0,78	15,4	12,0	19,4
	5	0,85	20,9	17,8	30,8	0,85	13,9	11,9	16,6
	6	0,90	22,4	20,3	34,1	0,90	12,6	11,4	14,4
VII	1	0,95	25,2	23,9	40,5	0,95	17,3	16,3	23,2
	2	1	21,4	21,4	31,9	1	15,1	15,0	18,8
	3	1	23,8	23,9	37,3	1	9,9	9,9	10,0
	4	1	18,9	19,0	26,4	1	11,6	11,6	12,8
	5	1	21,2	21,3	31,3	1	11,6	11,6	12,8
	6	1	28,4	28,3	48,7	1	11,6	11,6	12,8
VIII	1	1	20,2	20,2	29,2	1	15,1	15,0	18,8
	2	1	12,6	12,7	14,4	1	16,5	16,6	21,5
	3	1	16,8	16,8	22,1	1	11,6	11,6	12,8
	4	1	20,9	20,9	30,8	1	12,6	12,7	14,4
	5	1	23,3	23,2	36,2	1	13,6	13,5	16,1
	6	1	21,4	21,4	31,9	1	13,6	13,5	16,1
IX	1	1	15,9	16,0	20,5	1	12,3	12,2	13,9
	2	1	15,9	16,0	20,5	1	10,3	10,3	10,6
	3	1	12,9	12,9	15,0	1	13,9	13,9	16,6
	4	1	12,6	12,7	14,4	1	13,3	13,3	15,5
	5	0,98	9,5	9,3	9,5	0,98	12,3	12,0	13,9
	6	0,97	7,2	7,0	6,2	0,97	10,3	10,3	10,6
X	1	0,96	5,3	5,1	3,9	0,96	9,2	8,8	8,9
	2	0,94	9,9	9,3	10,0	0,94	4,3	4,0	2,8
	3	0,91	9,5	8,7	9,5	0,91	9,2	8,3	8,9
	4	0,86	4,3	3,7	2,8	0,86	6,3	5,4	5,1

Таблица 5. Связь испаряемости (E_0) с коэффициентом перехода ($K_{\text{рп}}$) и относительной влажности почвы ($W_{\text{от}}$) с коэффициентом ($K_{\text{в}}$)

Table 5. Relationship of evaporation (E_0) with transition coefficients ($K_{\text{рп}}$) and relative soil moisture ($W_{\text{от}}$) with coefficient ($K_{\text{в}}$)

E_0 , мм/дек / E_0 , mm/dec	$K_{\text{рп}}$	$W_{\text{от}}$	$K_{\text{в}}$
3	1,5	0,45	0,25
5	1,22	0,50	0,34
10	0,99	0,55	0,54
15	0,87	0,60	0,73
20	0,79	0,65	0,90
25	0,72	0,70 и более	1
30	0,69	–	–
35	0,66	–	–
40	0,61	–	–
45	0,60	–	–
50	0,59	–	–

в условиях капельного полива имеет сильную плотность данной связи, которая составляет $0,9997 \pm 0,00447$.

На основании проведенных исследований в работе авторов [6] установлено влияние относительной влажности почвы ($W_{\text{от}} = W/HB$) на суммарное водопотребление ($E_i/E_{\text{max}} = K_{\text{в}}$).

В таблице 5 для практического пользования представлены данные связи испаряемости (E_0) с коэффициентом перехода ($K_{\text{рп}}$)

и относительной влажности почвы ($W_{\text{от}}$) с коэффициентом ($K_{\text{в}}$).

По формулам (3), (7) рассчитаны величины $E_{\text{рп}}$ и $E_{\text{рф}}$ и построен график связи этих значений (рис. 2).

Коэффициент корреляции связи значений, рассчитанных по формулам (3) и (7), равен $0,975 \pm 0,0315$, что показывает сильную связь между $E_{\text{рп}}$ и $E_{\text{рф}}$. Из этого следует, что формулу (3) можно использовать при расчете водопотребления белокочанной поздней капусты.

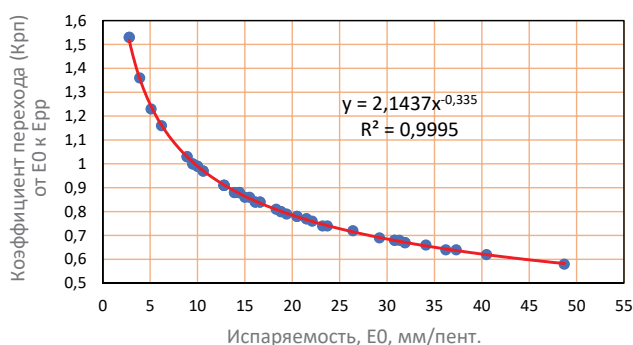


Рис. 1. Закономерность изменения $K_{\text{рп}}$ в зависимости от испаряемости (E_0) при выращивании белокочанной поздней капусты в условиях капельного полива

Fig. 1. Regularity of changes in $K_{\text{рп}}$ from evaporation (E_0) when growing white late cabbage under drip irrigation conditions

Выводы

В 2022-2023 гг. были проведены исследования на территории Сергиево-Посадского городского округа Московской области, позволившие получить формулу для расчета суммарного

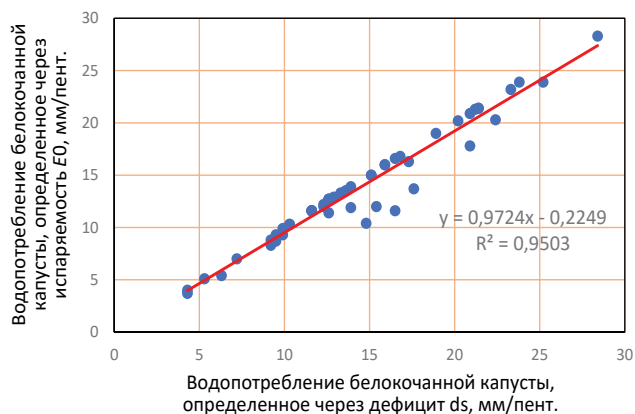


Рис. 2. Связь величин $E_{\text{рп}}$ и $E_{\text{рф}}$, рассчитанных по формулам (3) и (7)

Fig. 2. Relationship between the $E_{\text{рп}}$ and $E_{\text{рф}}$ values calculated according to formulas (3) and (7)

водопотребления белокочанной поздней капусты с использованием испаряемости в рассматриваемых условиях. К данной зависимости получены коэффициенты $K_{\text{рп}}$ перехода от испаряемости к потенциальному суммарному испарению.

Доказана правомерность использования в формуле (3) ранее определенных биологических коэффициентов K_6 и коэффициентов $K_в$, учитывающих снижение влажности почвы ниже оптимальных величин для белокочанной поздней капусты на дерново-подзолистых почвах при капельном способе полива.

Фирмам по проектированию гидромелиоративных систем рекомендуется использовать формулу (3) при расчете суммарного

водопотребления белокочанной поздней капусты на дерново-подзолистых почвах при капельном способе полива.

Сельскохозяйственным предприятиям следует использовать результаты проведенных исследований для расчета эксплуатационного режима орошения.

В дальнейшем предполагается проводить опыты с иными культурами и с применением других способов орошения.

Список использованных источников

1. Алпатьев А.М. К обоснованию формирования поливных норм с использованием биоклиматического метода расчета суммарного испарения / А.М. Алпатьев, В.П. Остапчик // Мелиорация и водное хозяйство. 1971. Вып. 19. С. 13-17.
2. Голованов А.И. Связь испарения с водной поверхности с водопотреблением сельскохозяйственных культур на осушаемых пойменных землях / А.И. Голованов, В.В. Пчелкин, М.М.А. Абдельазим // Природообустройство. 2012. № 3. С. 16-20.
3. Данильченко Н.В. Методические особенности расчета оросительных норм с.-х. культур в НЧЗ РСФСР. / В кн.: Техника и технология механизированного орошения. М.: 1982. с. 177-186.
4. 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. 6-10.
5. Льгов Г.К. Орошение сельскохозяйственных культур центральной части Северного Кавказа. Нальчик, 1980. 104 с.
6. Мелихова Е.В. Моделирование и обоснование ресурсосберегающих параметров капельного орошения при возделывании корнеплодов: монография / Е.В. Мелихова. Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2017. 112 с.
7. Монтейт Дж.Л. (1965). «Испарение и окружающая среда» (PDF) // Симпозиум общества экспериментальной биологии. 19: 205-234. PMID 5321565.
8. Ольгаренко И.В. Суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур в условиях дефицита водных ресурсов // Мелиорация и водное хозяйство / И.В. Ольгаренко, М.С. Эфендиев // Материалы научно-практической конференции: Сборник научных трудов. Новочеркасск: «Лик», 2016. С. 50-53.
9. Пчелкин В.В. Водопотребление белокочанной капусты при капельном поливе в Нечерноземной зоне России / В.В. Пчелкин, Е.А. Попова, С.О. Владимиров // Научная жизнь. 2025. Т. 20. № 1 (139). С. 12-20.
10. Пчелкин В.В. Влияние водного режима дерново-подзолистых почв на урожайность белокочанной капусты при капельном поливе / В.В. Пчелкин, Е.А. Попова, А.Д. Солошенко // Научная жизнь. 2024. Т. 19. № 3 (135). С. 380-387.
11. Пчелкин В.В. Расчет водопотребления красного клевера с использованием испарения с водной поверхности в условиях нечерноземной зоны / В.В. Пчелкин, А.М. Сергеева // Природообустройство. 2022. № 5. С. 28-35.
12. Авторское свидетельство № 1631421 СССР, МПК G01N33/24. Способ строительства монолитного лизиметра:

References

1. Alpatiev A.M. To the substantiation of the formation of irrigation norms with the use of the bioclimatic method of calculation of total evaporation / A.M. Alpatiev, V.P. Ostapchik // Melioration and water management. 1971. Issue 19. P. 13-17.
2. Golovanov A.I. The Relationship between Evaporation from the Water Surface and Water Consumption by Crops on Drained Floodplain Lands / A.I. Golovanov, V.V. Pchelkin, M.M.A. Abdelazim // Prirodoobustroystvo. 2012. No. 3. P. 16-20.
3. Danilchenko N.V. Methodological Features of Calculating Irrigation Rates for Agricultural Crops in the Nizhny Novgorod Region of the RSFSR. In the book: Technique and Technology of Mechanized Irrigation. Moscow, 1982, P. 177-186.
4. 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. 6-10.
5. Lgov G.K. Irrigation of Agricultural Crops in the Central Part of the North Caucasus. – Nalchik, 1980. 104 p.
6. Melikhova E.V. Modeling and Justification of Resource-Saving Parameters of Drip Irrigation in the Cultivation of Root Vegetables: Monograph / E.V. Melikhova. Volgograd: Volgograd State Agrarian University, 2017. 112 p.
7. Montague J.L. (1965). "Evaporation and the Environment" (PDF) // Symposium of the Society for Experimental Biology. 19: 205-234. PMID5321565.
8. Olgarenko I.V., Efendiev M.S. Total water consumption of crops in conditions of water resources deficit // Melioration and water management / I.V. Olgarenko, M.S. Efendiev // Materials of scientific and practical conference: Collection of scientific papers. Novocheerkassk: «LIK», 2016. P. 50-53.
9. Pchelkin V.V. Water consumption of white cabbage under drip irrigation in the Non-Chernozem zone of Russia / V.V. Pchelkin, E.A. Popova, S.O. Vladimirov // Scientific life. 2025. V. 20. No. 1 (139). P. 12-20.
10. Pchelkin V.V., Popova E.A., Soloshenkov A.D. The effect of water regime of sod-podzolic soils on the yield of white cabbage under drip irrigation / V.V. Pchelkin, E.A. Popova, A.D. Soloshenkov // Scientific life. 2024. V. 19. No. 3 (135). P. 380-387.
11. Pchelkin V.V., Sergeeva A.M. Calculation of red clover water consumption using evaporation from the water surface in the conditions of the non-chernozem zone / V.V. Pchelkin, A.M. Sergeeva // Prirodoobustroystvo. 2022. No. 5. P. 28-35.
12. Method of construction of a monolithic lysimeter: No 4495053/15: application. 12.10.1988: publ. 28.02.1991 / Pchelkin V.V., Bunina N.P.; applicant MGMI. 3 p. 3 с.

№ 4495053/15: заявл. 12.10.1988: опубл. 28.02.1991 / Пчелкин В.В., Бунина Н.П.; заявитель МГМИ. 3 с.

13. Aboamera M.A., Aly S.M., Aha Y.M. Water relation of pepper grown in polymer treated sandy soil under drip irrigation system // *Misr J. Ag. Eng.* 2000. № 17(1). P. 125-147.

14. Allen, R.G.; Pereira, L.S. Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements). *FAO Rome* 1998, 300, D05109. [Google Scholar]

15. Farg, E.; Arafat, S.M.; Abd El-Wahed, M.S.; El-Gindy, A.M. Estimation of Evapotranspiration ET_c and Crop Coefficient K_c of Wheat, in South Nile Delta of Egypt Using Integrated FAO-56 Approach and Remote Sensing Data. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* 2012, 15, 83-89.

16. Penman, H.L. (1948) Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London, 193, 120-145.

17. Steven R. Evett, Kenneth C. Stone, Robert C. Schwartz, Susan A. O'Shaughnessy, Paul D. Colaizzi, Scott K. Anderson & David J. Anderson Resolving discrepancies between laboratory-determined field capacity values and field water content observations: implications for irrigation management // *Irrigation Science* volume. 2019 № 37. Pp. 751-759.

18. Zin El-Abedin T.K. Improving moisture distribution pattern of subsurface drip irrigation in sandy soil by using synthetic soil conditioner // *Misr J. Ag. Eng.* 2006.

13. Aboamera M.A., Aly S.M., Aha Y.M. Water relation of pepper grown in polymer treated sandy soil under drip irrigation system // *Misr J. Ag. Eng.* 2000. № 17(1). P. 125-147.

14. Allen, R.G.; Pereira, L.S. Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements). *FAO Rome* 1998, 300, D05109. [Google Scholar]

15. Farg, E.; Arafat, S.M.; Abd El-Wahed, M.S.; El-Gindy, A.M. Estimation of Evapotranspiration ET_c and Crop Coefficient K_c of Wheat, in South Nile Delta of Egypt Using Integrated FAO-56 Approach and Remote Sensing Data. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* 2012, 15, 83-89.

16. Penman, H.L. (1948) Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London, 193, 120-145.

17. Steven R. Evett, Kenneth C. Stone, Robert C. Schwartz, Susan A. O'Shaughnessy, Paul D. Colaizzi, Scott K. Anderson & David J. Anderson Resolving discrepancies between laboratory-determined field capacity values and field water content observations: implications for irrigation management // *Irrigation Science* volume. 2019 № 37. P. 751-759.

18. Zin El-Abedin T.K. Improving moisture distribution pattern of subsurface drip irrigation in sandy soil by using synthetic soil conditioner // *Misr J. Ag. Eng.* 2006.

Об авторах

Виктор Владимирович Пчелкин, д-р техн. наук, профессор кафедры «Сельскохозяйственных мелиораций»; 9766793@mail.ru; ORCID ID:0000-0003-3625-9949

Екатерина Александровна Попова, аспирант кафедры «Сельскохозяйственных мелиораций», ORCID ID: 0000-0002-5281-4714; Researcher ID: AAE-6824-2022; kkk97@list.ru

About the authors

Victor V. Pchelkin, DScs (Eng), professor of the department "Agricultural land reclamations", 9766793@mail.ru; ORCID ID: 0000-0003-3625-9949

Ekaterina A. Popova, post-graduate student of the department "Agricultural land reclamations"; ORCID ID: 0000-0002-5281-4714; Researcher.N. KostyakovID: AAE-6824-2022; kkk97@list.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Пчелкин В.В., Попова Е.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

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

Статья поступила в редакцию / The article was received at the editorial office on 04.07.2025

Одобрена после рецензирования / Accepted after peer review on 13.10.2025

Принята к публикации после доработки / Approved for publication on 13.10.2025

V.V. Pchelkin, E.A. Popova carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-63-70>

УДК 626.823.91



ДЕФЕКТЫ БЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ МЕЛИОРАТИВНЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ И МЕТОДЫ ИХ РЕМОНТА

Х.А. Абдулмажидов^{1✉}, В.И. Балабанов², О.В. Мареева³, И.И. Попов⁴, И.В. Белов⁵

^{1,2,3,4,5} ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 19, корп. 28, Россия\

¹ <https://orcid.org/0000-0002-7699-4799>; abdulmajidov@rgau-msha.ru

² <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; vbalabanov@rgau-msha.ru

³ <https://orcid.org/0000-0002-7441-2169>; o.mareeva@rgau-msha.ru

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-0860-4311>; i.popov@rgau-msh a.ru

⁵ <https://orcid.org/0000-0002-7562-514X>; bivik.1995@yandex.ru

Аннотация. Эксплуатация оросительных мелиоративных систем в южных регионах страны с каналами, сформированными в земляном теле, сопровождается большими потерями воды на фильтрацию. Цель исследований – изучение состояния бетонных покрытий оросительных каналов и выяснение оптимальных способов ликвидации выявленных дефектов. Величина потерь влаги может достигать на некоторых участках до 5...15% от величины забора воды из водного источника. Такое количество фильтрационной воды может негативно влиять на окружающие земли, вызывая на них частичное подтопление, появление условий для возникновения болотистых участков, засоление территорий, что в итоге приводит к снижению плодородия почв для выращивания растений. Одним из способов решения проблемы фильтрации воды из каналов является их строительство с формированием защитного бетонного слоя или применение бетонных плит. Исследование состояния существующих мелиоративных каналов показывает наличие разнообразных дефектов в их конструкциях, возникших в процессе длительной эксплуатации мелиоративной системы. Основными дефектами являются: разрушение соединительных швов бетонных плит; сползание бетонных плит на дно канала; деформации бетонных конструкций, нарушающие расчетное поперечное сечение канала. В гидромелиоративном и гидротехническом строительстве при формировании ответственных нагруженных конструкций в водной среде преимущественно применялись бетоны с высокой прочностью и водонепроницаемостью, и эти конструкции эффективно все еще функционируют. Следует отметить, что на мелиоративных системах имеются и конструкции, менее нагруженные, сформированные из бетонов меньшей прочности, которые с течением времени в процессе эксплуатации вышли из строя. Элементами, выполненными из таких бетонов, являются соединительные швы бетонных плит, участки стыков оснований бетонных покрытий и т.п. Наибольшее применение при строительстве и реконструкции покрытий оросительных каналов находят монолитные и железобетонные облицовки, конструкции и экраны с использованием полимерных пленок. Такие пленки могут быть установлены на бетонную или грунтовую основу дна и откосов каналов.

Ключевые слова: мелиоративные оросительные каналы, фильтрация в каналах, бетонные покрытия в каналах, защитные экраны каналов, виды дефектов бетонных покрытий каналов, способы и материалы для восстановления бетонных покрытий, восстановление элементов мелиоративных систем

Формат цитирования: Абдулмажидов Х.А., Балабанов В.И., Мареева О.В., Попов И.И., Белов И.В. Оценка состояния бетонных покрытий оросительных каналов на наличие дефектов и выбор методов для их устранения // Природообустройство. 2025. № 5. С. 63-70. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-63-70>

Original article

DEFECTS IN CONCRETE PAVEMENTS OF RECLAMATION IRRIGATION CANALS AND METHODS OF THEIR REPAIR

Kh.A. Abdulmazhidov^{1✉}, V.I. Balabanov, O.V. Mareeva, I.I. Popov, I.V. Belov¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Pryanishnikova str., 19, bldg. 28, Russia^{1.1} <https://orcid.org/0000-0002-7699-4799>; abdulmajidov@rgau-msha.ru^{1.2} <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; vbabanov@rgau-msha.ru^{1.3} <https://orcid.org/0000-0002-7441-2169>; o.mareeva@rgau-msha.ru^{1.4} <https://orcid.org/0000-0003-0860-4311>; i.popov@rgau-msh.a.ru^{1.5} <https://orcid.org/0000-0002-7562-514X>; bivik.1995@yandex.ru

Abstract. The operation of irrigation reclamation systems in the southern regions of the country with canals formed in the earthen body is accompanied by large losses of water for filtration. The value of moisture losses can reach up to 10 ... 20% of the amount of water intake from a water source. Such an amount of seepage water can negatively affect the surrounding lands, causing flooding on them, the emergence of conditions for the emergence of swampy areas, salinization of territories, which ultimately leads to a decrease in soil fertility for growing plants. One of the ways to solve the problem of water filtration from canals is to build them with the formation of a protective concrete layer or to use concrete slabs. The study of the state of the existing reclamation canals shows the presence of various defects in their structures that have arisen in the process of long-term operation of the reclamation system. The main defects are: destruction of the connecting joints of concrete slabs; sliding of concrete slabs to the bottom of the canal; deformation of concrete structures, violating the design cross-section of the channel. In hydro-reclamation and hydraulic engineering, in the formation of critical loaded structures in the water environment, concretes with high strength and water tightness were mainly used, and these structures are still effectively functioning. It should be noted that on reclamation systems there are also structures that are less loaded, formed from concretes of lower strength, which have failed over time in the course of operation. The elements made of such concretes are the connecting joints of concrete slabs, areas of joints of the bases of concrete pavements, etc. Such films can be installed on the concrete or soil base of the bottom and slopes of canals.

Keywords: reclamation irrigation canals, filtration in canals, concrete coatings in canals, protective screens of canals, types of defects in concrete canal coatings, methods and materials for restoration of concrete pavements, restoration of elements of reclamation systems

Citation format: Abdulmazhidov Kh.A., Balabanov V.I., Popov I.I., Mareeva O.V., Belov I.V. Defects in concrete pavements of reclamation irrigation canals and methods of their repair // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 63-70. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-63-70>

Введение. Наиболее часто встречающимися видами дефектов на бетонных покрытиях оросительных каналов являются трещины соединительных швов бетонных плит, сползание бетонных плит, деформация бетонных конструкций. Наличие перечисленных дефектов ведет к повышению фильтрации, потере воды, а также появлению наносов, грунтов и заиления на дне и откосах каналов вследствие размыва на оголенных участках покрытий. Выбор защитных экранов и покрытий оросительных каналов во многом зависит от наиболее экономичных и эффективных конструкций и материалов для строительства определенного участка канала с учетом его характерных грунтовых, гидрогеологических и климатических условий. Для обоснования применения того или иного варианта формирования защитных покрытий важно располагать их характеристиками по надежности. В качестве

достоинств использования жестких бетонных покрытий можно рассматривать их способность обеспечения повышенных скоростей транспортировки воды и снижения зарастания оросительных каналов.

Цель исследований: изучение состояния бетонных покрытий оросительных каналов и выяснение оптимальных способов ликвидации выявленных дефектов.

Задачи:

– исследование состояния бетонных покрытий оросительных каналов с выявлением дефектов, сформировавшихся при длительной эксплуатации мелиоративных систем;

– проектирование, изготовление и применение стенда для исследования – моделей защитных бетонных лотков мелиоративных каналов;

– проведение лабораторных исследований по определению прочности наиболее

распространенных бетонов в зависимости от количества добавляемого пластификатора АСЕ430.

Материалы и методы исследований.

Исследования состояния защитных бетонных покрытий каналов в рамках настоящей работы проводились на мелиоративных оросительных системах Южного федерального округа. Методы исследований заключались: в осмотрах конструкций бетонных плит и защитных экранов; в измерениях величин разрушений стыков и сползания железобетонных плит; в определении площадей оголенных участков поверхности дна и откосов каналов; в выполнении анализа и сравнении полученных результатов исследований с расчетными проектными значениями, а также с требованиями ГОСТ. Для измерения геометрических размеров применялись геодезические рулетки. Для фиксации состояния защитных экранов каналов использовалось фото- и видеоборудование [1-4].

Определение протяженностей участков каналов с бетонными покрытиями различных категорий исследуемой мелиоративной системы осуществлялось с использованием ресурсов онлайн-сервисов компании «Яндекс» [5].

Лабораторные исследования по выбору оптимального класса бетонной смеси для укладки в облицовках оросительных каналов проводились в лаборатории строительных материалов Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Результаты и их обсуждение. Основные работы по проведению исследований были направлены на выявление состояния защитных покрытий и создание новых бетонных смесей при использовании оптимальных составов компонентов. Наиболее прочные бетонные смеси обычно применяются для формирования ответственных конструкций элементов оросительных каналов [6-9]. Исследование данного вопроса представлено также в работах [10-14]. В случаях ремонта менее ответственных деталей и конструкций, когда использование дорогостоящих высокопрочных бетонов нецелесообразно, применяются соответствующие регламенту бетонные смеси. Дефекты бетонных покрытий оросительных каналов, связанные со сползанием установленных на откосах плит и с разрушенными соединительными швами, представлены на рисунке 1.

Исследования состояния бетонных конструкций оросительных каналов проводились в летний период 2025 г. По результатам измерений были выявлены следующие дефекты бетонных конструкций: разрушенные бетонные стыки,

размеры которых составляли от 50 до 100 мм, на соединениях плит, а также полное отсутствие материала стыков на некоторых участках; сползание бетонных плит по откосу на расстояния до 1 м и более; оголение частей откосов на отдельных участках каналов с общей площадью до 10 м² и более.

Возможности ориентировочной оценки состояния дна каналов существовали только в период кратковременных понижений уровня воды в оросительной системе. Определение достоверного состояния бетонных конструкций дна каналов было затруднено наличием воды в канале и наносов на его дне.

Допускаемые потери воды для оросительных каналов регламентируются в соответствии с нормативными значениями КПД (не ниже 0,8...0,9 по СНиП) и определяются по формуле (1):

$$q_{\text{доп}} = \frac{Q(1-\eta)}{\eta}, \quad (1)$$

где Q – расход воды, обеспечиваемый каналом на расстояние 1 км без потерь л/с и определяемый произведением живой площади поперечного сечения канала на скорость воды в канале; η – КПД канала, принимаемый по СНиП.

Ориентировочные значения КПД облицовок определены в процессе их эксплуатации [15] и в зависимости от их типа и имеют следующие значения: бетонные и железобетонные – 0,91...0,96; бетоношпленочные – 0,96...0,98; грунтошпленочные – 0,98...0,99; асфальтобетонные – 0,95...0,97.

Противофильтрационные экраны призваны также обеспечивать пониженный уровень грунтовых вод относительно уровня поверхности земли с учетом критической глубины – с целью исключения подтопления земель.

Необходимость использования антифильтрационных экранов и бетонных покрытий при строительстве и реконструкции оросительных каналов должна быть обоснована технико-экономическими расчетами. В качестве основных показателей различных типов облицовок рассматриваются ориентировочные значения осредненного коэффициента фильтрации 10⁻⁶, см/с, срока службы, лет, и стоимости 1 м² площади, руб. Так, для бетонных монолитных облицовок данные значения равны 3...5, 15...20, 5000...6000 соответственно.

На оросительных каналах мелиоративных систем применяются следующие типы облицовок: бетонные монолитные, железобетонные монолитные, железобетонные сборно-монолитные, железобетонные сборные, бетоношпленочные



Рис. 1. Дефекты покрытий оросительных каналов:

а) сползание бетонных плит; б) разрушение бетонных швов; в) отсутствие бетонных швов

Fig. 1. Defects in the coatings of irrigation canals:

a) sliding of concrete slabs; б) destruction of concrete joints; в) no concrete joints

монолитные, бетоноплочные сборно-монолитные, бетоноплочные сборные, грунтоплочные, асфальтобетонные.

Наилучшими из перечисленных типов антифильтрационных покрытий и облицовок с точки зрения обеспечения эффективности применения будут те, которые поддерживают минимальные фильтрационные потери. С учетом того, что потери воды на фильтрацию сквозь облицовки связаны не только с осредненным коэффициентом фильтрации, но и с величиной напора, его значения увязываются с толщиной облицовки. Оптимальные величины перечисленных характеристик и условий могут обеспечить прежде всего бетоноплочные монолитные облицовки и грунтоплочные экраны. Выбор из двух обозначенных покрытий зависит от экономической целесообразности их применения.

Прочность на сжатие, водонепроницаемость, морозостойкость и другие характеристики бетона являются основой для создания долговечных покрытий. Для поддержания водостойкости защитных покрытий класс бетона по водонепроницаемости принимают не ниже W4.

Из представленных рисунков следует, что в бетонных швах имеются трещины. Причинами возникновения таких трещин являются формирующиеся растягивающие напряжения, которые превышают предел прочности бетона на растяжение. Такие напряжения с учетом перепадов температуры и усадки покрытий на участках незатопленных водой определяются по формуле:

$$\sigma_p = E[\alpha_t \cdot \Delta t + \alpha_{yc}]. \quad (2)$$

При затоплении водой формула (2) принимает вид:

$$\sigma_p = E[\alpha_t \cdot \Delta t + \alpha_{yc} - \alpha_p], \quad (3)$$

где E – модуль упругости при растяжении бетона; Δt – перепад температур; α_{yc} – коэффициент усадки бетона; α_t – коэффициент температурного расширения бетона; α_p – коэффициент разбухания бетона.

Лабораторные исследования касались преимущественно вопросов укладки бетонной смеси на откосы каналов. Основной задачей здесь является обеспечение равномерного распределения свежеприготовленной бетонной смеси по откосу с соблюдением ее уплотнения. С учетом сползания бетонной смеси возникает необходимость формирования такой опалубки, которая обеспечит равномерное распределение ее без появления пор и пустот. Кроме того, выполнение бетонных покрытий больших габаритов для каналов ведет к возникновению значительных внутренних напряжений, поэтому покрытия формируют в виде соединенных посредством бетонных швов монолитных плит. В целом на бетонные покрытия оросительных каналов в процессе их эксплуатации воздействуют нагрузки со стороны воды, льда в зимний период, со стороны соседних плит, которые ведут к возникновению нормальных $\sigma = \frac{F}{A}$ и касательных $\tau = \frac{T_{кр}}{W}$ напряжений.

Кроме того, важной составляющей при исследовании нагруженного состояния бетонных плит является величина их собственного веса, которая в первую очередь приводит к его сползанию на дно. Наличие нормальных напряжений означает возникновение напряжений сжатия $\sigma_{сж}$

и изгиба $\sigma_{изг}$. Процесс растяжения наиболее опасен для бетонных конструкций и их соединительных швов: в итоге он приводит к дефектам бетонных покрытий и оголению грунтов на откосах.

Состояние предлагаемых бетонных смесей на наклонной поверхности, моделирующей откос канала, определялось с помощью специально разработанной авторами конструкции трапециoidalного лотка с возможностью предварительного задания толщины бетонной конструкции (рис. 2).

Проведены серии однофакторных экспериментов по определению зависимости изменения прочности наиболее распространенных бетонов марок (классов) М400 (В30), М500 (В40), М600 (В45), предлагаемых для применения при реконструкции бетонных покрытий оросительных каналов, от количества добавки марки «Суперпластификатор BASF MasterGlenium ACE430», полученного на основе эфира поликарбоксилата с ускорителем набора прочности. Исследования проводились в лаборатории строительных материалов кафедры сельскохозяйственного строительства Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова.

Гипотеза, выдвинутая перед экспериментальными исследованиями, заключалась в том, что прочность бетонных смесей с увеличением количества предлагаемой добавки в заданных пределах будет увеличиваться. Цель исследований заключалась в том, чтобы подтвердить либо опровергнуть данную гипотезу, используя при этом метод наименьших квадратов. В качестве целевой функции при проведении экспериментальных исследований принята прочность бетона. В качестве фактора, влияющего на целевую функцию, принято количество добавляемого пластификатора в указанные бетонные смеси, в опытах равного относительно количества вяжущего вещества 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0% соответственно.

Для обеспечения трехкратной повторности лабораторных исследований формировалось по 3 бетонных кубика (100 × 100 × 100 мм) к каждому опыту с обеспечением необходимых сроков затвердения – 7 дней. Прочность бетонных кубиков определялась при помощи прессы ТП-1-500 с диапазоном измерения от 10 до 500 кН. Исходя из проведенных исследований для выполнения восстановительных работ по бетонным покрытиям оросительных мелиоративных каналов выбирается бетон с максимальными показателями по прочности.

Результаты экспериментальных исследований по бетону марки (класса) В30 (М400) представлены в таблице.

В результате проведенных лабораторных исследований получены кривые зависимости прочности бетона марки (класса) М400 (В30) от количества добавленного пластификатора (рис. 2). Представленные зависимости показывают, что процесс изменения прочности бетона в зависимости от процентного содержания пластификатора ACE430 наиболее адекватно описывается полиномиальной аппроксимацией с уравнением $y = -1,1714x^2 + 7,6429x + 392,63$ и величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9765$.

Для бетонов марок (классов) М500 (В40) и М600 (В45) получены средние значения по прочности – 520 и 580 МПа соответственно. При добавлении пластификатора ACE430 по данным бетонам также наблюдается повышение прочности в пределах 2-3%. Соответственно можно сделать вывод о том, что наибольшей прочностью будет обладать бетон класса В45 при добавлении 2% пластификатора ACE430.

Для исследования процесса формирования бетонных откосов каналов в рамках данной работы в системе Inventor Pro спроектирована и изготовлена в лабораторных условиях конструкция исследовательского стенда, позволяющего формировать модели бетонных лотков мелиоративных

Таблица 1. Полученные данные по прочности бетона марки (класса) М400 (В30) в зависимости от количества пластификатора ACE430

Table 1. Obtained data on the strength of concrete grade (class) М400 (В30) depending on the amount of plasticizer ACE430

Количество пластификатора, добавляемого в бетонную смесь%. <i>Amount of plasticizer added to the concrete mixture%</i>	Прочность P_1 , МПа <i>Strength P_1, MPa</i>	Прочность P_2 , МПа <i>Strength P_2, MPa</i>	Прочность P_3 , МПа <i>Strength P_3, MPa</i>	P средн. МПа <i>Average MPa</i>
М400(В30) +0,0%	392,9	392,8	392,7	392,9
М400(В30) +0,5%	395,8	395,7	395,9	395,8
М400(В30) +1,0%	398,6	398,9	398,3	398,6
М400(В30) +1,5%	402,1	402,9	402,5	402,5
М400(В30) +2,0%	402,8	402,3	403,3	402,8

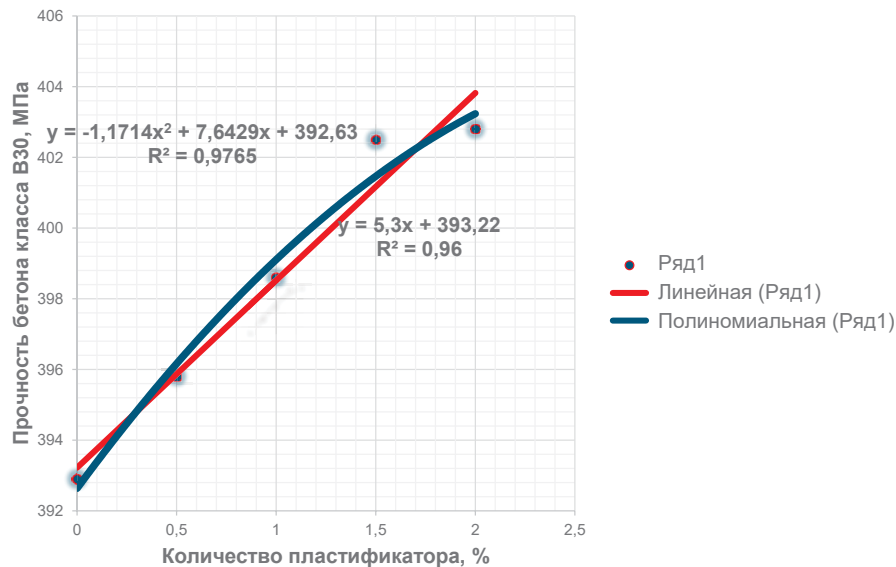


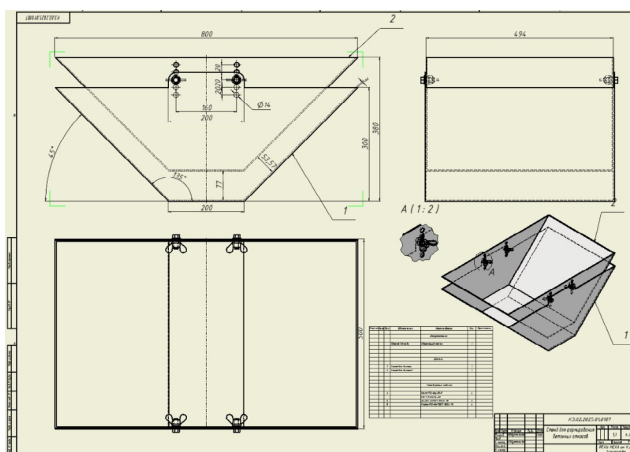
Рис. 2. Кривая зависимости прочности бетона класса В30 от количества добавляемого пластификатора ACE 430 в диапазоне от 0,5 до 2%

Fig. 2. Curve of dependence of the strength of concrete of class В30 on the amount of added plasticizer ACE430 in the range from 0.5 to 2%

каналов с различной толщиной. Кроме того, стенд позволяет проводить исследования по формированию моделей элементов каналов с различными коэффициентами заложения откосов.

С помощью разработанной конструкции испытательного стенда сформированы бетонные лотки трапециевидального профиля различной толщины, а также проведены исследования текучести рассматриваемых бетонных смесей

по качеству наполнения, уплотнения и обеспечения наклонных поверхностей бетонных конструкций. Первые испытания проведены для формирования моделей бетонных лотков с коэффициентом заложения откосов $m = 1:1$. В дальнейших исследованиях планируется спроектировать и изготовить стенды для испытаний лотков с коэффициентом $m = 1:1,5$ с возможностью их плотного стыкового соединения.



а)



б)

Рис. 3. Стенд для формирования и исследования моделей бетонных лотков мелиоративных каналов:

а) чертежи, выполненные в системе Inventor Pro; б) подготовка изготовленного стенда к формовочным испытаниям в лабораторных условиях

Fig. 3. Stand for the formation and study of models of concrete flumes of reclamation canals:

а) drawings made in Inventor Pro system; б) preparation of the manufactured stand for molding tests in laboratory conditions

Выводы

1. Анализ состояния бетонных покрытий каналов показал наличие дефектов

соединительных швов и сползание бетонных плит, которые образовались в процессе длительной эксплуатации мелиоративных систем.

2. В рамках работы спроектирован и изготовлен стенд для исследования моделей защитных бетонных лотков мелиоративных оросительных каналов. Испытания показали целесообразность применения стенда при формировании бетонных откосов каналов с коэффициентом их заложения $m = 1 : 1$.

3. Проведены лабораторные исследования по определению прочности наиболее распространенных бетонов марок (классов) М500 (В40) и М600 (В45) в зависимости от количества добавляемого пластификатора АСЕ430. Результаты исследований показывают увеличение прочности

бетонов при заданных условиях в пределах от 2 до 3%;

4. На основе проведенных исследований в качестве основных рекомендаций организациям, обслуживающим мелиоративные системы, для поддержания качественного функционирования оросительных каналов предлагается обеспечить: своевременный уход за состоянием каналов; проведение технического обслуживания текущего и капитального ремонта с применением разработанных бетонов, соответствующих требуемым классам прочности.

Список использованных источников

1. Вишторский Е.М. Высокофункциональные цементные бетоны для гидротехнического строительства / Е.М. Вишторский, И.В. Белов, А.В. Назарова // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2023. № 1(67). С. 49-53. EDN: MTKTKZ

2. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621941 Российская Федерация. «Машины для приготовления бетонных и растворных смесей»: заявл. 17.04.2025; опублик. 29.04.2025 / Х.А. Абдулмажидов; заявитель ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

3. Гидромелиорация земель и водное хозяйство. Монография. / Х.А. Абдулмажидов, Н.А. Александров, М.С. Али [и др.]. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Мегаполис», 2022. 358 с. ISBN 978-5-6049409-4-5. EDN: HNSMXI

4. Абдразаков Ф.К. Интенсификация мелиоративного производства путем совершенствования технологий реконструкции и строительства оросительных каналов / Ф.К. Абдразаков, А.А. Рукавишников // Мелиорация и водное хозяйство. 2019. № 1. С. 6-9. EDN: SMJWAW

5. <https://yandex.ru/maps/?l=sat%2Cskl&ll=46.134427%2C43.353200&z=19>

6. Панкова Т.А. Материалы, применяемые для облицовки оросительных каналов / Т.А. Панкова, С.С. Орлова, С.В. Затиначий // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2015. № 3(59). С. 202-206. EDN: UIYPVV

7. Абдулмажидов Х.А. Очистка осушительных каналов от наносов / Х.А. Абдулмажидов // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 12 февраля 2015 года. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. С. 18-24. EDN: TYLOJH

8. Арьков Д.П. Конструирование плит для облицовки оросительных каналов мелиоративных систем с применением композитной арматуры / Д.П. Арьков, А.А. Сухов, Д.Н. Никифорова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 12-1(114). С. 119-123. DOI: 10.23670/IRJ.2021.114.12.018

9. Абдразаков Ф.К. Перспективные подходы к ремонту и усовершенствованию облицовки оросительных каналов с применением композитов / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы XIV Национальной конференции

References

1. Vishtorsky E.M. Highly functional cement concretes for hydraulic engineering construction / E.M. Vishtorsky, I.V. Belov, A.V. Nazarova // Bulletin of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. 2023. № 1(67). P. 49-53. EDN: MTKTKZ

2. Certificate of State registration of the database № 2025621941 Russian Federation. "Machines for the preparation of concrete and mortar mixtures": application 04/17/2025; published 04/29/2025 / Kh.A. Abdulmashidov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agraric University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev".

3. Land reclamation and water management / Kh.A. Abdulmashidov, N.A. Alexandrov, M.S. Ali [et al.]. Moscow: Megapolis Limited Liability Company, 2022. 358 p. ISBN 978-5-6049409-4-5. EDN: HNSMXI

4. Abdrazakov F.K. Intensification of land reclamation production by improving technologies for reconstruction and construction of irrigation canals / F.K. Abdrazakov, A.A. Rukavishnikov // Land reclamation and water management. 2019. № 1. P. 6-9. EDN: SMJWAW

5. <https://yandex.ru/maps/?l=sat%2Cskl&ll=46.134427%2C43.353200&z=19>

6. Pankova T.A. Materials used for lining irrigation canals / T.A. Pankova, S.S. Orlova, S.V. Zatinatsky // Ways to increase the efficiency of irrigated agriculture. 2015. № 3(59). P. 202-206. EDN: UIYPVV

7. Abdulmashidov Kh.A. Cleaning of drainage channels from sediments / Kh.A. Abdulmashidov // Land transport and technological complexes and means: Materials of the International Scientific and Technical Conference, Tyumen, February 12, 2015. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 2015. P. 18-24. EDN: TYLOJH

8. Arkov D.P., Sukhov A.A., Nikiforova D.N. Designing plates for lining irrigation channels of reclamation systems using composite reinforcement [et al.] // International Scientific Research Journal. 2021. № 12-1(114). P. 119-123. DOI: 10.23670/IRJ.2021.114.12.018.

9. Abdrazakov F.K. Promising approaches to repairing and improving the lining of irrigation canals using composites / F.K. Abdrazakov, E.E. Safin // Modern problems and prospects for the development of construction, heat and gas supply and energy supply: Proceedings of the XIV National Conference with International Participation, Saratov, April 25-26, 2024. Saratov: Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 2024, P. 271-275. EDN: PPJOOM

с международным участием, Саратов, 25-26 апреля 2024 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2024. С. 271-275. EDN: PPJOOM

10. Жарницкий В.Я. Обоснование линейной математической модели сдвигового течения бетонной смеси под действием силы тяжести по наклонной поверхности откоса / В.Я. Жарницкий, П.А. Корниенко // Природообустройство. 2020. № 1. С. 88-93. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-88-93.

11. Балабанов В.И. Машины для строительства и эксплуатации гидромелиоративных систем / В.И. Балабанов, Н.К. Усманов, И.Ж. Худаев [и др.]. Саратов: Общество с ограниченной ответственностью Амирит, 2023. 278 с. ISBN 978-5-00207-184-5. EDN: TFCSEY

12. Боев О.А. Вопросы реконструкции крупных каналов и оценка их эффективности / О.А. Боев, М.Ю. Косиченко // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11, № 4. С. 287-301. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-287-301. EDN: QMDUPX

13. Гарбуз А.Ю. Выбор композиционных составов, применяемых для ремонта повреждений на каналах / А.Ю. Гарбуз // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2021. № 1(81). С. 37-43. EDN: WWNTKN

14. Туктаров Р.Б. Оценка изменения состояния облицовочных покрытий откосов оросительных каналов, находящихся в процессе длительной эксплуатации / Р.Б. Туктаров, В.П. Мельникова, Р.Д. Пасовец [и др.] // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2019. № 1(73). С. 92-96. EDN: TDVUOS

15. Защитные покрытия оросительных каналов. Монография / В.С. Алтунин, В.А. Бородин, В.Г. Ганчиков, Ю.М. Косиченко. М.: ВО «Агропромиздат», 1988. 162 с. EDN: RVYSFT

10. Zharnitsky V.Ya. Justification of a linear mathematical model of the shear flow of a concrete mixture under the action of gravity along an inclined slope surface / V.Ya. Zharnitsky P.A. Kornienko // Prirodobustroystvo. 2020. № 1. P. 88-93. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-88-93.

11. Balabanov V.I. Machines for construction and operation of hydro-reclamation systems / V.I. Balabanov, N.K. Usmanov, I.Zh. Khudaev [et al.]. Saratov: Limited Liability Company "Amirity", 2023. 278 p. ISBN 978-5-00207-184-5. EDN: TFCSEY

12. Boev O.A. Issues of reconstruction of large canals and assessment of their effectiveness / O.A. Boev, M.Y. Kosichenko // Land reclamation and hydraulic engineering. 2021. Vol. 11, № 4. P. 287-301. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-287-301. EDN: QMDUPX

13. Garbuz A.Yu. Selection of composite compositions used to repair damage to canals / A.Yu. Garbuz // Ways to increase the efficiency of irrigated agriculture. 2021. № 1(81). P. 37-43. EDN: WWNTKN

14. Tuktarov R.B. Assessment of changes in the condition of facing coverings of irrigation canal slopes that are in the process of long-term operation / R.B. Tuktarov, V.P. Melnikova, R.D. Pasovets [and others] // Ways to increase the efficiency of irrigated agriculture. 2019. № 1(73). P. 92-96. EDN: TDVUOS

15. Protective coatings of irrigation canals: the monograph / V.S. Altunin, V.A. Borodin, V.G. Ganchikov Yu., Kosichenko M.Yu. Moscow: VO "Agropromizdat", 1988. 162 p. EDN: RVYSFT

Об авторах

Хамзат Арсланбекович Абдулмажидов, д-р техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-7699-4799>; Web of Science Researcher ID AAE-5817-2022; Scopus Author ID: 57224176106; Author ID: 756348; abdulmajidov@rgau-msha.ru

Виктор Иванович Балабанов, д-р техн. наук, профессор; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; Web of Science Researcher ID: L-7456-2017; Scopus author ID: 7005293644; AuthorID: 664496; vbabanov@rgau-msha.ru

Ольга Викторовна Мареева, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-7441-2169>; Scopus Author ID: 57224733401; AuthorID: 709432; o.mareeva@rgau-msha.ru

Иван Иванович Попов, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0003-0860-4311>; Web of Science Researcher ID: 4467-2019; Scopus ID: 56763512000; AuthorID: 226376; i.popov@rgau-msha.ru

Игорь Викторович Белов, старший преподаватель; <https://orcid.org/0000-0002-7562-514X>; Researcher ID: AAD-8009-2022 AuthorID: 1176793; bivik.1995@yandex.ru

About the authors

Khamzat A. Abdulmashidov, DSc (Tech), Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0002-7699-4799>; Web of Science Researcher ID AA-5817-2022; Scopus Author ID: 57224176106; Author ID: 756348; abdulmajidov@Ragau-Masha.Rs120

Viktor I. Balabanov, DSc (Tech), Professor; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; Web of Science Researcher ID: L-7456-2017; Scopus author ID: 7005293644; AuthorID: 664496; vbabanov@rgau-msha.ru

Olga V. Mareeva, CSc (Tech), Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0002-7441-2169>; Scopus author ID: 57224733401; AuthorID: 709432; o.mareeva@rgau-msha.ru

Ivan I. Popov, CSc (Tech), Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0003-0860-4311>; Web of Science ResearcherID: 4467-2019; Scopus ID: 56763512000; AuthorID: 226376; i.popov@rgau-msha.ru

Igor V. Belov, Senior Lecturer; <https://orcid.org/0000-0002-7562-514X>; Researcher ID: AAD-8009-2022 AuthorID: 1176793; bivik.1995@yandex.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Абдулмажидов Х.А., Балабанов В.И., Попов И.И., Мареева О.В. и Белов И.В. выполнили обзор, практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of the 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 29.09.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review and revision 24.10.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 24.10.2025

Abdulmashidov Kh.A., Balabanov V.I., Popov I.I., Mareeva O.V. and Belov I.V., performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have copyright for the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-71-79>

УДК 631.412:681.5.015.42: 551.48



АНАЛИЗ ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАХОТНОГО СЛОЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ В БАСЕЙНЕ МАЛОЙ РЕКИ ЛОКНАШ

Д.С. Искричев^{1✉}, Ю.Г. Безбородов², В.К. Хлюстов³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО 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

¹ iskri4ev@mail.ru

² ubezborodov@rhau-msha.ru; ORCID0000-0001-5293-2342, РИНЦ ID: 271273

³ vkhlyustov@rgau-msha.ru; ORCID0000-0001-8323-5750

Аннотация. Цель исследований – выявить и интерпретировать главные компоненты, определяющие изменчивость свойств пахотного слоя дерново-подзолистых почв в бассейне малой реки Локнаш, а также оценить информативность и автономность независимых переменных на основе анализа общности и специфичности. В статье представлены результаты исследований почвенно-экологических факторов, определяющих изменчивость свойств пахотного слоя в бассейне малой реки Локнаш Московской области. Статистическая обработка данных произведена методом главных компонент с варимакс-вращением. Выявлено три ключевых фактора, объясняющих 78,33% общей дисперсии: «Тепловой режим и химические свойства почв» (36,04%); «Интенсивность эрозии и положение в рельефе» (28,53%); «Инсоляция и гидродинамика русла» (13,77%). Расчет общности и специфичности переменных показал, что наиболее интегрированными в модель являются показатели экспозиции склона, угла склона, уклона русла, расстояния от истока, средней температуры воздуха, абсолютной отметки, плотности и рН. Наибольшую автономность проявили сумма осадков, калий и фосфор. Полученные результаты позволяют проводить зонирование территории по риску эрозии, оптимизировать внесение удобрений и учитывать микроклиматические особенности при планировании мелиоративных мероприятий.

Ключевые слова: дерново-подзолистые почвы, почвенно-экологические факторы, метод главных компонент, общность, специфичность, пахотный слой, бассейн малой реки

Формат цитирования: Искричев Д.С., Безбородов Ю.Г., Хлюстов В.К. Анализ почвенно-экологических факторов изменчивости пахотного слоя в бассейне малой реки Локнаш // Природообустройство. 2025. № 5. С. 71-79. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-71-79>

Original article

ANALYSIS OF SOIL-ECOLOGICAL FACTORS OF VARIABILITY OF THE ARABLE LAYER OF SOD-PODZOLIC SOILS IN THE BASIN OF THE SMALL LOKNASH RIVER

D.S. Iskrichev^{1✉}, Yu.G. Bezborodov², V.K. Khlyustov³

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow State Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev. Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; 44, B. Akademicheskaya, Moscow, 127434, Russia

¹ iskri4ev@mail.ru

² ubezborodov@rhau-msha.ru; ORCID0000-0001-5293-2342, РИНЦ ID: 271273

³ vkhlyustov@rgau-msha.ru ORCID0000-0001-8323-5750

Abstract. The aim of the work is to identify and interpret the main components that determine the variability of the properties of the arable soil layer of sod-podzolic soils in the basin of the small Loknash River, as well as to evaluate the informative value and autonomy of independent variables based on the analysis of generality and specificity. The article presents the results of a study of soil and environmental factors that determine the variability of the properties of the arable layer in the basin of the small Loknash River in the Moscow region. Statistical data processing was performed using the principal component method (PCA) with varimax rotation. Three key factors were identified that explain 78.33% of the total dispersion: “Thermal regime and chemical properties of the soil” (36.04%), “Erosion intensity and position in the relief” (28.53%), “Insolation and hydrodynamics of the riverbed” (13.77%). The calculation

of the generality and specificity of variables showed that the most integrated into the model are indicators of slope exposure, slope angle, channel slope, distance from the source, average air temperature, absolute elevation, density and pH. The amount of precipitation, potassium and phosphorus showed the greatest autonomy. The results obtained make it possible to carry out zoning of the territory according to the risk of erosion, optimize fertilization and take into account microclimatic features when planning land reclamation measures.

Keywords: soil-ecological factors, main component method, generality, specificity, arable layer, sod-podzolic soils, small river basin

Citation format: Iskrichev D.S., Bezborodov Yu.G., Khlyustov V.K. Analysis of soil-ecological factors of variability of the arable layer of sod-podzolic soils in the basin of the small Loknash River // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 71-79. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-71-79>

Введение. Почвенно-экологические условия играют ключевую роль в формировании продуктивности агроэкосистем и устойчивости земельных ресурсов к деградационным процессам [1, 2]. В условиях малых речных бассейнов – таких, как бассейн реки Локнаш, пространственная изменчивость свойств дерново-подзолистых почв определяется сложным взаимодействием климатических, гидрологических и антропогенных факторов. Существенную роль при этом играют химические показатели почв, биологические процессы, связанные с деятельностью почвенных микроорганизмов, а также характеристики рельефа, местоположение в пределах водосбора, крутизна и экспозиция склонов, которые напрямую влияют на процессы аккумуляции и диффузного стока. Изучение этих взаимосвязей имеет важное значение для разработки научно обоснованных мелиоративных мероприятий, направленных на сохранение плодородия и предотвращение эрозии и эвтрофикации (насыщение водоемов биогенными элементами) реки [3]. В современных исследованиях особое место занимает применение методов многомерного статистического анализа, позволяющих выделить латентные факторы, определяющие изменчивость свойств почвенного покрова. Метод главных компонент широко используется для выявления структурных связей между почвенными и экологическими параметрами, оценки их информативности и вклада в общую дисперсию [4]. Дополнительное вычисление показателей общности и специфичности переменных обеспечивает возможность количественной оценки интеграции отдельных показателей в факторную модель и их независимости [5].

Цель исследований: выявить и интерпретировать главные компоненты, определяющие изменчивость свойств пахотного слоя дерново-подзолистых почв в бассейне малой реки Локнаш, а также оценить информативность и автономность независимых переменных на основе анализа общности и специфичности.

Материалы и методы исследований.

Объектом исследований являлся пахотный слой дерново-подзолистых почв. Почвы располагаются в притеррасной пойме – болотные и заболоченные, тяжелого механического состава. На исследуемой территории, в границах агроландшафтов, расположены пахотные земли. В первый год исследований на пашне, в зернотравяном севообороте, выращивалась вико-овсяная смесь, после которой, как известно, почва обогащается азотом. В хозяйстве согласно рекомендациям ВНИИАгрохимии вносится 50 т/га навоза КРС и минеральные удобрения в дозе N50P40K75. Были отобраны образцы в осенний период 2022-2024 гг. в трех створах бассейна малой реки Локнаш Московской области. В каждом створе производился отбор проб в трех точках с глубины 0-20 см по общепринятой методике, что в совокупности составило 27 пунктов.

Определялись следующие показатели: содержание азота (мг/кг) – методом Кьельдаля; содержание калия и фосфора (мг/кг) – по методу Кирсанова; (рН водной вытяжки) – потенциометрическим методом; общая численность микроорганизмов (ОМЧ, КОЕ/г) – методом посевов; плотность – методом режущего кольца; влажность – термостатно-весовым методом.

Для характеристики условий мест отбора проб дополнительно учитывались морфометрические показатели рельефа и климатические показатели: экспозиция и крутизна склонов, уклон русла, абсолютная отметка, расстояние от истока, средняя температура воздуха и сумма осадков. Геоморфологические показатели рассчитывались на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) с использованием AutoCAD Civil 3D, климатические показатели – по данным ближайших метеостанций. Исходные данные приведены в таблицах 1, 2.

Статистическая обработка выполнена в пакете IBM SPSS Statistics. На первом этапе данные были стандартизированы. Методом главных компонент проведено выделение латентных

Таблица 1. Исходные данные агрохимических и агрофизических характеристик почв
Table 1. Initial data on agrochemical and agrophysical characteristics of soils

Сезон Season	Створ Range	Азот, мг/кг Nitrogen, mg/kg	Калий, мг/кг Potassium, mg/kg	Фосфор, мг/кг Phosphorus, mg/kg	pH, ед. pH, units	ОМЧ, КО- Е/г TBC, CFU/g	Плотность, гр/см ³ Density, g/cm ³	Влаж- ность, % Humidity, %
Осень / Autumn 2022	2	50	96	78	5,6	4550	1,30	21,7
Осень / Autumn 2022	3	50	63	179	5,56	2350	1,27	23,9
Осень / Autumn 2022	5	17	65	92	5,55	2800	1,13	22,6
Осень / Autumn 2023	2	31	50	195	5,6	700000	1,28	20,50
Осень / Autumn 2023	3	48	64	288	5,71	350000	1,36	19,50
Осень / Autumn 2023	5	29	77	115	5,88	1000000	1,17	20,50
Осень / Autumn 2024	2	29	50	239	6,04	1000000	1,22	20,30
Осень / Autumn 2024	3	29	50	237	2,94	70000	1,34	19,80
Осень / Autumn 2024	5	32	50	700	6,01	450000	1,14	19,80

Таблица 2. Исходные климатические данные и пространственные характеристики почв

Table 2. Initial climate data and spatial characteristics of soils

Сезон Season	Створ Range	Абс отмет- ка, м Abs Mark, m	∑Осад- ков, мм ∑Precip- itation, mm	Средняя тем- пература, °С Average Temperature, °C	L от исто- ка, км L from source, km	Уклон русла реки River bed slope	Склон Slope	Экспозиция склона Exposure of Slope
Осень Autumn 2022	2	197	198	4,6	3,9	0,011	Умеренный смыв Moderate flushing	Южная South
Осень Autumn 2022	3	175	198	4,6	5,7	0,003	Умеренный смыв Moderate flushing	Северо-Западная Northwest
Осень Autumn 2022	5	150	198	4,6	13,3	0,003	Слабый смыв Weak flush	Юго-Западная Southwest
Осень Autumn 2023	2	197	177	6	3,9	0,011	Умеренный смыв Moderate flushing	Южная South
Осень Autumn 2023	3	175	177	6	5,7	0,003	Умеренный смыв Moderate flushing	Северо-Западная Northwest
Осень Autumn 2023	5	150	177	6	13,3	0,003	Слабый смыв Weak flush	Юго-Западная Southwest
Осень Autumn 2024	2	197	212	7,7	3,9	0,011	Умеренный смыв Moderate flushing	Южная South
Осень Autumn 2024	3	175	212	7,7	5,7	0,003	Умеренный смыв Moderate flushing	Северо-Западная Northwest
Осень Autumn 2024	5	150	212	7,7	13,3	0,003	Слабый смыв Weak flush	Юго-Западная Southwest

факторов с последующим варимакс-вращением для упрощения интерпретации. Каждый выделенный главный компонент наделен семантическим значением. Для каждой переменной рассчитаны показатели общности (h^2) и специфичности (u^2), характеризующие степень включенности в факторную модель. Визуализация выполнена с использованием лепестковых и корреляционных диаграмм.

Результаты и их обсуждение. В процессе анализа выявлены три главные компоненты (далее – ГК), совокупно объясняющие 78,33% общей дисперсии (табл. 3):

- ГК₁ «Тепловой режим и химические свойства почвы» – 36,035% дисперсии;
- ГК₂ «Интенсивность эрозии и положение в рельефе» – 28,532% дисперсии;
- ГК₃ «Инсоляция и гидродинамика русла» – 13,766% дисперсии.

Совокупность выделенных факторов демонстрирует, что изменчивость пахотного слоя почв обусловлена комплексным взаимодействием климатических, топографических и гидрологических условий, а также биогеохимических процессов, происходящих в бассейне малой реки [6].

Повернутая матрица компонентов (столбцы ГК₁-ГК₃), отражающая факторные нагрузки переменных на соответствующие оси, а также матрица взаимных корреляций между исходными показателями (X_1 - X_{14}) представлены в таблице 4. Это позволяет выявить, какие именно показатели вносят наибольший вклад в формирование каждого из выделенных факторов. Высокие по модулю значения нагрузок ($|r| > 0,6$) свидетельствуют о тесной связи переменной с главным компонентом и дают возможность их содержательной семантической интерпретации. Так, по матрице можно проследить объединение почвенно-химических параметров в составе ГК₁, топографических и эрозионных характеристик рельефа в ГК₂, а также экспозиционных и гидродинамических условий в ГК₃.

Таким образом, корреляционная матрица (табл. 4) служит основанием для факторной

интерпретации и последующего выделения ведущих почвенно-экологических градиентов в бассейне малой реки Локнаш.

Следующим шагом стало наделение выделенных главных компонентов семантическим значением, то есть их интерпретация с точки зрения реальных почвенно-экологических процессов, отражающих влияние климатических, гидрологических, химических и морфометрических показателей и факторов на изменчивость свойств пахотного слоя.

Компонент I «Тепловой режим и химические свойства почвы» объединяет параметры, связанные с термическими и биохимическими условиями почвообразования. Положительные значения компонента характеризуют участки с повышенной средней температурой (до 7,7°C), кислой реакцией водной вытяжки pH (6,0-6,1), высокой общей численностью микроорганизмов (ОМЧ до 1 млн и фосфора (до 702 мг/кг), но пониженным содержанием азота (28-48 мг/кг) и калия (46-81 мг/кг).

Отрицательные значения, напротив, соответствуют холодным (4,6°C), влажным (21-24%) и богатым азотом почвам с повышенным содержанием калия (по сравнению с положительным значением компонента – на 13-17 пунктов) 59-97 мг/кг и сниженным содержанием фосфора 76-180 мг/кг. Это позволяет интерпретировать ГК₁ как градиент от «теплых окультуренных почв с низким азотным фоном, подверженным фосфорными загрязнениям» к «холодным переувлажненным почвам с более высоким содержанием азота и калия».

Компонент II «Интенсивность эрозии и положение в рельефе» отражает влияние рельефа и гидрологических процессов. Положительные значения ассоциированы с близостью к истоку водотока (3,9-5,9 км), высокими абсолютными отметками (до 197 м), уплотненными почвами (плотность – 1,27-1,37 г/см³), расположенными в зонах с умеренным смывом. Отрицательные значения свойственны удаленным от истока участкам (13,3-13,5 км), расположенным в зонах со слабым смывом и рыхлыми почвами (плотность – 1,13-1,17 г/см³).

Таблица 3. Доля объяснённой дисперсии главных компонент

Table 3. Proportion of explained dispersion of principal components

Компонент <i>Component</i>	Собственное значение <i>Eigenvalue</i>	Дисперсии% <i>Dispersion%</i>	Кумулятивный% <i>Cumulative%</i>
ГК ₁	5,045	36,035	36,035
ГК ₂	3,995	28,532	64,567
ГК ₃	1,927	13,766	78,333

Таблица 4. Корреляция переменных (X_1 - X_{14}) и главных компонент с X_1 - X_{14} Table 4. Correlation of variables (X_1 - X_{14}) and principal components with X_1 - X_{14}

ГК и Переменные PC and Variables	ГК ₁ PC ₁	ГК ₂ PC ₂	ГК ₃ PC ₃	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
ГК ₁ /PC ₁	1								
ГК ₂ /PC ₂	0,000	1							
ГК ₃ /PC ₃	0,000	0,000	1						
Азот - X ₁ / Nitrogen - X ₁	-0,838	0,221	-0,061	1					
Калий - X ₂ / Potassium - X ₂	-0,714	-0,078	0,200	0,626	1				
Фосфор - X ₃ / Phosphorus - X ₃	0,642	-0,219	-0,274	-0,392	-0,536	1			
pH водной вытяжки - X ₄ pH of the aqueous extract - X ₄	0,891	-0,144	0,056	-0,630	-0,448	0,568	1		
ТВС - X ₅ / TVC - X ₅	0,768	-0,022	0,362	-0,765	-0,419	0,130	0,735	1	
Плотность - X ₆ / Density - X ₆	-0,039	0,919	-0,223	0,173	0,060	-0,234	-0,193	-0,076	1
Влажность - X ₇ / Humidity - X ₇	-0,835	-0,088	-0,100	0,815	0,355	-0,473	-0,687	-0,678	-0,180
Абсолютная отметка - X ₈ Absolute mark - X ₈	-0,055	0,850	0,511	0,238	0,030	-0,303	-0,142	0,081	0,635
Сумма осадков - X ₉ Total precipitation - X ₉	0,316	-0,004	-0,099	0,089	-0,311	0,386	0,489	-0,063	-0,177
Средняя температура - X ₁₀ Average temperature - X ₁₀	0,985	0,047	0,013	-0,747	-0,679	0,641	0,922	0,733	-0,016
Расстояние от Истока - X ₁₁ Distance from Source - X ₁₁	0,054	-0,965	-0,237	-0,268	0,025	0,287	0,166	-0,012	-0,808
Уклон русла реки - X ₁₂ Slope of the riverbed - X ₁₂	-0,044	0,445	0,875	0,127	0,119	-0,260	-0,066	0,184	0,181
Склон - X ₁₃ / Slope - X ₁₃	-0,051	0,992	0,062	0,275	-0,056	-0,265	-0,173	-0,030	0,875
Экспозиция склона - X ₁₄ Slope exposure - X ₁₄	-0,021	-0,059	0,974	-0,012	0,169	-0,147	0,024	0,230	-0,297
Переменные / Variables	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
Плотность - X ₆ / Density - X ₆	1								
Влажность - X ₇ / Humidity - X ₇	-0,180	1							
Абсолютная отметка - X ₈ Absolute mark - X ₈	0,635	-0,037	1						
Сумма осадков - X ₉ Total precipitation - X ₉	-0,177	0,042	0,000	1					
Средняя температура - X ₁₀ The average temperature - X ₁₀	-0,016	-0,791	0,000	0,448	1				
Расстояние от Истока - X ₁₁ Distance from Source - X ₁₁	-0,808	0,021	-0,954	0,000	0,000	1			
Уклон русла реки - X ₁₂ Slope of the riverbed - X ₁₂	0,181	-0,056	0,847	0,000	0,000	-0,648	1		
Склон - X ₁₃ / Slope - X ₁₃	0,875	-0,011	0,884	0,000	0,000	-0,983	0,500	1	
Экспозиция склона - X ₁₄ Slope exposure - X ₁₄	-0,297	-0,059	0,468	0,000	0,000	-0,180	0,866	0,000	1

Таким образом, $ГК_2$ разделяет зоны активной эрозии в верхних частях склонов и стабильные аккумулятивные участки в их нижних частях.

Компонент III «Инсоляция и гидродинамика русла» связан с ориентацией склонов и гидрологическим режимом. Положительные значения соответствуют южным и юго-западным экспозициям, крутым уклонам русла (0,011), а отрицательные – северо-западным тенистым склонам и пологим участкам (уклон – 0,003). Это указывает на роль инсоляции в дифференциации почвенного покрова.

Таким образом, выделенные компоненты демонстрируют, что пространственная изменчивость свойств пахотного слоя почв в бассейне малой реки Локнаш определяется:

- климатическими условиями и биогенным загрязнением ($ГК_1$);
- эрозионными процессами и положением в рельефе ($ГК_2$);
- экспозиционной неоднородностью ($ГК_3$).

Участки с положительными значениями $ГК_1$ – это пункты осенью 2023-2024 гг. По причине повышенного содержания фосфора и кислой среды почвы возникает риск эвтрофикации водоема. Превентивными мелиоративными мероприятиями будут являться: посев сидератов (люпин, горчица); известкование почвы; снижение дозы фосфорных удобрений; перехват диффузного стока.

Участки с отрицательными значениями $ГК_1$ – это пункты осенью 2022 г. Ввиду застоя влаги в почве наблюдается переувлажнение и возникает риск гидравлического выноса азота в водоприемник. Превентивными мелиоративными мероприятиями будет являться устройство дренажа с биоплато для очистки дренажных вод.

Участки с положительными значениями $ГК_2$ – это створы 2 и 3 осенью 2022-2024 гг. Ввиду повышения плотности возникает риск эрозии почвы, а влияние склона предопределяет диффузный сток. Превентивными мелиоративными мероприятиями будут являться: внесение структурообразователей; контурное земледелие; устройство лесополос и водозадерживающих валов.

Участки с отрицательными значениями $ГК_2$ – это створ 5 в 2022-2024 гг. Благодаря застою влаги в почве наблюдается переувлажнение. Превентивными мелиоративными мероприятиями будут являться: устройство дренажа; перехват поверхностного стока; подбор влаголюбивых культур.

Участки с положительными значениями $ГК_3$ – это створ 2 в 2022-2024 гг. и створ 5 в 2023 г. По причине недостатка влаги происходит ускоренное разложение органики, что еще больше ускоряет непроизводительные потери влаги почвы на испарение. Превентивными мелиоративными мероприятиями будут являться: мульчирование; интенсивный режим орошения; введение культур с коротким вегетационным периодом.

Участки с отрицательными значениями $ГК_3$ – это створ 3 2022-2024 гг. и створ 5 в 2022 и 2024 гг.

Ввиду низкой аэрации почвы снижается интенсивность минерализации органики, наблюдается повышение кислотности. Превентивными мелиоративными мероприятиями будут являться: щелчевание; рыхление; посев трав с мощной корневой системой (тимopheевка, мятлики); известкование.

Расчет общности и специфичности в анализе главных компонент

1. Основные понятия

• Общность (h^2) – доля дисперсии переменной, объясняемая выделенными главными компонентами. Показывает, насколько хорошо переменная представлена в факторной модели.

• Специфичность (u^2) – доля дисперсии, необъясняемая моделью ($u^2 = 1 - h^2$). Включает в себя случайную ошибку и уникальные факторы, не связанные с компонентами [7].

2. Алгоритм расчета

Шаг 1. Стандартизация данных. Перед PCA все переменные стандартизируются (приводятся к среднему – 0, SD – 1), чтобы избежать влияния масштаба [8].

Шаг 2. Вычисление матрицы факторных нагрузок. После Varimax-вращения получаем матрицу нагрузок L , где элемент l_{ij} показывает корреляцию i -й переменной с j -й компонентой.

Шаг 3. Расчет общности для каждой переменной. Общность h_i^2 для переменной i вычисляется как сумма квадратов ее нагрузок по всем компонентам:

$$h_i^2 = \sum_{j=1}^k l_{ij}^2, \quad (1)$$

где: k – число выбранных компонент.

Пример. Для переменной рН с нагрузками по ГК соответствует следующим параметрам: Компонент 1 = 0,89; Компонент 2 = –0,14; Компонент 3 = 0,06

Общность: $h_{pH}^2 = 0,89^2 + (-0,14)^2 + 0,06^2 = 0,792 + 0,020 + 0,004 = 0,816$.

Таблица 5. Значения общности и специфичности переменных
Table 5. Values of generality and specificity of variables

Переменная Variable	Общность Generality	Специфичность Specificity	Переменная Variable	Общность Generality	Специфичность Specificity
Азот / Nitrogen	0,755	0,245	Абсолютная отметка Absolute mark	0,985	0,015
Калий / Potassium	0,556	0,444	Сумма осадков Total precipitation	0,110	0,89
Фосфор / Phosphorus	0,536	0,464	Средняя температура Average temperature	0,973	0,027
pH	0,816	0,183	Расстояние от истока Distance from source	0,991	0,009
ОМЧ	0,722	0,278	Уклон русла реки River bed slope	0,965	0,035
Плотность / Density	0,896	0,104	Склон / Slope	0,991	0,009
Влажность / Humidity	0,715	0,285	Экспозиция склона Slope exposure	0,953	0,047

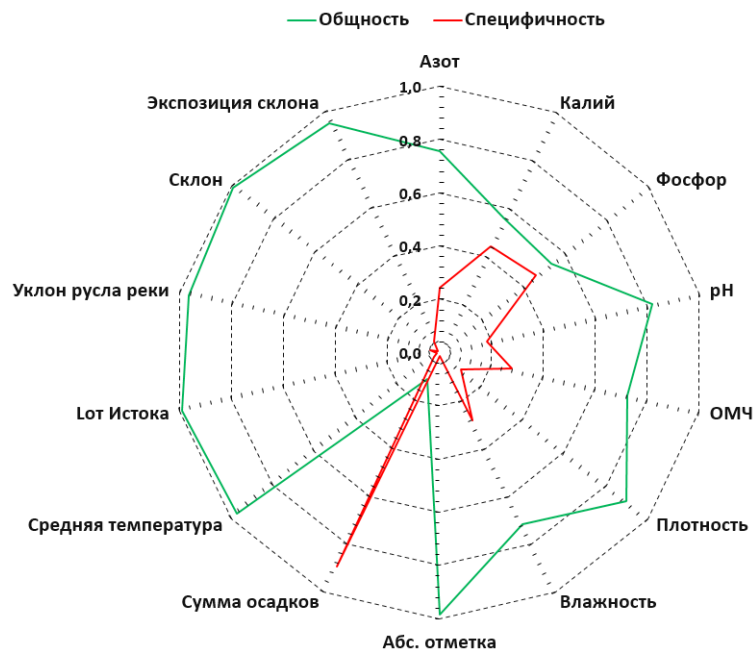


Рис. Диаграмма общности и специфичности переменных
Fig. Diagram of generality and specificity of variables

В соответствии с вышеизложенным алгоритмом расчета были определены значения общности и специфичности переменных (табл. 5).

На основе представленного расчета общности и специфичности получена лепестковая диаграмма (рис.).

Общность характеризует долю дисперсии каждой переменной, объясняемую выделенными латентными факторами, и отражает степень объясненного показателя в общей модели [9]. Высокие значения общности (более 0,8) наблюдаются для экспозиции склона, угла склона, уклона русла реки, расстояния от истока, средней температуры воздуха, абсолютной отметки, плотности и pH водной

вытяжки, что указывает на их сильную связь с факторами модели. Эти переменные являются наиболее информативными при комплексной оценке состояния водосборной территории.

Специфичность отражает долю уникальной дисперсии переменной, необъясняемую выделенными факторами, то есть степень ее независимости от модели [10].

Наибольшая специфичность зафиксирована у суммы осадков, а также у ряда химических показателей (калий, фосфор), что свидетельствует о наличии у этих переменных индивидуальных особенностей, не связанных с основной факторной структурой.

Выводы

В результате анализа методом главных компонент (РСА) установлено, что изменчивость свойств пахотного слоя в бассейне малой реки Локнаш определяется тремя интегральными факторами, которые совокупно объясняют 78,33% общей дисперсии: ГК₁ «Тепловой режим и химические свойства почвы» (36,04%), ГК₂ «Интенсивность эрозии и положение в рельефе» (28,53%), ГК₃ «Инсоляция и гидродинамика русла» (13,77%). Показано, что высокие значения общности (>0,8) характерны для таких показателей, как экспозиция склона, уклон русла, расстояние от истока, абсолютная отметка, средняя температура воздуха, плотность и рН. Эти переменные являются наиболее информативными при комплексной оценке состояния почвенного покрова. Наибольшая специфичность зафиксирована у суммы осадков, а также у отдельных химических показателей (калий, фосфор), что отражает их относительную автономность и необходимость отдельного учета при экологическом мониторинге.

Пространственная изменчивость почв бассейна Локнаша определяется сочетанием климатических условий, биогенных нагрузок, эрозионных процессов и рельефной неоднородностью.

Список использованных источников

1. Убугунов Л.Л. Почвенно-экологическое районирование почв бассейна озера Байкал / Л.Л. Убугунов, И.А. Белозерцева, В.И. Убугунова [и др.] // Современные проблемы биологии, экологии и почвоведения: материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию высшего биологического образования в Восточной Сибири, Иркутск, 19-20 сентября 2019 года / Иркутский государственный университет. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2019. С. 336-342. EDN: KFLLYC
2. Галева Л.П. Фосфатный режим солонцов лесостепной зоны Барабинской низменности при гипсовании и внесении минеральных удобрений: специальность 06.01.04 «Агрохимия»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Галева Любовь Павловна. Новосибирск, 1991. 18 с. EDN: ZKBPQH
3. Даулетбай С.Д. Экологическое обоснование режима мелиорации сельскохозяйственных земель при комплексном обустройстве водосборов бассейна реки Шу / С.Д. Даулетбай, А.Т. Козыкеева, Ж.С. Мустафаев, Л.В. Кирейчева // Мелиорация и водное хозяйство: проблемы и пути решения: материалы международной научно-практической конференции, Москва, 29-30 марта 2016 года. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2016. С. 186-190. EDN: WZOUWV
4. Хлюстов В.К., Светлова Г.Н. Математическое моделирование лесных экосистем: Учебное пособие / В.К. Хлюстов, Г.Н. Светлова. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. – 199 с.

Это указывает на необходимость дифференцированного подхода к управлению агроландшафтами в бассейне малых рек.

На основе факторного анализа выделены зоны с повышенным риском. Для ГК₁ участки с избытком фосфора и кислой реакцией требуют известкования и ограничения фосфорных удобрений, тогда как холодные и влажные почвы с высоким содержанием азота нуждаются в дренажных и биофильтрационных системах. По ГК₂ верхние части склонов характеризуются риском эрозии и требуют внедрения контурного земледелия, лесополос и водозадерживающих сооружений, тогда как аккумулятивные зоны в нижнем течении нуждаются в регулировании влажности. По ГК₃ южные экспозиции подвержены риску пересыхания и требуют мер по сохранению влаги, в то время как теневые склоны нуждаются в улучшении аэрации и регулировании кислотности.

Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации мелиоративных мероприятий в бассейне малой реки включая зонирование территории по риску эрозии, корректировку систем удобрений, мероприятия по перехвату диффузного стока и учет микроклиматических условий при земледельческом освоении.

References

1. Ubugunov L.L. Soil and ecological zoning of the soils of Lake Baikal basin / L.L. Ubugunov, I.A. Belozertseva, V.I. Ubugunova [et al.] // Modern problems of biology, ecology and soil science: proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of Higher Biological Education in Eastern Siberia, Irkutsk, September 19-20, 2019 / Irkutsk state University. Irkutsk: Irkutsk State University, 2019. P. 336-342. EDN: KFLLYC
2. Galeeva L.P. Phosphate regime of solonets of the forest-steppe zone of the Barabinsk lowland during gypsum formation and application of mineral fertilizers: specialty 06.01.04 "Agrochemistry": abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Agricultural Sciences / Galeeva Lyubov Pavlovna. Novosibirsk, 1991. 18 p. EDN: ZKBPQH
3. Dautletbai S.D. Environmental justification of the regime of agricultural land reclamation in the integrated management of the catchments of the Shu river basin / S.D. Dautletbai, A.T. Kozykееva, J.S. Mustafaev, L.V. Kireicheva // Land reclamation and water management: problems and solutions: proceedings of the international scientific and practical conference, Moscow, March 29-30, 2016. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, 2016. P. 186-190. EDN: WZOUWV
4. Khlyustov V.K., Mathematical modeling of forest ecosystems: Textbook / V.K. Khlyustov, G.N. Svetlova. Moscow: FSBI "Rosinformagrotech", 2017. 199 p.
5. Pechenkin V.V. Factor analysis of statistical data / V.V. Pechenkin, D.A. Zaichenko // Management problems in socio-economic and technical systems: Collection of scientific articles Proceedings of the XV International Scientific

5. Печенкин В.В. Факторный анализ статистических данных / В.В. Печенкин, Д.А. Заиченко // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: Сборник научных статей Материалы XV Международной научно-практической конференции, Саратов, 18-19 апреля 2019 года. Саратов: ООО Издательский дом «Наука», 2019. С. 33-36. EDN: VPNAOE

6. Стафийчук И.Д. Территориальное планирование. Научная основа и практика: учебное пособие. / И.Д. Стафийчук, Р.Р. Хисамов, Ю.Г. Безбородов. М.: Российский государственный аграрный университет, 2024. 190 с. ISBN 978-5-00207-555-3. EDN: FSAAGW

7. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учебник: / А.А. Халафян; А.А. Халафян. 2-е изд. М.: Бином, 2010. 522 с. ISBN 978-5-9518-0370-2. EDN: QTNDAX

8. Тебекин А.В. Анализ инструментов статистического анализа с позиций стратегического развития экономики отечественной промышленности / А.В. Тебекин, П.А. Тебекин, А.А. Егорова // Журнал экономических исследований. 2020. Т. 6, № 6. С. 33-46. EDN: AZWLUG

9. Хлюстов В.К. Физико-химический состав почв и рост насаждений / В.К. Хлюстов, В.Д. Наумов, А.М. Ганихин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 1(53). С. 90-105. EDN: TRGCIJ. DOI: 10.25686/2306-2827.2022.1.90

10. Горохов М.М. Факторный анализ данных / М.М. Горохов, Л.Г. Саева // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2020. № 4(43). С. 65-69. EDN: AXDQYR

and Practical Conference, Saratov, April 18-19, 2019. Saratov: Nauka Publishing House, LLC, 2019. P. 33-36. EDN: VPNAOE

6. Stafyichuk I.D. Territorial planning. Scientific basis and practice / I.D. Stafyichuk, R.R. Khisamov, Yu.G. Bezborodov. – Moscow: Russian State Agrarian University, 2024. 190 p. ISBN 978-5-00207-555-3. EDN: FSAAGW

7. Khalafyan A.A. STATISTICA 6. Statistical data analysis: textbook: textbook / A.A. Khalafyan; A.A. Khalafyan. – 2nd ed. – Moscow: Binom, 2010. 522 p. ISBN 978-5-9518-0370-2. EDN: QTNDAX

8. Tebekin A.V. Analysis of statistical analysis tools from the perspective of the strategic development of the economy of domestic industry / A.V. Tebekin, P.A. Tebekin, A.A. Egorova // Journal of Economic Research. 2020. Vol. 6, No. 6. P. 33-46. EDN: AZWLUG

9. Khlyustov V.K. Physico-chemical composition of soils and growth of plantings / V.K. Khlyustov, V.D. Naumov, A.M. Ganikhin // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Prirodoobustrojstvo. 2022. No. 1(53). P. 90-105. EDN: TRGCIJ. DOI: 10.25686/2306-2827.2022.1.90 EDN: TRGCIJ

10. Gorokhov M.M. Factor analysis of data / M.M. Gorokhov, L.G. Saetova // Socio-economic management: theory and practice. 2020. No. 4(43). P. 65-69. EDN: AXDQYR

Об авторах

Даниил Сергеевич Искричев, аспирант кафедры землеустройства и лесоводства, iskri4ev@mail.ru

Юрий Германович Безбородов, д-р техн., наук, профессор; зав. кафедрой землеустройства и лесоводства; ORCID: 0000-0001-5293-2342, Scopus 6603491005, WOS Researcher ID: G-7544-2018, РИНЦ ID: 271273, ubezborodov@rgau-msha.ru

Виталий Константинович Хлюстов, д-р с.-х. наук, профессор кафедры землеустройства и лесоводства; ORCID: 0000-0001-8323-5750, Scopus 57210104945, WOS Researcher ID: AAE-7093-2022, РИНЦ ID: 507286, vkhlyustov@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Искричев Д.С., Безбородов Ю.Г., Хлюстов В.К. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Authors' contributions

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 21.08.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 07.11.2025

Принята к публикации после доработки / Accepted for publication 07.11.2025

About the authors

Daniil S. Iskrichiev, postgraduate student of the Department of Land Management and Forestry; iskri4ev@mail.ru

Yuri G. Bezborodov, DSc (Tech), Head of the Department of Land Management and Forestry, ORCID: 0000-0001-8323-5750, Scopus 6603491005, WOS Researcher ID: G-7544-2018, RSCI ID: 271273, ubezborodov@rgau-msha.ru

Vitaliy K. Khlyustov, DSc (Agro), professor of the department of Land management and Forestry; ORCID: 0000-0001-8323-5750, Scopus 57210104945, WOS Researcher ID: AAE-7093-2022, RSCI ID: 507286, vkhlyustov@rgau-msha.ru

D.S. Iskrichiev, Yu.G. Bezborodov, V.K. Khlyustov 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.

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-80-85>

УДК 626.01:627.5

**РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОДРУСЛОВЫХ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**С.О. Курбанов¹✉, А.А. Созаев², Р.А. Жеругов³^{1,2,3} Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова; 360030, КБР, г. Нальчик, пр-кт Ленина, 1В, Россия¹ 05bereg@rambler.ru; ORCID: 0000-0001-5230-7053² sozaev07@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8505-124X³ PIN-код: 5092-7150, AuthorID: 1038179 Россия

Аннотация. Цель исследований – разработка методов расчетного обоснования предлагаемых подрусловых водозаборных сооружений. В статье описываются условия работы и расчетные схемы подрусловых водозаборных сооружений авторской разработки. Приведены конструктивные и технологические характеристики подрусловых водозаборов и их дренажных систем, устраиваемых в прибрежных участках малых рек. Для разных типов фильтрующих водоприемников и дренажей предложены методы фильтрационных расчетов, по результатам которых можно определить размеры и производительность водоприемных лотков и дренажных труб. Также предложен метод гидравлических расчетов, позволяющий определить пропускную способность дренажных и отводящих труб. Предлагаемые методы фильтрационных и гидравлических расчетов могут быть использованы для расчетного обоснования проектируемых подрусловых водозаборных сооружений комбинированных конструкций в условиях малых рек.

Ключевые слова: малые реки, подрусловые водозаборы, водоприемники, дренажные трубы, фильтрационный расчет, скорость фильтрации, толщина фильтрующих слоев, напор воды, пропускная способность, гидравлический расчет

Формат цитирования: Курбанов С.О., Созаев А.А., Жеругов Р.А. Расчетное обоснование подрусловых водозаборных сооружений комбинированных конструкций // Природообустройство. 2025. № 5. С. 80-85. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-80-85>

Scientific article

CALCULATION JUSTIFICATION FOR UNDER-CHANNEL WATER INTAKE STRUCTURES OF COMBINED DESIGNSS.O. Kurbanov¹✉, A.A. Sozaev², R.A. Zherugov³

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov. 360030 Nalchik, Lenin avenue, 1B, Russia

¹ 05bereg@rambler.ru; ORCID: 0000-0001-5230-7053² sozaev07@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8505-124X³ PIN-код: 5092-7150, Author ID: 1038179 Россия

Abstract. The purpose of this work is to develop methods for calculating the proposed downstream water intake structures. The paper describes the operating conditions and design schemes of under-channel water intake structures, the author's development. Structural and process characteristics of underflow water intakes and their drainage systems arranged in coastal sections of small rivers are given. For different types of filtering water intakes and drains, methods of filtration calculations are proposed, based on the results of which it is possible to determine the size and productivity of water intake trays and drainage pipes. A method of hydraulic calculations is also proposed, which makes it possible to determine the throughput capacity of drainage and discharge pipes. These proposed methods of filtration and hydraulic calculations can be used for the calculation justification of the designed under-channel water intake structures of combined designs in the conditions of small rivers.

Keywords: small rivers, under-channel water intakes, water receivers, drainage pipes, filtration calculation, filtration rate, thickness of filtering layers, water head, throughput, hydraulic calculation

Citation format: Kurbanov S.O., Sozaev A.A., Zherugov R.A. Calculation justification for under-channel water intake structures of combined designs // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 80-85. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-80-85>

Введение. Проблемы эффективного использования водных ресурсов малых рек и надежности работ водозаборных сооружений являются актуальными для регионов Юга России и Северного Кавказа. Многие водозаборные сооружения, построенные на малых реках, находятся в неудовлетворительном эксплуатационном состоянии и нуждаются в полной реконструкции, а применяемые при этом методы фильтрационных и гидравлических расчетов нуждаются в совершенствовании [1-6].

Для условий предгорных участков малых рек авторами разработан ряд вариантов подрусовых водозаборных сооружений комбинированных и биопозитивных конструкций [7-11]. Эти водозаборы относятся к экологически эффективным сооружениям, характеризуются низкой материалоемкостью и энергоемкостью. Предлагаемые водозаборные сооружения обходятся без специальных отстойников, конструкции их фильтрующих водоприемников обеспечивают очистку воды от взвешенных наносов и загрязнений.

Цель исследований: разработка методов расчетного обоснования предлагаемых подрусовых водозаборных сооружений.

Материалы и методы исследований. Для расчетного обоснования и проектирования новых конструкций подрусовых водозаборных сооружений были изучены существующие методы расчета подрусовых фильтрующих водозаборных сооружений. На основе теоретических исследований они были переработаны и приспособлены для расчета водозаборных сооружений авторской разработки [6, 8].

Один из вариантов подрусового водозабора комбинированной конструкции, который защищен двумя патентами на изобретения [9, 10], приведен на рисунке 1, который состоит из водоприемного лотка, поверх которого устроен фильтрующий водоприемник с габионными тюфяками и георешетками, заполненными щебнем. Устраивается водозабор в прибрежном затопляемом участке реки так, чтобы отметка верха фильтрующего водоприемника находилась на уровне отметок дна затопляемой поверхности пойменного участка реки.

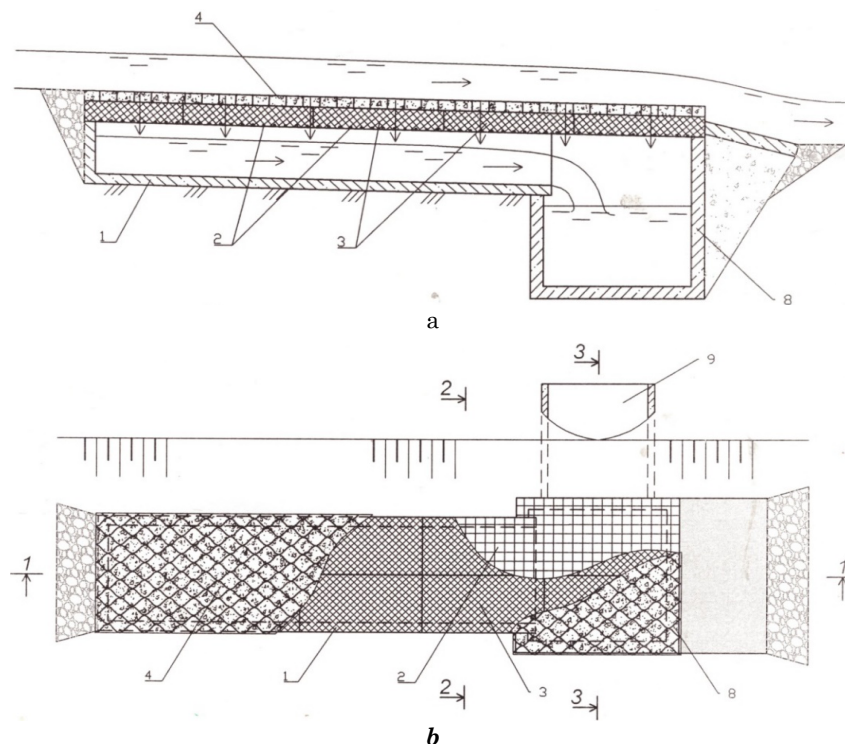


Рис. 1. Продольный разрез *a* и план *b* подрусового водозабора комбинированной конструкции:

- 1 – водоприемный лоток; 2 – фильтрующий водоприемник;
3 – габионные тюфяки; 4 – георешетки, заполненные щебнем

Fig. 1. Longitudinal section *a* and plan *b* of a combined design of under-channel water intake
1 – water intake tray; 2 – filtering water intake; 3 – gabion mattresses; 4 – geogrids filled with crushed stone

Для обоснования принятой конструкции подруслового водозабора и надежности его работы необходимо произвести фильтрационные и гидравлические расчеты. Фильтрационными расчетами определяют конструкцию и размеры водоприемной части лотка, а гидравлическими расчетами определяют размеры и пропускную способность водоприемного лотка и отводящего (водозаборного) трубопровода.

Фильтрационный расчет можно произвести из условия обеспечения эффективной фильтрации и очистки воды от взвешенных наносов, чтобы водоприемный лоток обеспечивал прием необходимого количества очищенной воды (расчетного расхода), с учетом мутности речной воды, затапливающей фильтрующую поверхность водоприемника лотка. При затоплении этой поверхности водоприемная часть лотка работает как дренаж, то есть под действием гравитационных сил происходит фильтрация воды, которая просачивается через щебенку георешеток и габионные тюфяки в водоприемный лоток. При этом, скорость фильтрации в дренирующем водоприемнике можно определить по формуле:

$$V_{\phi} = K_{\phi} I, \tag{1}$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации грунтов водоприемника, м/сут.; I – градиент фильтрационного потока $I = H_1/L$; H_1 – напор воды – разность уровней воды над фильтрующей поверхностью лотка и внутриводоприемного лотка (рис. 1); L – длина пути фильтрации, в данном случае – толщина фильтрующих слоев габионных тюфяков и георешеток, м.

Фильтрационный расход и приток воды в водоприемный лоток можно определить по формуле:

$$Q_{\phi} = V_{\phi} S_{\phi}, \tag{2}$$

где S_{ϕ} – площадь фильтрующей поверхности водоприемника, м²;

$$S_{\phi} = Bl,$$

где B – ширина водоприемной части лотка, м; l – длина водоприемника лотка, м.

Размеры водоприемной части лотка B и l определяют из условия обеспечения расчетного расхода воды в лотке $Q_p = Q_{\phi}$.

Внутренние гидравлические характеристики лотка (ширину b , глубину наполнения h) определяют из условия обеспечения квазиравномерного режима движения воды в лотке, а уклон i принимают равным уклону русла реки.

По формуле Шези

$$Q = wC(Ri)^{1-2}, \tag{3}$$

где w – площадь живого сечения, м²; C – коэффициент Шези;

$$C = 1 / nR^{1/6}, \text{ м} / \text{с}^2, \tag{4}$$

где n – коэффициент шероховатости лотка; R – гидравлический радиус;

$$R = w / X, \text{ м}, \tag{5}$$

где X – смоченный периметр, для прямоугольного сечения лотка $X = b + 2h$.

В конце водоприемного лотка устроен водозаборный колодец, который обеспечивает сбор и подачу профильтрованной воды в отводящий (водозаборный) трубопровод.

Отводящий трубопровод работает также в безнапорном режиме, его характеристики определяют по формулам (3)-(5) квазиравномерного движения воды. При этом площадь сечения w и смоченный периметр X определяют, как для круглого сечения. Уклон i и диаметр d отводящей трубы принимают из условия, что пропускная способность трубы (Q_p) обеспечивается при заполнении водой 0,65 площади сечения трубы и при уклоне, равном уклону рельефа местности.

Еще один вариант водозабора авторами разработан как усовершенствованный вариант подруслового водозабора [11]. Водозабор работает как горизонтальный дренаж, расчетная схема которого приведена на рисунке 2. Водозабор представляет собой дренажную трубу, устроенную в решетчатом лотке, внутри загруженном щебнем, который устраивается в однослойном грунтовым массиве поймы реки и недалеко от основного

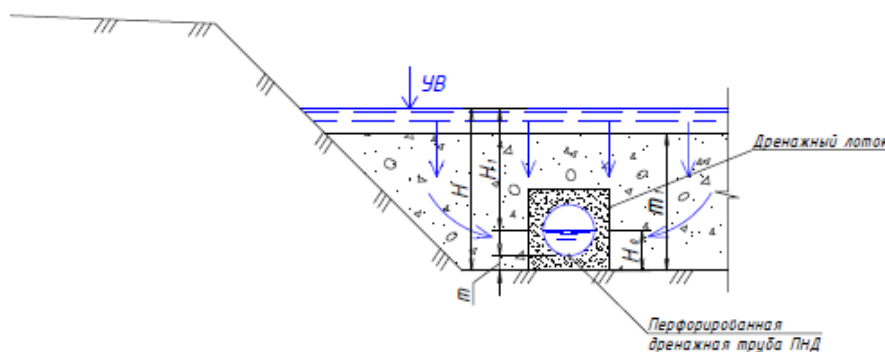


Рис. 2. Расчетная схема подруслового водозабора с дренажным лотком

Fig. 2. Design scheme of a sub-channel water intake with a drainage tray

русла реки. Водозабор состоит из лотка призматической формы, изготовленного из арматурных решеток. Внутренняя часть лотка полностью обшита геотекстилем и загружена щебнем, и на 1/3 высоты лотка смонтирована перфорированная (дренажная) труба марки ПНД. Дренажный лоток с фильтрующей загрузкой и трубой располагается в траншее по уклону русла реки, сверху и сбоку полностью засыпается речным песчано-гравелистым и галечниковым грунтом. Поверхность над дренажным лотком расчищается и планируется по уклону лотка, подводится речной поток, и затапливается вся фильтрующая поверхность над лотком. При этом под действием гравитационных сил происходит фильтрация воды через слой грунта и фильтрационную загрузку лотка в дренажную трубу. А дренажная труба через перфорацию (водоприемные отверстия) принимает и проводит воду в отводящий трубопровод.

Вокруг дренажных труб устраиваются обратные фильтры из нескольких слоев фильтрующих материалов. В нормативной литературе, п. 2.1, 2.2 и 2.3 (Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений П 56-90 ВНИИГ. С.-Петербург, 1992), даются рекомендации по подбору обратных фильтров для гидротехнических сооружений. Согласно данным рекомендациям для обратных фильтров гидротехнических сооружений рекомендуется использовать несупфозионные грунты. На рисунке 2 по этим рекомендациям представлены расчетные параметры несупфозионных грунтов и их гранулометрические составы несвязных грунтов (в относительных координатах).

По этим графикам вокруг и наверху дренажной трубы принимают 2-3 слоя основных фильтрующих материалов. Первый слой толщиной 200-250 мм состоит из щебня (размеры частиц – 5-30 мм) с коэффициентом разнородности $K_{60,10} = 5...10$. Второй слой – из речного песчано-гравелистого грунта (фракции 0,5-100 мм) толщиной до 50 см и более с коэффициентом разнородности $K_{60,10} = 5...20$. При необходимости и третий слой формируют из крупного песка (фракции 0,5-3 мм). Эти фильтрующие материалы (щебень, гравий и крупный песок) должны быть несупфозионными и проверяются согласно названным графикам.

Фильтрационный расчет дренажного лотка. Фильтрационный расчет производят из условия обеспечения эффективной фильтрации и очистки воды от взвешенных наносов, чтобы дренажная труба обеспечивала прием необходимого количества очищенной воды.

Вода, поступающая из реки на фильтрующую поверхность над дренажным лотком, под действием гравитационных сил просачивается через слой песчано-гравелистых грунтов и щебенчатую загрузку лотка в дренажную трубу. При этом происходит очистка воды от мутной взвеси.

Расчетная схема работы дренажной трубы приведена на рисунке 2.

Скорость фильтрации в дренажах можно определить по формуле (1), где напор H_1 для определения градиента фильтрационного потока I определяется как разность уровней воды над лотком и в дренажной трубе (рис. 2).

Фильтрационный расход притока воды в дренажную трубу можно определить по формуле (2), где $S_{1ф}$ – фильтрующая площадь вокруг поверхности дренажной трубы – определяется как

$$S_{1ф} = \pi d l,$$

где d – наружный диаметр трубы; l – длина дренажной трубы; πd – длина круга.

По расчетам диаметр d и длину l дренажной трубы определяют из условия обеспечения расчетного расхода в дренажной трубе как $Q = Q_p$.

Расчет для данного варианта подруслового водозабора можно выполнить и по рекомендациям из технической литературы [6]. По этим рекомендациям приток воды в подрусловый водозабор, находящейся в однослойном фильтрующем грунтовом массиве, находится по формуле:

$$Q = 2\pi k l \frac{H - H_0}{R}, \quad (6)$$

где k – коэффициент фильтрации грунтов вокруг дренажного лотка (водоносного горизонта), м/сут.; l – длина дренажной трубы, м; H – напор воды (разность отметок уровней воды над поверхностью фильтрации и линии основания лотка), м; H_0 – разность отметок уровней воды в дренажной трубе и линии основания, м; R – гидравлическое сопротивление в фильтрационном массиве грунта, определяемое по формуле:

$$R = \ln \left[\operatorname{tg} \frac{\pi(\Delta m - d)}{2m_1} \operatorname{ctg} \frac{\pi d}{8m_1} \right], \quad (7)$$

где m_1 – мощность водоносного горизонта от дна русла до основания дренажного лотка, м; d – диаметр дренажной трубы, м; m – расстояние от низа дренажной трубы до основания (плоскости сравнения). По этому расчету предварительно принимаются диаметр d и длина l дренажной трубы; из условия обеспечения расчетного расхода в дренажной трубе $Q = Q_p$.

Предварительно принятые размеры дренажной трубы уточняют по расчету притока воды через щелевые отверстия перфорированных труб ПНД.

Расчет притока воды через щелевые отверстия дренажных труб. Для обеспечения

нормальной работы дренажных труб глубина воды над поверхностью фильтрации должна быть в пределах 0,2-0,35 м. При этой глубине дренажная система водозабора работает нормально, приток необходимого количества воды через щелевые отверстия труб обеспечивается, и по расчету подбирается длина дренажных труб из условия обеспечения их расчетной производительности $Q = Q_p$, м³/с.

Необходимо отметить, что трубы из полиэтилена низкого давления (ПНД) обладают высокой степенью надежности работ, поэтому их рекомендуют в качестве дренажных труб.

Основные характеристики дренажных труб марки ПНД приведены в справочных данных (www.complexdoc.ru). Зная эти характеристики, можно определить пропускную способность q_{oi} (расход) одного щелевого отверстия по формуле:

$$q_{oi} = m_o f_o (2gh_o)^{0,5}, \quad (8)$$

где m_o – коэффициент расхода щелевого отверстия; f_o – площадь одного щелевого отверстия, м²; g – ускорение свободного падения, м²/с; h_o – потери напора при истечении из отверстия, м, которые могут быть приравнены к минимальному напору воды над щелевым отверстием, м.

С учетом сопротивления вокруг трубы и наверху расход щелевого отверстия уменьшается значительно, и для учета этого сопротивления в формулу (1) вводится коэффициент сопротивления k_s , который находится в пределах 0,1...0,3:

$$q_{oi} = k_s m_o f_o (2gh_o)^{0,5}. \quad (9)$$

Значения коэффициента расхода m_o берется также из справочных данных в зависимости от числа Рейнольдса (Re) и d_{17}/t_o .

Коэффициент расхода m_o зависит от числа Рейнольдса (Re) и отношения d_{17}/t_o , где t_o – ширина щели; d_{17} – диаметр частиц слоя обсыпки, прилегающей к водоприемной поверхности, соответствующий 17%-ному содержанию их в granulometricком составе зерен обсыпки. В расчетный состав обсыпки включаются фракции обсыпки крупнее $0,4t_o$.

Список использованных источников

- Карпенко Н.П., Беглярова Э.С., Соколова С.А., Матвеева Т.И. Фильтрационные расчеты водопонижения при строительстве инженерных коммуникаций // Природообустройство. 2021. № 1. С. 126-133. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-1-126-133> EDN: UUXTZA
- Косиченко Ю.М., Баев О.А. Особенности гидравлических и фильтрационных расчетов осушительно-оросительной системы // Природообустройство. 2021. № 4. С. 90-98. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-4-90-98> EDN: CULLVY
- Курбанов С.О., Созаев А.А. Новые конструктивные и технологические решения по водозаборным сооружениям

Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$R_{eA} = t_o 2gh_o / n_k, \quad (10)$$

где n_k – коэффициент кинематической вязкости фильтрующей воды, принимаемый равным $1,31 \times 10^6$ м²/с.

Подставляя эти значения в формулу (10), определяют число Рейнольдса, по которому подбирают m_o из справочных данных труб ПНД.

Далее, подставляя все полученные значения в формулу (9), определяют расход q_{oi} одного щелевого отверстия трубы. Затем, зная количество щелевых отверстий на длине 1 м трубы, определяют расход q_p , который дает 1 м дренажной трубы. Наконец, зная расход q_p , определяют необходимую длину L дренажной трубы: $L = Q_p / q_p$. Полученное значение длины дренажной трубы округляют до целого значения в большую сторону и окончательно его принимают за расчетную длину.

По результатам произведенных фильтрационных и гидравлических расчетов окончательно принимают конструкцию, размеры и технологию возведения водоприемных (дренажных) устройств и проводящей сети проектируемого подруслового водозаборного сооружения, а также генплан всех сооружений.

Выводы

- По результатам проведенных аналитических исследований известные методы фильтрационных и гидравлических расчетов горизонтальных водозаборов переработаны и приспособлены для расчетного обоснования подрусловых водозаборных сооружений авторской разработки.
- Предлагаемые методы расчета позволяют подобрать оптимальные размеры и конструкции подрусловых водозаборов, а также определить их производительность и пропускную способность.
- Представленные методы расчета могут быть использованы при проектировании подрусловых водозаборных сооружений на малых реках для нужд прибрежных мелиоративных систем и систем водоснабжения фермерских хозяйств.

References

- Karpenko N.P., Beglyarova E.S., Sokolova S.A., Matveeva T.I. Filtration calculations of water lowering in the construction of engineering communications / Prirodoobustroystvo. 2021. No 1. P. 126-133. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-1-126-133> EDN: UUXTZA
- Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Features of hydraulic and filtration calculations of drainage and irrigation system // Prirodoobustroystvo. 2021. No 4. P. 90-98. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-4-90-98> EDN: CULLVY
- Kurbanov S.O., Sozaev A.A. New constructive and technological solutions for water intake structures of reclamation

мелиоративных систем предгорных зон // Журнал Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 4 (84) С. 24-31. EDN: XLYIVN

4. Курбанов С.О., Созаев А.А., Чапаев Т.М., Сасиков А.С. Экологически эффективные технологии регулирования малых рек и строительства мелиоративных водозаборов // International agricultural journal № 6. 2020. <https://iacj.eu/index.php/iacj/article/view/315>. EDN: GQFSUV

5. Палиивец М.С. Гидравлический расчет трубопровода с учетом длин влияния местных сопротивлений и их интерференции // Природообустройство. 2022. № 1. С. 102-108 <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-1-102-108>. EDN: IRGFAG

6. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02-84). ВНИИ ВОДГЕО Москва. 1986.

7. Патент № 2518634 Российская Федерация, МПК E02B 9/04 (2006.01), E03B 9/04 (2006.01), Подрусловой фильтрующий водозабор комбинированной конструкции: № 2012135660: заявл. 20.08.2012; опубл. 10.06.2014 / Джамалудинов М.М., Курбанов С.О.; заявитель ООО НПФ «Берег». 6 с.

8. Патент № 2518456 Российская Федерация, МПК E02B 9/04 (2006.01). Способ возведения подруслового фильтрующего водозабора комбинированной конструкции: № 012135664: заявл. 20.08.2012; опубл. 10.06.2014 / Джамалудинов М.М., Курбанов С.О.; заявитель ООО НПФ «Берег». 6 с.

9. Патент № 2747488 Российская Федерация, МПК E02B 9/04 (2006.01), E02B 9/04 (2021.01) Подрусловой водозабор комбинированной конструкции: № 2020131884 заявл. 25.09.2020; опубл. 05.05.2021 / Курбанов С.О., Балкизов А.Б.; заявитель Кабардино-Балкарский ГАУ. 6 с.

10. Патент № 2747490 Российская Федерация, МПК E02B 9/04 (2006.01). Способ возведения подруслового водозабора комбинированной конструкции. № 2020131881: заявл. 25.09.2020; опубл. 05.05.2021 / Курбанов С.О., Созаев А.А., Кудяев Т.Ш.; заявитель Кабардино-Балкарский ГАУ. 6 с.

11. Патент № 2758237 Российская Федерация, МПК E02B 11/00 (2021.02), E03B 3/06. Способ возведения горизонтального водозаборного сооружения комбинированной конструкции: № 2020131903: заявл. 15.09.2020; опубл. 26.10.2021 / Курбанов С.О., Созаев А.А.; заявитель Кабардино-Балкарский ГАУ. 7 с.

Об авторах

Салигаджи Омарович Курбанов, канд. техн. наук, доцент; WoSResearcherID: AAB-7875-2020; Scopus AuthorID: 70062553868; ORCID: 0000-0001-5230-7053; SPIN-код: 2067-1130; Author ID: 361638; 05bereg@rambler.ru

Ахмед Абдулкеримович Созаев, канд. техн. наук, доцент; WoSResearcherID: AAB-7728-2020; Scopus Author ID: 57219247588; ORCID: 0000-0002-8505-124X; SPIN-код: 8151-1898; Author ID: 805100; sozaev07@mail.ru

Ратмир Арсенович Жеругов, аспирант; PIN-код: 5092-7150, AuthorID: 1038179 Россия

Критерии авторства / Authorship criteria

Курбанов С.О., Созаев А.А., Жеругов Р.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 interest

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

Вклад авторов / Contribution of authors

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

Статья поступила в редакцию / The article was received at the editorial office 15.10.2025

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review on 03.11.2025

Принята к публикации после доработки / Accepted for publication on 03.11.2025

systems of foothill zones // Journal Water and ecology: problems and solutions. 2020. No 4 (84) P. 24-31. EDN: XLYIVN

4. Kurbanov S.O., Sozaev A.A., Chapaev T.M., Sasikov A.S. Ecologically efficient technologies for regulating small rivers and building reclamation water intakes // International agricultural journal № 6. 2020. <https://iacj.eu/index.php/iacj/article/view/315>. EDN: GQFSUV

5. Paliivets M.S. Hydraulic calculation of the pipeline taking into account the length of the influence of local resistances and their interference // Prirodoobustroistvo. 2022. № 1. P. 102-108. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-1-102-108>. EDN: IRGFAG

6. Handbook for the design of groundwater intake facilities (to SNiP 2.04.02-84). VNI VODGEO Moscow. 1986.

7. Patent No 2518634 Russian Federation, IPC E02B9/04 (2006.01), E03B9/04 (2006.01), Underflow filtering water intake of combined design: No2012135660: application. 20.08.2012: publ. 10.06.2014 / Jamaludinov M.M., Kurbanov S.O.; applicant NPF Bereg LLC. 6 p.

8. Patent No 2518456 Russian Federation, IPC E02B9/04 (2006.01). Method of erection of under-channel filtering water intake of combined design: No2012135664: application. 20.08.2012: publ. 10.06.2014 / Jamaludinov M.M., Kurbanov S.O.; applicant NPF Bereg LLC. 6 p.

9. Patent No 2747488 Russian Federation, IPC E02B9/04 (2006.01), E02B9/04 (2021.01) Underflow water intake of combined design: No 2020131884 application. 25.09.2020: published 05.05.2021 / Kurbanov S.O., Balkizov A.B.; applicant: Kabardino-Balkarian State Agrarian University. 6 p.

10. Patent No 2747490 Russian Federation, IPC E02B9/04 (2006.01). Method of erecting a combined structure of an underflow water intake. No 2020131881: declared. 25.09.2020: publ. 05.05.2021 / Kurbanov S.O., Sozaev A.A., Kudyaev T.Sh.; applicant: Kabardino-Balkarian State Agrarian University. 6 p.

11. Patent No 2758237 Russian Federation, IPC E02B11/00 (2021.02), E03B3/06. Method of erection of a horizontal water intake structure of a combined structure: No 2020131903: application. 15.09.2020: publ. 26.10.2021 / Kurbanov S.O., Sozaev A.A.; applicant: Kabardino-Balkarian State Agrarian University. 7p.

About the Authors

Saligadzhi O. Kurbanov, CSc (Tech), associate professor; WoS Researcher ID: AV-7875-2020; Scopus Author ID: 70062553868; ORCID: 0000-0001-5230-7053; SPIN code: 2067-1130; Author ID: 361638; 05bereg@rambler.ru

Ahmed A. Sozaev, CSc (Tech), associate professor WoS Researcher ID: AV-7728-2020; Scopus Author ID: 57219247588; ORCID: 0000-0002-8505-124X; SPIN code: 8151-1898; AuthorID: 805100; sozaev07@mail.ru

Ratmir A. Zherugov, post graduate student; SPIN code: 5092-7150, AuthorID: 1038179 Russia.

Kurbanov S.O., Sozaev A.A., Zherugov R.A. carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have a copyright for the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-86-91>

УДК 627.83:626.88



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА СВОБОДНО ЛЕЖАЩЕЕ БЕТОННОЕ ПОЛОТНО МАРКИ BE-NOTEX SK

В.А. Фартуков^{1✉}, С.Н. Щукин², М.И. Зборовская³, К.С. Семенова⁴, А.А. Кадысова⁵

^{1,2,3,4,5} ФГБОУ ВО 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

¹ fartukov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757

² 89031025452@mail.ru

³ zborovskya@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757

⁴ kristi11.05.88@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-4446-4435

⁵ kadyseva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684

Аннотация. Целью исследований являлась экспериментальная оценка воздействия пульсаций давления водного потока на устойчивость свободно лежащего противодиффузионного покрытия из бетонного полотна BE-NOTEX SK в канале трапецидального сечения. Исследования проводились на физической модели в лабораторном лотке при расходах воды 84, 120 и 168 л/с. Гидродинамическое давление измерялось синхронно на поверхности покрытия и под ним с помощью датчиков ДД-10, что позволило определить разность давления и оценить риски отрыва полотна. Для обработки сигналов использовался специализированный измерительный комплекс с активной фильтрацией. Установлена зависимость амплитуды и частоты пульсаций давления от расхода воды. Выявлено, что максимальные пиковые значения частот (до 800 Гц) наблюдаются под покрытием на откосе. Разность давления на верхней и нижней поверхностях полотна не превышает 2,7 см вод. ст., что свидетельствует об отсутствии значительных отрывных усилий. Покрытие сохраняло устойчивость без деформаций при скорости потока до 1,86 м/с. На основании экспериментальных данных подтверждена эффективность применения бетонного полотна BE-NOTEX SK в качестве защитного покрытия каналов. Установлено, что для обеспечения устойчивости минимальная пригрузка полотна может быть снижена до 0,08-0,10 от величины гидростатического давления.

Исследование выполнено в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-ТСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025)

Ключевые слова: гидродинамическое давление, пульсации давления, защитное покрытие, защитное покрытие, устойчивость покрытия, экспериментальные исследования

Формат цитирования: Фартуков В.А., Щукин С.Н., Зборовская М.И., Семенова К.С., Кадысова А.А. Результаты исследований гидродинамического давления на свободно лежащее бетонное полотно марки BE-NOTEX SK // Природообустройство. 2025. № 5. С. 86-91. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-86-91>

Original article

RESULTS OF RESEARCH OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON A FREE-LYING CONCRETE SLAB OF BE-NOTEX SK BRAND

V.A. Fartukov^{1✉}, S.N. Shchukin², M.I. Zborovskaya³, K.S. Semenova⁴, A.A. Kadysova⁵

^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

¹ fartukov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757

² 89031025452@mail.ru

³ zborovskya@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757

⁴ kristi11.05.88@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-4446-4435

⁵ kadyseva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684

Abstract. The aim of the research was to experimentally evaluate the effect of pressure pulsations of a water stream on the stability of a free-lying anti-filtration coating made of BE-NOTEX SK concrete in a trapezoidal channel. The studies were carried out on a physical model in a laboratory tray with water flow rates of 84, 120 and 168 liters/s. The hydrodynamic pressure was measured synchronously on the surface of the coating

and under it using DD-10 sensors, which made it possible to determine the pressure difference and assess the risks of tearing the web. A specialized measuring system with active filtering was used for signal processing. The dependence of the amplitude and frequency of pressure pulsations on the water flow rate has been established. It was revealed that the maximum peak frequency values (up to 800 Hz) are observed under the pavement on the slope. The pressure difference on the upper and lower surfaces of the web does not exceed 2.7 cm of water, which indicates the absence of significant tear-off forces. The coating remained stable without deformations at flow rates up to 1.86 m/s. Based on experimental data, the effectiveness of using BE-NOTEX SK concrete sheet as a protective coating of channels has been confirmed. It was found that to ensure stability, the minimum loading of the web can be reduced to 0.08-0.10 of the hydrostatic pressure value.

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

Keywords: hydrodynamic pressure, pressure pulsations, protective coating, coating stability, experimental studies

Format of citation: Fartukov V.A., Shchukin S.N., Zborovskaya M.I., Semenova K.S., Kadysova A.A. Results of research of hydrodynamic pressure on a free-lying concrete slab of BE-NOTEX SK brand // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 86-91. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-86-91>

Введение. Эффективная и безопасная эксплуатация гидромелиоративных каналов во многом определяется надежностью их противофильтрационных и защитных покрытий. Одной из актуальных проблем при проектировании и эксплуатации таких сооружений является обеспечение устойчивости покрытий к динамическим нагрузкам, создаваемым движущимся потоком воды [1, 2]. Пульсации гидродинамического давления, носящие случайный характер, могут вызывать вибрацию, и в крайних случаях – отрыв материала от основания, что приводит к разрушению конструкции [3].

В последнее время все более широкое применение находят инновационные материалы – такие, как бетонные полотна. Полотно BE-NOTEX SK представляет собой гибкую полимерную конструкцию, заполненную сухой бетонно-песчаной смесью, которая после гидратации водой образует прочный, водонепроницаемый и долговечный слой [5]. Несмотря на заявленную производителем устойчивость к различным воздействиям, включая гидродинамические нагрузки, вопросы, связанные с характером и величиной пульсационного давления на такое покрытие и под ним изучены недостаточно полно [6, 7].

Цель исследований: экспериментальное изучение характеристик гидродинамического давления (амплитуды и частоты пульсаций) на поверхности свободно лежащего бетонного полотна BE-NOTEX SK и под ним при различных расходах воды, а также оценка его устойчивости к возникающим нагрузкам.

Материалы и методы исследований. Экспериментальные исследования проводились

на физической модели канала (лотка) трапецидального профиля в лабораторных условиях. Ширина дна лотка составляла 485 мм. В качестве исследуемого материала использовалось бетонное полотно BE-NOTEX SK шириной 473 мм, уложенное свободно (без механического крепления) на дно и откосы лотка.

Гидравлические режимы моделировались путем подачи воды в лоток с помощью насосной установки. Были заданы три значения расхода: 84, 120 и 168 л/с, что соответствовало средним скоростям потока 1,24; 1,53; 1,86 м/с.

Для измерения гидродинамического давления использовался комплект из четырех индукционных датчиков давления ДД-10 [8-10]. Датчики были установлены попарно в двух створах (рис. 1). Такая схема позволила синхронно

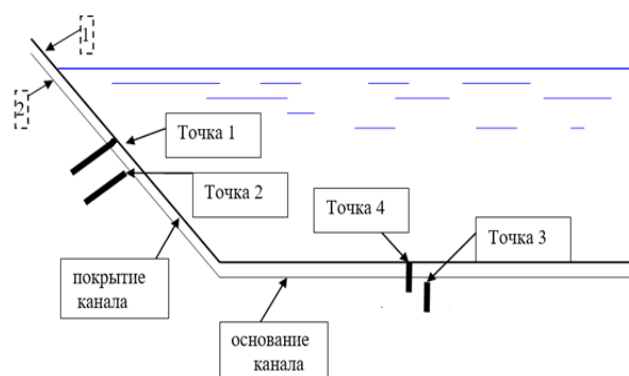


Рис. 1. Расположение датчиков в лотке:
1 – полотно бетонное; 2 – лоток; точка 1 – датчик 1;
точка 2 – датчик 2; точка 3 – датчик 3;
точка 4 – датчик 4

Fig. 2. Location of sensors in the tray:
1 – concrete slab; 2 – tray; point 1 – sensor 1;
point 2 – sensor 2; point 3 – sensor 3; point 4 – sensor 4

регистрировать давление по обе стороны от покрытия и определять перепад давлений, являющийся ключевым фактором для оценки отрывных усилий.

Измерительная система состояла из трех основных групп оборудования (рис. 2): измерение пульсации давления; измерение скоростей потока; анализ и обработка данных. В группу приборов измерения пульсации А входят датчики ДД-10 (1), подключенные к микропроцессорному измерителю давления. Для подавления высокочастотных помех и наводок в цепь был включен активный фильтр нижних частот 3-го порядка Баттерворта (2). Сигнал усиливался усилителем (4), питаемым от блока питания (3). Регистрация сигналов осуществлялась с помощью четырехканального осциллографа АСК-3107 (5).

В группу приборов В (измерение скоростей потока) входит микровертушка (6) с преобразователем сигнала (7), которые позволяют осуществлять контроль скорости потока.

В группе приборов С (анализ и обработка данных) аналоговые сигналы с осциллографа

и преобразователя скорости оцифровывались и передавались на персональный компьютер (8). Обработка данных, включая спектральный анализ, производилась с использованием программных комплексов ViewLab, PC-Lab2000 и Mathcad 14.

Обработка результатов измерений включала в себя статистический анализ. Погрешность измеренных осредненных характеристик пульсаций давления не превышала 10% при доверительной вероятности 90% (интервал $\pm 2\sigma$) и 99,7% при интервале $\pm 3\sigma$ [11]. Результаты, выходящие за эти интервалы, классифицировались как «выбросы» и исключались из дальнейшего анализа. Для управления измерительным комплексом использовался платформонезависимый интерфейс, описанный в работе [3].

Результаты и их обсуждение. В ходе экспериментов были получены данные по амплитудно-частотным характеристикам пульсаций давления для всех контрольных точек и режимов течения (табл. 1).

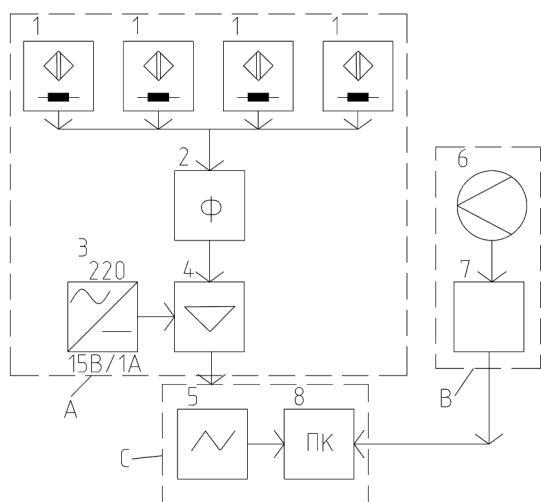


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной установки:

А – группа приборов определения пульсации давления; В – определение скоростей потока; С – анализ и обработка данных (1 – датчиками давления ДД-10; 2 – активным фильтром 3-го порядка Баттерворта; 3 – блоком питания; 4 – усилителем; 5 – осциллографом АСК-3107; 6 – микровертушкой; 7 – преобразователем сигнала; 8 – персональным компьютером)

Fig. 2. Schematic diagram of the measuring system:

A – a group of pressure pulsation detection devices; B – determination of flow rates; C – data analysis and processing with 1 – DD-10 pressure sensors; 2 – an active 3rd-order Butterworth filter; 3 – a power supply unit; 4 – an amplifier; 5 – an ASK-3107 oscilloscope; 6 – a micro-coil; 7 – signal converter, 8 – personal computer

Таблица 1. Результаты замеров пульсаций давлений

Table 1. Results of pressure pulsation measurements

Расход воды в канале, л/с Water consumption in the channel, l/s	Среднее значение пульсации давления, см вод. ст. Average pressure pulsation value, cm of water column	Частота, Гц Frequency, Hz	Скорость, м/с Speed, m/s
Датчик точки 1 / Point 1 sensor			
168	56,3	400/570	1,86
120	54,12	500	1,53
84	41,04	400	1,24
Датчик точки 2 / Point 2 sensor			
168	49,67	120/800	1,86
120	47,35	–	1,53
84	37,46	320/670	1,24
Датчик точки 3 / Point 3 sensor			
168	56,93	–	1,86
120	55,63	–	1,53
84	45,93	–	1,24
Датчик точки 4 / Point 4 sensor			
168	66,3	350/700	1,86
120	64,12	550	1,53
84	51,04	200/700	1,24

С увеличением расхода (и скорости) потока закономерно возрастают средние значения пульсаций давления во всех точках измерений. Например, для датчика 1 (откос, вверх) при росте расхода с 84 до 168 л/с среднее давление увеличилось с 41,04 до 56,30 см вод. ст., что согласуется с известными закономерностями [1]. Наблюдается сложный многопиковый характер спектра пульсаций, особенно под покрытием (датчики 2 и 4). При максимальном расходе под покрытием на откосе (датчик 2) фиксируются пики на частотах 120 и 800 Гц, что свидетельствует о наличии высокочастотных составляющих, обусловленных, вероятно, турбулентными вихреобразованиями в зазоре между полотном и основанием, аналогично эффектам, описанным в работе [3]. На откосе (точки 1, 2) зафиксированы более высокочастотные пульсации по сравнению с дном (точки 3, 4), где резких пиков частот не наблюдалось. Это согласуется с теорией о более сложной и нестационарной структуре потока на наклонных участках [1].

Для оценки устойчивости покрытия выполнен анализ разности давления на его верхней и нижней поверхностях (табл. 2).

На откосе давление на поверхности покрытия всегда превышает давление под ним (положительная разность), что создает прижимной эффект. На дне наблюдается обратная, но незначительная картина. Величина перепада давления невелика (максимум 2,7 см вод. ст. на откосе при $Q = 120$ л/с), что указывает на отсутствие значительных отрывных усилий, способных дестабилизировать покрытие.

Значение «Превышение давления» (отношение давления под покрытием к давлению

на нем, %) составляет от 94 до 98%. Это означает, что результирующая сила, стремящаяся оторвать покрытие, составляет лишь 2-6% от общего гидродинамического давления, что является благоприятным фактором для устойчивости и подтверждает результаты, полученные ранее для других типов покрытий [2, 3].

Визуальный осмотр покрытия после испытаний подтвердил его целостность и отсутствие деформаций включая режим с максимальной скоростью потока 1,86 м/с.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить количественную оценку гидродинамического воздействия на свободно лежащее бетонное полотно BE-NOTEX SK. Установлено, что в диапазоне расходов 84-168 л/с (скоростей 1,24-1,86 м/с) покрытие демонстрирует высокую устойчивость.

1. Выявлена прямая зависимость амплитуды пульсаций давления от расхода воды. Частотный спектр пульсаций под покрытием характеризуется наличием высокочастотных составляющих (до 800 Гц), что особенно отражается на откосе.

2. Определено, что разность гидродинамических давлений на верхней и нижней поверхностях полотна незначительна и не создает критических отрывных усилий. Результирующая подъемная сила не превышает 6% от действующего давления.

3. Подтверждено, что бетонное полотно BE-NOTEX SK сохраняет свою целостность и положение без деформаций при скоростях потока до 1,86 м/с, что свидетельствует о его эффективности в качестве защитного покрытия каналов

Таблица 2. Гидродинамических показателей дна и откоса лотка, укрепленного бетонных полотном

Table 2. Hydrodynamic indicators of the bottom and slope of the tray reinforced with concrete coating

Расход, л/с <i>Consumption, l/s</i>	Скорость потока, м/с <i>Flow speed, m/s</i>	Гидродинамическое давление, см вод. ст. <i>Hydrodynamic pressure, cm wat. st.</i>	Гидродинамическое давление, см вод. ст. <i>Hydrodynamic pressure, cm wat. st.</i>	Разница гидродинамического давления, см вод. ст. <i>Pressure difference, cm wat. st.</i>	Превышение гидродинамического давления, % <i>Excess hydrodynamic pressure, %</i>
		Датчик точки 1	Датчик точки 2		
168,0	1,86	51,20	49,7	1,50	97,0
120,0	1,53	46,70	44,0	2,70	94,2
84,0	1,24	42,05	39,6	2,45	94,0
		Датчик точки 3	Датчик точки 4		
168,0	1,86	60,9	62,1	1,2	98,0
120,0	1,53	55,2	56,8	1,6	97,0
84,0	1,24	50,1	51,9	1,8	96,5

Выводы

Разработана и апробирована методика комплексной экспериментальной оценки гидродинамической устойчивости гибких защитных покрытий, позволяющая синхронно измерять давление на поверхности и под материалом.

Установлены фактические характеристики пульсационного давления (амплитуда, частотный диапазон 1-800 Гц) для бетонного полотна BE-NOTEX SK при различных гидравлических режимах.

Список использованных источников

1. Козлов К.Д. Исследования гидродинамического воздействия водного потока на защитное покрытие из геосинтетического материала / К.Д. Козлов, Н.В. Ханов, В.А. Фартуков, Д.В. Козлов // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8, № 1(27). С. 9.
2. Фартуков В.А. Инновационная система гидродинамических исследований водного потока / В.А. Фартуков, М.В. Земляникова // Природообустройство. 2016. № 3. С. 75-79. EDN: WJLCPZ
3. Фартуков В.А. Ментальный платформ независимый интерфейс управления лабораторными исследованиями гидротехнических сооружений / В.А. Фартуков, М.В. Земляникова, Н.В. Ханов // Природообустройство. 2020. № 2. С. 66-68. EDN: YHYJPK
4. Полотно бетонное Be-Notex SK. СТО 65458320-010-2023 [электронный ресурс] URL: <https://geovostok.ru/catalog/betonnnoe-polotno> (дата обращения 25.06.24).
5. Результаты гидравлических исследований геоматов марки Энкамат А20 и Энкамат 7225, заполненных грунтом с посевом многолетних трав / Н.В. Ханов, О.Н. Черных, С.Н. Щукин [и др.] // Природообустройство. 2024. № 5. С. 71-79. EDN: MQRYSW
6. Фролов А.С. Создание и первый опыт эксплуатации вновь разработанного программного комплекса для моделирования гидравлических систем / А.С. Фролов, К.А. Труханов, С.В. Лупуляк [и др.] // Гидравлика. 2022. № 17. С. 49-60.
7. Логиновский О.В. Разработка программного комплекса для испытания цифровых измерительных трансформаторов на вибростенде / О.В. Логиновский, Г.И. Волович, Д.В. Топольский [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2024. Т. 24, № 1. С. 19-31. EDN: ZRZFZL
8. Фартуков В.А. Методы гидравлических исследований гидротехнических сооружений: учебное пособие / В.А. Фартуков, М.И. Зборовская, Д.А. Алексеев. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. 123 с. EDN: TZWTBI
9. Меньшикова Е.А. Гидравлический расчет магистрального канала м-12 в Славском районе Калининградской области / Е.А. Меньшикова, В.Г. Пунтусов // Вестник молодежной науки. 2020. № 1(23).
10. Фролов А.С. Создание и первый опыт эксплуатации вновь разработанного программного комплекса для моделирования гидравлических систем / А.С. Фролов, К.А. Труханов, С.В. Лупуляк [и др.] // Гидравлика. 2022. № 17. С. 49-60.

Доказано, что в исследованном диапазоне режимов отсутствует опасность отрыва покрытия от основания, так как разность давления не превышает 2,7 см вод. ст.

Для обеспечения устойчивости свободно лежащего полотна BE-NOTEX SK в условиях действия гидродинамических нагрузок минимальная величина его пригрузки может быть принята в диапазоне 0,08-0,10 от величины гидростатического давления.

References

1. Kozlov K.D. Studies of the hydrodynamic effect of a water flow on a protective coating made of geosynthetic material / K.D. Kozlov, N.V. Khanov, V.A. Fartukov, D.V. Kozlov // Construction: science and education. 2018. Vol. 8, No. 1(27). 9 p.
2. Fartukov V.A. Innovative system of hydrodynamic studies of water flow / V.A. Fartukov, M.V. Zemlyannikova // Prirodoobustrojstvo. 2016. No. 3. P. 75-79. EDN: WJLCPZ
3. Fartukov V.A. Mental platform management interface for laboratory studies of hydraulic structures / V.A. Fartukov, M.V. Zemlyannikova, N.V. Khanov // Prirodoobustrojstvo. 2020. No. 2. P. 66-68. EDN: YHYJPK
4. Concrete canvas Be-Notex SK. SRT 65458320-010-2023 [electronic resource] URL: <https://geovostok.ru/catalog/betonnnoe-polotno> (accessed 25.06.24).
5. Results of hydraulic studies of Encamate A20 and Encamate 7225 geomats filled with soil with sowing of perennial grasses / N.V. Khanov, O.N. Chernykh, S.N. Shchukin [et al.] // Prirodoobustrojstvo. 2024. No. 5. P. 71-79. EDN: MQRYSW
6. Creation and first operational experience of a newly developed software package for modeling hydraulic systems / A.S. Frolov, K.A. Trukhanov, S.V. Lupulyak [et al.] // Hydraulics. 2022. No. 17. P. 49-60.
7. Development of a software package for testing digital measuring transformers on a vibration stand / O.V. Loginovskiy, G.I. Volovich, D.V. Topolskiy [et al.] // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, control, radio electronics. 2024. Vol. 24, No. 1. P. 19-31. EDN: ZRZFZL
8. Fartukov V.A. Methods of hydraulic research of hydraulic structures / V.A. Fartukov, M.I. Zborovskaya, D.A. Alekseev. – M.: Russian State Agrarian University – Ministry of Agriculture named after C.A. Timiryazev, 2022. 123 p. EDN: TZWTBI
9. Menshikova E.A. Hydraulic calculation of the m-12 trunk canal in the Slavsky district of the Kaliningrad region / E.A. Menshikova, V.G. Puntusov // Bulletin of Youth Science. 2020. No 1(23).
10. Creation and the first operational experience of a newly developed software package for modeling hydraulic systems / A.S. Frolov, K.A. Trukhanov, S.V. Lupulyak [et al.] // Hydraulics. 2022. No. 17. P. 49-60.
11. Okhrimenko A.A., Kryukov Ya.V., Pokamestov D.A. Investigation of the influence of the transmission channel estimation error on the calculation of power when compacting user channels using the PD-NOMA method / A.A. Okhrimenko,

11. Охрименко А.А. Исследование влияния погрешности оценки канала передачи на расчет мощности при уплотнении пользовательских каналов методом PD-NOMA / А.А. Охрименко, Я.В. Крюков, Д.А. Покаместов // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2019. № 1-1. С. 28-30. EDN: RLWGPP

Об авторах

Василий Александрович Фартуков, канд. техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-8405-8757; Scopus AuthorID: 5749450840; SPIN-код: 5656-7629; AuthorID:1002745; fartukov@rgau-msha.ru

Сергей Николаевич Шукин, канд. техн. наук, директор, ООО Восток Геосинтетикс; 89031025452@mail.ru

Марина Ильинична Зборовская, канд. техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-8405-8757; Scopus AuthorID: 57219607364; SPIN-код: 6748-0927; zborovskya@rgau-msha.ru

Кристина Сергеевна Семенова, канд. техн. наук; Scopus Author ID: 57488382700; ORCID: 0000-0002-4446-4435; SPIN-код: 1426-1908; AuthorID: 912890; kristi11.05.88@yandex.ru

Анастасия Александровна Кадысова, канд. техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0001-8703-5684; SPIN-код: 4485-7332; AuthorID: 698088; kadyseva@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Фартуков В.А., Шукин С.Н., Зборовская М.И., Семенова К.С., Кадысова А.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 no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors have made equal contributions to the preparation of the publication.

Статья поступила в редакцию / The article was submitted to the editorial office 25.04.2025

Одобрена после рецензирования / Approved after peer reviewing 21.10.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 25.10.2025

Ya.V. Kryukov, D.A. Pokamestov // Electronic means and control systems. Materials of the reports of the International Scientific and Practical Conference. 2019. No. 1-1. P. 28-30. EDN: RLWGPP

About the Authors

A. Fartukov, DSc (Eng), professor; ORCID: 0000-0002-8405-8757; Scopus AuthorID: 5749450840; SPIN-code: 5656-7629; AuthorID:1002745; fartukov@rgau-msha.ru

Sergey N. Shchukin, DSc (Eng), Director, Vostok Geosynthetics LLC; 89031025452@mail.ru

Marina I. Zborovskaya, DSc (Eng), professor; ORCID: 0000-0002-8405-8757; Scopus AuthorID: 57219607364; SPIN-code: 6748-0927; AuthorID: 326001; zborovskya@rgau-msha.ru

Kristina S. Semenova, DSc ((Eng); Scopus Author ID: 57488382700; ORCID: 0000-0002-4446-4435; SPIN-code: 1426-1908; AuthorID: 912890; zborovskya@rgau-msha.ru

Anastasia A. Kadysova, DSc (Eng), professor; ORCID: 0000-0001-8703-5684; SPIN-code: 4485-7332; AuthorID: 698088; kadyseva@mail.ru

Fartukov V.A., Shchukin S.N., Zborovskaya M.I., Semenova K.S., Kadysova A.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.

Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-92-98>

УДК 532.546:519.6:544.014.4

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА
С РЕАКЦИЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ****Н.Н. Ивахненко¹✉, М.Ю. Бадекин², Д.М. Бенин³, Н.А. Коноплин⁴, И.А. Федоркина⁵**^{1,3,4}ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия²ФГБОУ ВО «Донецкий национальный университет»; 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, Россия⁵Ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВПО «Московский технический университет связи и информатики»; 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8А, Россия¹ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; SPIN-код: 5082-0613, Author ID: 836861²korund2002@list.ru; SPIN-код: 1447-7503, Author ID: 201633³dbenin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 6243-0567, Author ID: 708496⁴konoplin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 6797-4550, Author ID: 580233⁵i.a.fedorkina@mtuci.ru; SPIN-code: 6043-9140, Author ID: 564671

Аннотация. Исследования посвящены анализу реактивного массопереноса в двухслойной пористой среде с пространственно-неоднородным распределением пористости. В работе рассматривается система, состоящая из двух областей: левой с постоянной пористостью и правой с переменной пористостью, описываемой заданным распределением. При условии малой скорости растворения минералов система сводится к стационарной постановке, что позволяет получить аналитические решения для концентрации и ее производной на границе раздела сред. Особое внимание уделено влиянию ключевых безразмерных параметров – чисел Пекле (Pe) и Дамкёлера (Da), определяющих динамику процесса. Установлено, что при $Pe \gg 1$ система выходит на стационарный режим, при котором концентрация стремится к пределу $1/(1+Da)$, а ее производная – к значению $-Da \cdot Pe/(1+Da)$. В случае $Da \ll 1$ концентрация и ее производная становятся независимыми от параметров массопереноса, что указывает на изменение механизма переноса в этом предельном режиме. Важную роль играет также обратная зависимость между числом Da и параметром α , характеризующим распределение пористости, что подчеркивает влияние неоднородности среды на устойчивость фронта растворения. Полученные аналитические решения подтверждены численными расчетами, демонстрируя высокую степень согласованности. Результаты работы имеют практическое значение для моделирования процессов кислотной обработки пластов, управления фильтрацией в нефтегазовых месторождениях и прогнозирования гидрогеологических процессов в неоднородных пористых средах.

Работа выполнена за счет средств Программы развития РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Ключевые слова: пористая среда, реактивный массоперенос, фильтрация, число Пекле, число Дамкёлера, концентрация кислоты, неоднородность пористости, аналитическое решение, стационарный режим, фронт растворения

Формат цитирования: Ивахненко Н.Н., Бадекин М.Ю., Бенин Д.М., Коноплин Н.А., Федоркина И.А. Анализ процессов массопереноса с реакцией в неоднородных пористых средах // Природообустройство. 2025. № 5. С. 92-98. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-92-98>

Original article

ANALYSIS OF MASS TRANSFER PROCESSES WITH REACTION IN HETEROGENEOUS POROUS MEDIA

N.N. Ivakhnenko^{1✉}, M.Yu. Badekin², D.M. Benin³, N.A. Konoplin⁴, I.A. Fedorkin⁵^{1,3,4}Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy”, 127434, Moscow, Timiryazevskaya St., 49, Russia²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Donetsk National University”, 283001, Donetsk, Universitetskaya St., 24, Russia⁵Order of the Red Banner of Labor Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Moscow Technical University of Communications and Informatics”, 111024, Moscow, Aviamotornaya St., 8A, Russia¹ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; SPIN-код: 5082-0613, Author ID: 836861²korund2002@list.ru; SPIN-код: 1447-7503, Author ID: 201633³dbenin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 6243-0567, Author ID: 708496⁴konoplin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 6797-4550, Author ID: 580233⁵i.a.fedorkina@mtuci.ru; SPIN-code: 6043-9140, Author ID: 564671

Abstract. The study is devoted to the analysis of reactive mass transfer in a two-layer porous medium with a spatially inhomogeneous distribution of porosity. The paper considers a system consisting of two regions: the left one with constant porosity and the right one with variable porosity described by a given distribution. Under the condition of a low rate of mineral dissolution, the system is reduced to a stationary statement, which allows us to obtain analytical solutions for the concentration and its derivative at the interface between the media. Particular attention is paid to the influence of key dimensionless parameters – the Peclet (Pe) and Damköhler (Da) numbers, which determine the dynamics of the process. It is found that at $Pe \gg 1$, the system enters a stationary mode, at which the concentration tends to the limit $1/(1+Da)$, and its derivative – to the value $-Da Pe/(1+Da)$. In the case of $Da \ll 1$, the concentration and its derivative become independent of the mass transfer parameters which indicates a change in the transfer mechanism in this limiting mode. An important role is also played by the inverse relationship between the Da number and the parameter α , characterizing the distribution of porosity, which emphasizes the influence of the heterogeneity of the medium on the stability of the dissolution front. The obtained analytical solutions are confirmed by numerical calculations, demonstrating a high degree of consistency. The results of the work are of practical importance for modeling the processes of acid treatment of formations, filtration control in oil and gas fields and forecasting hydrogeological processes in heterogeneous porous media.

The work was carried out at the expense of the Development Program of the K.A. Timiryazev Russian State Agricultural Academy within the framework of the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030”.

Keywords: porous medium, reactive mass transfer, filtration, Peclet number, Damkohler number, acid concentration, porosity heterogeneity, analytical solution, stationary mode, dissolution front

Citation format: Ivakhnenko N.N., Badekin M.Yu., Benin D.M., Konoplin N.A., Fedorkina I.A. Analysis of mass transfer processes with reaction in heterogeneous porous media // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 92-98. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-92-98>

Введение. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах представляет собой важную научную и практическую задачу, актуальную для нефтегазовой отрасли, гидрогеологии и химической технологии. Процессы массопереноса в неоднородных пористых структурах осложняются изменяющейся пористостью, химическими реакциями на границах раздела фаз и сложной динамикой течения [1-3]. Особый интерес вызывает моделирование реактивного массопереноса в системах с пространственно-неоднородными свойствами, где процессы фильтрации тесно связаны с химическим растворением породы [4, 5].

Современные подходы к моделированию таких процессов включают в себя как аналитические методы, основанные на решении дифференциальных уравнений фильтрации и переноса, так и численные алгоритмы, позволяющие учитывать сложную геометрию пористой среды [6-8]. В таких работах, как [9, 10], рассматриваются задачи стационарной фильтрации с учетом неоднородности пористых слоев, тогда как в исследованиях [11, 12] особое внимание уделяется неустойчивости фронта растворения и его влиянию на динамику течения. Важную роль играют также методы численного

моделирования включая алгоритмы решения многомерных задач фильтрации [13, 14] и применение параллельных вычислений для ускорения расчетов [15].

В данной работе исследуется процесс реактивного массопереноса в системе, состоящей из двух пористых сред с различным распределением пористости. Левая область характеризуется постоянной пористостью, тогда как в правой зоне пористость изменяется в соответствии с заданным распределением (1). При малой скорости растворения минералов система может быть описана в стационарной постановке, что приводит к уравнениям (2) и (3) с граничными условиями (6)-(9). Особенностью данной задачи является возможность аналитического решения для концентрации кислоты в левой области (17), которое затем используется для определения параметров на границе раздела сред.

Цель исследований: теоретическое и численное исследование распределения концентрации кислоты в двухслойной пористой среде с учетом неоднородности пористости и химического взаимодействия на границе раздела.

Особое внимание уделяется анализу влияния ключевых безразмерных параметров – чисел Пекле (18) и Дамкёлера (19) – на характер распределения концентрации и устойчивость фронта растворения. На основе полученных аналитических решений (21)-(23) выполняется оценка предельных режимов системы и их соответствия результатам численного моделирования.

Полученные решения позволяют не только описать стационарное распределение концентрации, но и выявить критические параметры, определяющие устойчивость процесса фильтрации в неоднородных пористых средах.

Материалы и методы исследований. Исследуемая область состоит из двух пористых сред с различным распределением пористости, что позволяет выделить две зоны. В левой зоне пористость постоянна, тогда как в правой она описывается следующим распределением:

$$\phi = \phi_0 + (\phi_f - \phi_0)e^{-\alpha(x-L_1)}, \quad (1)$$

где ϕ – пористость пористой среды; ϕ_0 – начальная пористость пористой среды в нерастворенной части правой области; ϕ_f – пористость пористой среды в левой области; L – местоположение границы раздела между левой и правой областями; α – константа для L_1 , отражающая распределение пористости в частично растворенной части растворимых материалов в правой области.

Данная теоретическая задача может быть сведена к одномерной постановке при условии стационарного режима реактивного массопереноса. В случаях, когда скорость растворения

минералов или емкость системы достаточно малы (что характерно для многих реальных процессов химического растворения), временная зависимость в уравнениях переноса становится пренебрежимо малой. Таким образом, система реактивного массопереноса может рассматриваться как стационарная. При данных допущениях управляющие уравнения задачи принимают следующий вид:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = \phi_f D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}; \quad (2)$$

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = \phi D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} - kSC, \quad (3)$$

где u – скорость фильтрации по Дарси в горизонтальном направлении, м/с; C – концентрация кислоты, кмоль/м³; D – коэффициент молекулярной диффузии кислоты, м²/с; k – константа скорости реакции растворения, м/с; S – удельная площадь реакционной поверхности (на единицу объема нерастворенного материала) в правой области, м⁻¹:

$$S = S_0 \frac{(\phi - \phi_0)}{\phi_f} = \frac{S_0}{\phi_f} (\phi_f - \phi_0) e^{-\alpha(x-L_1)}, \quad (4)$$

где s_0 – начальная удельная площадь поверхности, м⁻¹.

Подстановка уравнений (1) и (4) в (3) приводит к следующему уравнению:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = [\phi_0 + (\phi_f - \phi_0)e^{-\alpha(x-L_1)}] D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \alpha(\phi_f - \phi_0)e^{-\alpha(x-L_1)} D \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{kS_0}{\phi_f} (\phi_f - \phi_0) e^{-\alpha(x-L_1)} C. \quad (5)$$

Граничное условие задачи имеет следующий вид:

$$C(x) = C_0, \quad (6)$$

где C_0 – концентрация кислоты на входной границе (левая граница области).

Условия непрерывности массы и ее потока на границе раздела сред записываются следующим образом:

$$C(x)|_{x=L_1^-} = C(x)|_{x=L_1^+} \quad (7)$$

$$\left(\phi D \frac{\partial C(x)}{\partial x} \right) \Big|_{x=L_1^-} = \left(\phi D \frac{\partial C(x)}{\partial x} \right) \Big|_{x=L_1^+}. \quad (8)$$

С учетом (1) уравнение (8) можно переписать как

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{x=L_1^-} = \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{x=L_1^+}, \quad \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \Big|_{x=L_1^-} = \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \Big|_{x=L_1^+}. \quad (9)$$

Результаты и их обсуждение. С учетом постоянства пористости в левой области рассматриваемой системы распределение концентрации в этой зоне допускает аналитическое решение через специальную методику замены граничных условий. Суть подхода основывается

на особенностях математической структуры уравнений задачи: поскольку (2) представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка, для однозначного определения его решения требуется задание двух граничных условий. При этом прямое аналитическое решение уравнения (3) оказывается невозможным, однако в точке границы раздела ($x = L_1$) оно должно выполняться автоматически. Важнейшее преимущество предлагаемой стратегии заключается в том, что решение уравнения (3) в точке контакта сред может быть выражено через уже известное аналитическое решение уравнения (2), что находит свое отражение в соотношениях (7) и (9). Для лучшего понимания механизма работы данного метода ниже приводится его детальное пошаговое описание.

Теоретическое решение уравнения (2) можно математически выразить как

$$C(x) = Ae^{\beta x} + B, \quad (10)$$

где A и B – неизвестные постоянные, подлежащие определению; β – параметр, определяемый следующим выражением:

$$\beta = \frac{u}{\phi_f D}. \quad (11)$$

Применение граничного условия из уравнения (6) приводит к соотношению:

$$A = C_0 - B. \quad (12)$$

Таким образом, уравнение (10) преобразуется к виду:

$$C(x) = C_0 e^{\beta x} + (1 - e^{\beta x}) B. \quad (13)$$

Используя предложенный метод подстановки условий сопряжения, подставляем (13) в (5) на границе раздела ($x = L_1$) для нахождения константы C , что дает уравнение:

$$-(\phi_f - \phi_0) Da \beta (C_0 e^{\beta L_1} - B e^{\beta L_1}) - k S_0 \frac{\phi_f - \phi_0}{\phi_f} (C_0 e^{\beta L_1} + B(1 - e^{\beta L_1})) = 0. \quad (14)$$

Очевидно, константу B можно определить из уравнения (14) следующим образом:

$$B = \frac{\frac{u\alpha}{kS_0} e^{\beta L_1} + e^{\beta L_1}}{\frac{u\alpha}{kS_0} e^{\beta L_1} + e^{\beta L_1} - 1} C_0. \quad (15)$$

Подстановка уравнения (15) в уравнение (12) дает следующее выражение:

$$A = \frac{-C_0}{\frac{u\alpha}{kS_0} e^{\beta L_1} + e^{\beta L_1} - 1}. \quad (16)$$

Итоговое решение дифференциального уравнения (2) принимает форму:

$$C(x) = \frac{-C_0 e^{\beta x} + \left(\frac{u\alpha}{kS_0} + 1\right) e^{\beta L_1}}{\left(\frac{u\alpha}{kS_0} + 1\right) e^{\beta L_1} - 1} + \frac{\left(\frac{u\alpha}{kS_0} + 1\right) e^{\beta L_1}}{\left(\frac{u\alpha}{kS_0} + 1\right) e^{\beta L_1} - 1} C_0 \quad (17)$$

Уравнение (17) можно привести к безразмерному виду, введя два ключевых параметра: число Пекле, характеризующее динамические свойства левой области, и число Дамкёлера, описывающее процессы в правой области:

$$Pe = \frac{uL_1}{\phi_f D}; \quad (18)$$

$$Da = \frac{kS_0}{u\alpha}, \quad (19)$$

где Pe – число Пекле; Da – число Дамкёлера.

Дополнительно потребуется определить следующие безразмерные параметры:

$$\bar{C}(\bar{x}) = \frac{C(x)}{C_0}, \quad \bar{x} = \frac{x}{L_1}. \quad (20)$$

С помощью указанных критериев подобия уравнение (17) приводится к безразмерной форме:

$$\bar{C}(\bar{x}) = \frac{-e^{(Pe)\bar{x}} + \left(1 + \frac{1}{Da}\right) e^{Pe}}{\left(1 + \frac{1}{Da}\right) e^{Pe} - 1} + \frac{\left(1 + \frac{1}{Da}\right) e^{Pe}}{\left(1 + \frac{1}{Da}\right) e^{Pe} - 1}. \quad (21)$$

На границе раздела между левой и правой областями получены следующие аналитические решения:

$$\bar{C}(\bar{x}) \Big|_{\bar{x}=1} = \frac{\frac{1}{Da} e^{Pe}}{\left(1 + \frac{1}{Da}\right) e^{Pe} - 1}; \quad (22)$$

$$\frac{\partial \bar{C}(\bar{x})}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} = \frac{-(Pe) e^{Pe}}{\left(1 + \frac{1}{Da}\right) e^{Pe} - 1}. \quad (23)$$

Анализ уравнений (22) и (23) позволяет выявить важные закономерности поведения системы при предельных значениях параметров. В случае, когда число Пекле значительно превышает единицу ($Pe \gg 1$), безразмерная концентрация на границе раздела стремится к пределу $1/(1+Da)$, в то время как ее производная асимптотически приближается к значению $-Da \cdot Pe/(1+Da)$. Эти соотношения демонстрируют, что при больших значениях Pe и фиксированном числе Дамкёлера Da система выходит на стационарный режим, при котором концентрация

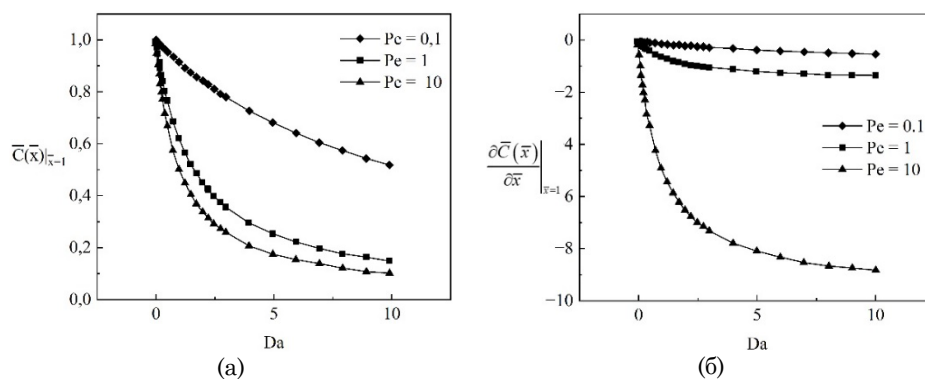


Рис. 1. Влияние числа Пекле на безразмерную концентрацию (а) и ее первую производную (б) на границе раздела левой и правой областей

Fig. 1. The effect of the Peclet number on the dimensionless concentration (a) and its first derivative (b) at the interface between the left and right regions

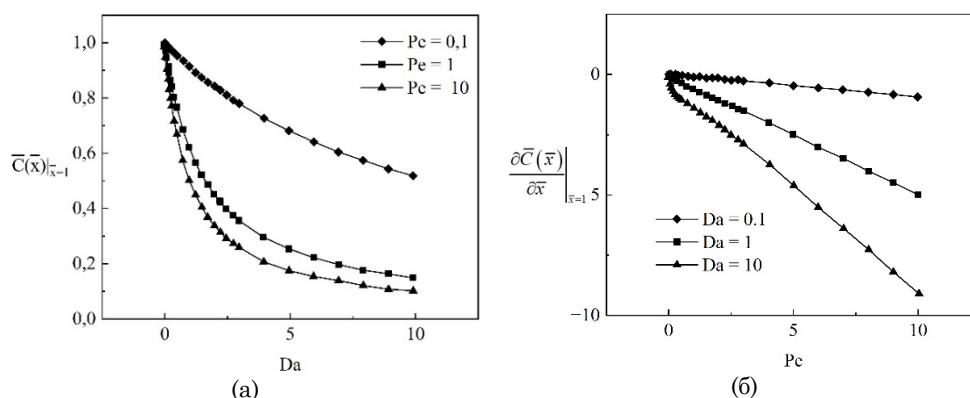


Рис. 2. Влияние числа Дамкёлера на безразмерную концентрацию (а) и ее первую производную на границе раздела левой и правой областей (б)

Fig. 2. The effect of the Damköhler number on the dimensionless concentration (a) and its first derivative at the interface between the left and right regions (b)

определяется ключевыми параметрами процесса массопереноса.

Особый интерес представляет случай малых значений числа Дамкёлера ($Da \ll 1$). В этом пределе как концентрация, так и ее производная стремятся к постоянным значениям, которые перестают зависеть от характеристик системы массопереноса. Это наблюдение имеет принципиальное значение для понимания механизмов формирования неустойчивости фронта растворения, особенно в системах с пространственно-неоднородным распределением пористости, характерным для правой области рассматриваемой системы.

Существенную роль в поведении системы играет обратная зависимость между числом Дамкёлера Da и параметром α , характеризующим распределение пористости. Эта связь приводит к тому, что значение α оказывает определяющее влияние как на предельные значения концентрации и ее производной на границе раздела, так и на положение самого фронта между областями с различными свойствами. С практической точки

зрения такая граница может рассматриваться как плоский референтный фронт при теоретическом анализе устойчивости системы, что особенно важно для моделирования процессов в геологических средах с неоднородной пористой структурой.

Результаты, представленные на рисунках 1 и 2, полностью подтверждают эти выводы, демонстрируя хорошее соответствие между аналитическими предсказаниями и численными расчетами.

Выводы

1. Разработана математическая модель реактивного массопереноса в двухслойной пористой среде с неоднородным распределением пористости. Показано, что при малой скорости растворения минералов система может быть описана в стационарной постановке. Это позволило получить аналитические решения для концентрации и ее производной на границе раздела сред.

2. Установлено, что поведение системы определяется безразмерными числами Пекле (Pe) и Дамкёлера (Da). При $Pe \gg 1$ концентрация

кислоты стремится к пределу $1/(1+Da)$, а ее производная – к значению $-Da \cdot Pe/(1+Da)$, что свидетельствует о выходе системы на стационарный режим. В случае $Da \ll 1$ концентрация и ее производная становятся независимыми от параметров массопереноса.

3. Выявлена обратная зависимость между числом Da и параметром α , характеризующим распределение пористости в правой области. Это указывает на критическую роль неоднородности пористой структуры в формировании устойчивости фронта растворения.

4. Аналитические решения подтверждены численными расчетами, демонстрируя хорошую согласованность. Это подтверждает адекватность

предложенной модели для описания процессов в реальных геологических средах.

5. Полученные результаты позволяют прогнозировать распределение концентрации в неоднородных пористых системах, что важно для оптимизации процессов кислотной обработки пластов, управления фильтрацией в нефтегазовых месторождениях и моделирования гидрогеологических процессов.

Таким образом, проведенные исследования расширяет понимание механизмов реактивного массопереноса в неоднородных пористых средах и предоставляет инструменты для анализа устойчивости фронта растворения в практических приложениях.

Список использованных источников

1. Богачев К.Ю. О пространственной аппроксимации методом подсеток для задачи фильтрации вязкой сжимаемой жидкости в пористой среде / К.Ю. Богачев, Н.С. Мельниченко // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9, № 3. С. 191-199. EDN: JUBEVT
2. Богачев К.Ю. Применение параллельного preconditioner CPR к задаче фильтрации вязкой сжимаемой жидкости в пористой среде / К.Ю. Богачев, И.Г. Горелов // Вычислительные методы и программирование. – 2008. Т. 9, № 3. С. 184-190. EDN: JUBEVJ
3. Гальцев О.В. О численном моделировании задачи Маскета со свободной границей / О.В. Гальцев, О.А. Гальцева // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 2010. № 23(94). С. 59-67. EDN: NRASRT
4. Гальцев О.В. Неустойчивость Рэлея-Тейлора в задаче Маскета со свободной границей / О.В. Гальцев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика 2012. № 5(124). С. 68-85. EDN: PCVSNF
5. Гальцев О.В. Численное решение усредненной модели совместного движения жидкостей различной плотности в пористых средах / О.В. Гальцев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 2012. № 17(136). С. 154-168. EDN: TAGBNF
6. Гальцев О.В. Математическое моделирование процесса фильтрации жидкостей в пористой среде различной геометрии / О.В. Гальцев, О.А. Гальцева // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 2015 № 23(220). С. 116-127. EDN: VKBJSF
7. Гальцева О.А. Численное решение задачи совместного движения двух несмешивающихся несжимаемых жидкостей в пористой среде на микроскопическом уровне / О.А. Гальцева, О.В. Гальцев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 2014. № 25(196). С. 75-96. EDN: TQQQBB
8. Губайдуллин Д.А. Алгоритм решения трехмерных задач напорно-безнапорной стационарной фильтрации жидкости со сгущающимися участками сетки / Д.А. Губайдуллин, П.А. Мазуров, А.В. Цепяев // Вычислительные методы и программирование 2005. Т. 6, № 1. С. 217-225. EDN: HQVINT

References

1. Bogachev K.Yu. On spatial approximation by the sub-grid method for the problem of filtration of a viscous compressible fluid in a porous medium / K.Yu. Bogachev N.S. Melnichenko // Computational methods and programming. 2008. Vol. 9, No. 3. P. 191-199. EDN: JUBEVT
2. Bogachev K.Yu. Application of the parallel preconditioner CPR to the problem of filtration of a viscous compressible fluid in a porous medium / K.Yu. Bogachev I.G. Gorelov // Computational methods and programming. 2008. Vol. 9, No. 3. P. 184-190. EDN: JUBEVJ
3. Gal'tsev O.V. On Numerical Modeling of the Musket Problem with a Free Boundary / O.V. Gal'tsev, O.A. Gal'tseva // Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics. 2010. No. 23(94). P. 59-67. EDN: NRASRT
4. Gal'tsev O.V. Rayleigh-Taylor Instability in the Musket Problem with a Free Boundary / O.V. Gal'tsev // Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics. 2012. No. 5(124). P. 68-85. EDN: PCVSNF
5. Gal'tsev O.V. Numerical solution of the averaged model of joint motion of liquids of different densities in porous media / O.V. Gal'tsev // Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics. 2012.No. 17 (136). P. 154-168. EDN: TAGBNF
6. Gal'tsev O.V. Mathematical modeling of the process of liquid filtration in a porous medium of different geometry / O.V. Gal'tsev, O.A. Gal'tseva // Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics. – 2015. – No. 23 (220). – P. 116-127. EDN: VKBJSF
7. Galtseva O.A. Numerical solution of the problem of joint motion of two immiscible incompressible fluids in a porous medium at the microscopic level / O.A. Galtseva, O.V. Galtsev // Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics. 2014. No. 25 (196). P. 75-96. EDN: TQQQBB
8. Gubaydullin D.A. Algorithm for solving three-dimensional problems of pressure-free stationary filtration of liquid with thickening sections of the grid / D.A. Gubaydullin, P.A. Mazurov, A.V. Tsepaev // Computational methods and programming. 2005. Vol. 6, No. 1. P. 217-225. EDN: HQVINT
9. Gubkina E.V. Fluid filtration in an unbounded formation with an inclined aquiclude / E.V. Gubkina, V.N. Monakhov // Applied mechanics and technical physics. 2003. Vol. 44, No. 1 (257). P. 83-94. EDN: OOAPRT

9. Губкина Е.В. Фильтрация жидкости в неограниченном пласте с наклонным водоупором / Е.В. Губкина, В.Н. Монахов // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, № 1(257). С. 83-94. EDN: OOPRT

10. Елесин А.В. Учет априорной сравнительной информации в задачах идентификации коэффициента фильтрации / А.В. Елесин, А.Ш. Кадьрова // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9, № 1. С. 10-15. EDN: JUBENR

11. Иванов М.И. Вычислительная модель фильтрации жидкости в трещиновато-пористых средах / М.И. Иванов, И.А. Кремер, Ю.М. Лаевский // Сибирский журнал вычислительной математики. 2021. Т. 24, № 2. С. 145-166. DOI: 10.15372/SJNM20210203. EDN: WGVDXN

12. Костин В.А. Об одной модели процесса нестационарной фильтрации в пористой среде / В.А. Костин, А.В. Костин // Насосы. Турбины. Системы. 2017. № 4(25). С. 65-69. EDN: YTBVNP

13. Равшанов Н. Математическая модель и численный алгоритм для исследования процесса фильтрации жидкости во взаимодействующих напорных слоях / Н. Равшанов, Э.Ш. Назирова, У. Орипжанова, С.М. Аминов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2020. № 1(25). С. 28-49. EDN: AVBJMB

14. Равшанов Н. Моделирование процесса фильтрации жидкости во взаимодействующих напорных пористых слоях / Н. Равшанов, У. Орипжанова // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2020. № 6(30). С. 93-115. EDN: OAWUEA

15. Равшанов Н. Численное моделирование фильтрации газа в неоднородной пористой среде для расчета газодинамических параметров процесса / Н. Равшанов, С. Аминов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2022. № 3(41). С. 48-66. EDN: NNYURM

10. Elesin A.V. Taking into account a priori comparative information in problems of filtration coefficient identification / A.V. Elesin A.Sh. Kadyrova // Computational methods and programming. 2008. Vol. 9, No. 1. P. 10-15. EDN: JUBENR

11. Ivanov M.I. Computational model of fluid filtration in fractured-porous media / M.I. Ivanov, I.A. Kremer, Yu.M. Laevsky // Siberian Journal of Computational Mathematics. 2021. Vol. 24, No. 2. P. 145-166. DOI: 10.15372/SJNM20210203. EDN: WGVDXN

12. Kostin V.A. On one model of the non-stationary filtration process in a porous medium / V.A. Kostin, A.V. Kostin // Pumps. Turbines. Systems. 2017. No. 4 (25). P. 65-69. EDN: YTBVNP

13. Mathematical model and numerical algorithm for studying the process of liquid filtration in interacting pressure layers / N. Ravshanov E.Sh. Nazirova, U. Oripzhanova, S.M. Aminov // Problems of Computational and Applied Mathematics. 2020. No. 1 (25). P. 28-49. EDN: AVBJMB

14. Ravshanov N. Modeling the process of liquid filtration in interacting pressure porous layers / N. Ravshanov, U. Oripzhanova // Problems of Computational and Applied Mathematics. – 2020. No. 6 (30). P. 93-115. EDN: OAWUEA

15. Ravshanov N. Numerical modeling of gas filtration in an inhomogeneous porous medium for calculating gas-dynamic parameters of the process / N. Ravshanov, S. Aminov // Problems of Computational and Applied Mathematics. 2022. No. 3 (41). P. 48-66. EDN: NNYURM

Об авторах

Наталья Николаевна Ивахненко, канд. физ.-мат. наук, доцент; SPIN-код: 5082-0613, Author ID: 836861; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru

Максим Юрьевич Бадекин, старший преподаватель; SPIN-код: 1447-7503, Author ID: 201633, korund2002@list.ru

Дмитрий Михайлович Бенин, канд. техн. наук, доцент; SPIN-код: 6243-0567, Author ID: 708496, dbenin@rgau-msha.ru

Николай Александрович Коноплин, канд. физ.-мат. наук, доцент; SPIN-код: 6797-4550, Author ID: 580233; konoplin@rgau-msha.ru

Ирина Анатольевна Федоркина, Ph.D. in Economics, Associate Professor; SPIN-code: 6043-9140, Author ID: 564671; i.a.fedorkina@mtuci.ru

About the Authors

Natalia N. Ivakhnenko, CSc (Physics-Math), Associate Professor; SPIN code: 5082-0613, Author ID: 836861; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru

Maksim Yu. Badekin, Senior Lecturer; SPIN code: 1447-7503, Author ID: 201633, korund2002@list.ru

Dmitry M. Benin, CSc (Eng), Associate Professor; SPIN code: 6243-0567, Author ID: 708496, dbenin@rgau-msha.ru

Nikolay A. Konoplin, CSc (Physics-Math), Associate Professor; SPIN code: 6797-4550, Author ID: 580233; konoplin@rgau-msha.ru

Irina A. Fedorkina, CSc (Econ), Associate Professor; SPIN-code: 6043-9140, Author ID: 564671; i.a.fedorkina@mtuci.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Ивахненко Н.Н., Бадекин М.Ю., Бенин Д.М., Коноплин Н.А., Федоркина И.А. выполнили исследование, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Статья поступила в редакцию / The article was received at the editorial office 28.08.2025

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 05.11.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 05.11.2025

Ivakhnenko N.N., Badekin M.Yu., Benin D.M., Konoplin N.A., Fedorkina I.A. performed the research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have the copyright for the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-99-105>

УДК 556.535.8:628.3.03:627.5(571.150)



МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФFUЗНОГО СТОКА КОНSERВАТИВНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ НА УЧАСТКЕ РЕКИ ЧАРЫШ

В.Ю. Филимонов¹, А.В. Кудишин^{2✉}, О.В. Ловцкая³, А.В. Дьяченко⁴, К.В. Марусин⁵

^{1,2,3,4,5}Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН); 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия

¹vyfilimonov@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

²avkudishin@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-5613-5778

³lov@iwep.ru; ORCID: 0000-0002-3942-1350

⁴dychenko@iwep.ru; ORCID: 0000-0003-4178-8415

⁵kat@iwep.ru; ORCID: 0000-0003-1565-8326

Аннотация. Целью работы является применение методики определения полного массового расхода консервативного загрязнителя и эффективной величины числа Пекле при различных сценариях диффузного загрязнения. На основе гидродинамической модели участка реки Чарыш произведен расчет прямой и обратной задачи определения полного массового расхода консервативного загрязнителя при различных сценариях диффузного загрязнения. Расчет обратной задачи выполнен с использованием методов нелинейной глобальной оптимизации и Монте-Карло на основе полиномиального представления распределения полного массового расхода. Установлено удовлетворительное согласие восстановленных и исходных распределений, при этом получена оценка эффективной величины числа Пекле. Выяснено, что значение эффективной величины числа Пекле находится в интервале его реального изменения.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект № 0306-2021-0002 «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).

Ключевые слова: диффузное загрязнение, расход загрязнителя, обратная задача, глобальная оптимизация, метод Монте-Карло

Формат цитирования: Филимонов В.Ю., Кудишин А.В., Ловцкая О.В., Дьяченко А.В., Марусин К.В. Моделирование диффузного стока консервативных загрязнителей на участке реки Чарыш // Природообустройство. 2025. № 5. С. 99-105. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-99-105>

Original article

MODELING OF DIFFUSE RUNOFF OF CONSERVATIVE POLLUTANTS IN THE CHARYSH RIVER SECTION

V.Yu. Filimonov¹, A.V. Kudishin^{2✉}, O.V. Lovtskaya³, A.V. Dyachenko⁴, K.V. Marusin⁵

^{1,2,3,4,5}Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IWEP SB RAS); 1 Molodezhnaya str., Barnaul, 656038, Russia

¹vyfilimonov@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

²avkudishin@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-5613-5778

³lov@iwep.ru; ORCID: 0000-0002-3942-1350

⁴dychenko@iwep.ru; ORCID: 0000-0003-4178-8415

⁵kat@iwep.ru; ORCID: 0000-0003-1565-8326

Abstract. Based on the hydrodynamic model of the Charysh River section, the calculation of the direct and inverse problem of determining the total mass flow rate of a conservative pollutant under various scenarios of diffuse pollution was carried out. The calculation of the inverse problem was performed using nonlinear global optimization and Monte Carlo methods based on a polynomial representation of the distribution of the total mass flow rate. A satisfactory agreement between the reconstructed and initial distributions was established, and an estimate of the effective value of the Peclet number was obtained. It was found that the value of the effective Peclet number is within the range of its real change.

Financing: The work was carried out within the framework of the state assignment of the IWEP SB RAS (project No 0306-2021-0002) “Studying the mechanisms of natural and anthropogenic changes

in the quantity and quality of Siberian water resources using hydrological models and information technologies”).

Keywords: diffuse pollution, pollutant flow rate, inverse problem, global optimization, Monte Carlo method

Citation format: Filimonov V.Yu., Kudishin A.V., Lovtskaya O.V., Dyachenko A.V., Marusin K.V. Modeling of diffuse runoff of conservative pollutants in the Charysh River section // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 99-105. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-99-105>

Введение. Диффузный сток загрязнителей, поступающих в русла рек с обширных водосборных территорий, является серьезной экологической проблемой, поскольку в данном случае процесс загрязнения не контролируется и не регулируется [1-3]. Согласно этой точке зрения возникает необходимость экологического мониторинга процессов стока, который должен быть неразрывно связан с математическим моделированием.

Для количественного анализа степени диффузного загрязнения используются данные о распределении концентрации того или иного растворенного загрязнителя на исследуемом участке водотока, которые могут быть получены в результате натурных измерений [4-7]. Однако это не дает возможности определения расходных характеристик стока – таких, как удельный и полный массовый расход загрязнителя на исследуемом участке, которые и определяют сток. Для решения указанной задачи используются математические методы, связанные с решением обратных задач для уравнения адвекции-диффузии [8-11].

В приведенных исследованиях решается математическая задача восстановления распределения удельного массового расхода при заданной величине числа Пекле (в данном случае – отношение характерного времени диффузии ко времени добега между створами на исследуемом участке). Однако априорное значение продольной дисперсии (через которую определяется число Пекле) определяется большим количеством различных полумпирических формул [12-15]. При этом, как следует, например, из работы [12], расчетное значение этой величины может на порядки отличаться от найденного экспериментально. Наиболее разумным выходом в данной ситуации является определение эффективного значения указанной величины непосредственно из данных натурных измерений на исследуемом участке на основе реальной русловой модели.

Цель исследований: применение методики определения полного массового расхода консервативного загрязнителя и эффективной величины числа Пекле при различных сценариях диффузного загрязнения. В основу расчета

положена гидродинамическая модель участка реки Чарыш (РФ, Алтайский край). При расчете использовались метод нелинейной глобальной оптимизации и метод Монте-Карло.

Материалы и методы исследований. Объект исследований – участок реки Чарыш в ее нижнем течении от гидрологического поста Белоглазово до гидрологического поста свх. Чарышский у с. Усть-Калманки (рис. 1а). Протяженность участка по руслу составляет 93,5 км, по долине реки – 64,8 км. Компьютерная 1ДН-модель разработана на базе программного комплекса HEC-RAS5.0 [16] для прогноза половодий и паводков. В рамках используемого 1ДН-приближения рельеф пойменно-руслового комплекса описывается набором поперечных сечений (створов), рассредоточенных по длине участка. Модель состоит из 34 поперечных профилей. В общем случае линия профиля не является прямой, ее русловой сегмент расположен по нормали к направлению течения в русле (рис. 1б). Протяженность створов составляет от 0,6 до 6 км. Данные о высотных отметках рельефа по линиям створов в русловой части взяты из результатов гидрографических работ ИВЭП СО РАН, выполненных в 2018 г. (рис. 1в).

На рисунке 2 приведены соответствующие распределения скоростей течения, полученные при использовании гидродинамической модели [16].

Результаты и их обсуждение. *Прямая задача.* Для решения прямой задачи использовалось одномерное уравнение адвекции-диффузии в обезразмеренной форме [17]:

$$\frac{d\theta}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\alpha} \frac{d\theta}{dz} \right) = \tilde{\varphi}(z); \quad \theta(0) = 0; \quad \theta(1) = \theta_1. \quad (1)$$

Здесь введены в рассмотрение обезразмеренные величины:

$$z = x / L; \quad \theta = (c - c_A) / c_A; \quad \alpha = VL / E;$$

$$\tilde{\varphi}(z) = L\varphi(z) / Qc_A,$$

где α – число Пекле; x – координата вдоль русла, м; L – длина рассматриваемого участка, м; c – концентрация, кг/м³; c_A – концентрация на верхнем створе участка, кг/м³; V – скорость течения, м/с; E – коэффициент продольной дисперсии загрязнителя, м²/с; Q – расход воды, м³/с; $\varphi(z)$ – удельный массовый расход загрязнителя, кг/м × с.

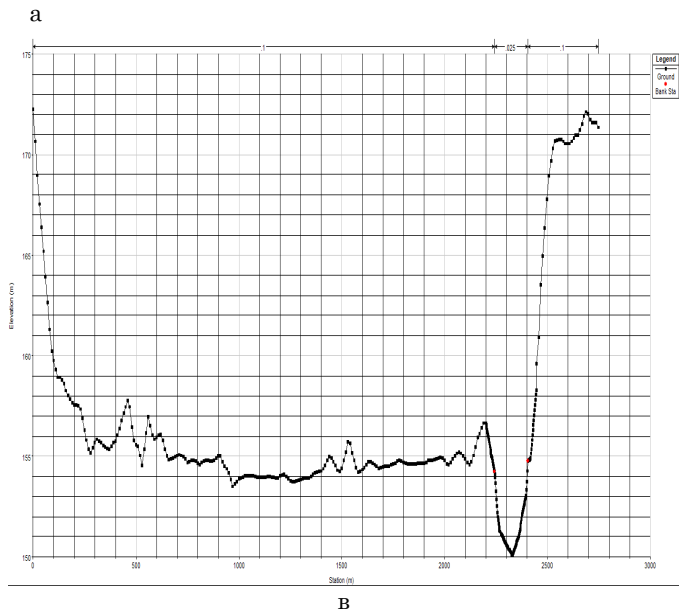
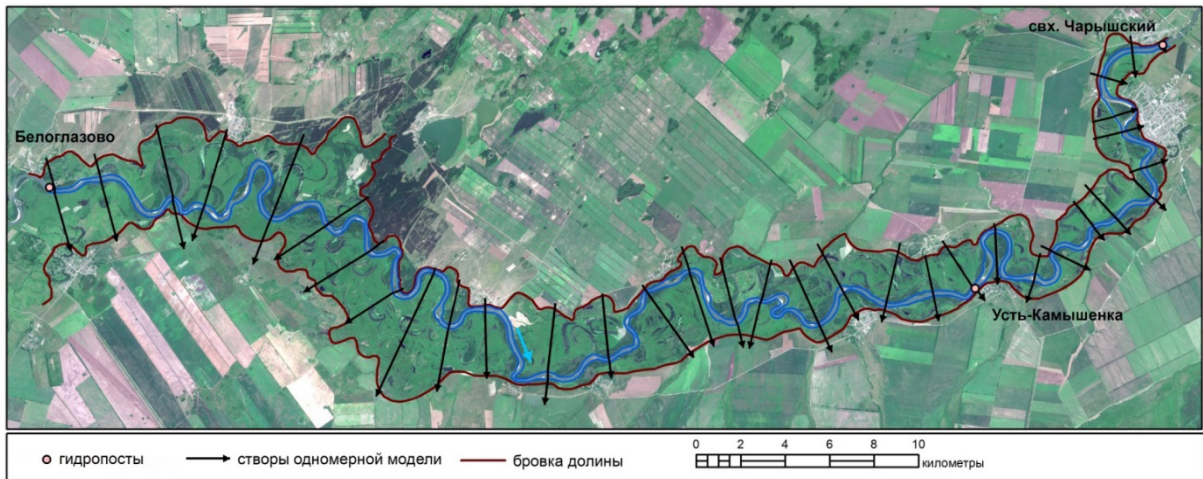


Рис. 1. Река Чарыш на участке Белоглазово – Усть-Калманка и ее представление в одномерной (1D) компьютерной модели гидродинамики руслового потока:

- а) общий вид; б) створы одномерной модели в районе с. Усть-Камышенки;
- в) представление в HEC-RAS поперечного профиля русла и поймы в створе гидропоста Усть-Камышенка

Fig. 1. The Charysh River in the Beloglazovo – Ust-Kalmanka section and its representation in a one-dimensional (1D) computer model of channel flow hydrodynamics:

- a) general view; б) cross-sections of the one-dimensional model in the area the Ust-Kamysheinka village;
- b) presentation in HEC-RAS of the cross-section of the channel and floodplain in the site of the Ust-Kamysheinka

Расчет прямой задачи (1) производился при различных сценариях загрязнения, которые определяются тестовыми функциями:

$$\tilde{\varphi}(z) = 0.2e^z + 0.2z^4; \quad (2)$$

$$\tilde{\varphi}(z) = 0,2 + 0,2e^{\left(\frac{z-0,3}{0,1}\right)^2} + 0,45e^{\left(\frac{z-0,7}{0,3}\right)^2}. \quad (3)$$

Наряду с удельным массовым расходом был введен в рассмотрение полный массовый расход, определяющий количество загрязнителя, поступающего в русло за единицу времени на интервале от 0 до z:

$$\tilde{\Phi}(z) = \int_0^z \tilde{\varphi}(z) dz. \quad (4)$$

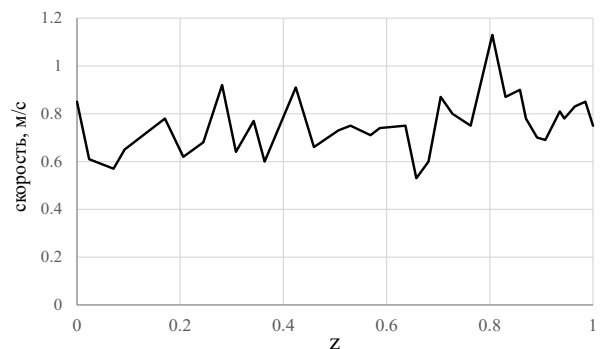


Рис. 2. Распределение скоростей течения на исследуемом интервале при величине расхода $Q = 274 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 2. Distribution of flow rates in the studied interval at a water discharge value $Q=274 \text{ м}^3/\text{с}$

Результаты расчета прямой задачи (1) для тестовых функций (2), (3) с учетом величины скорости течения (рис. 2) представлены на рисунке 3.

Обратная задача. Целью решения обратной задачи являлось восстановление полного массового расхода (4) как функции координаты и нахождения эффективного значения числа Пекле $\alpha_{эф}$ по известному распределению $\theta(z)$. В соответствии с работой [17] решение краевой задачи (1) можно представить в виде:

$$\theta(z, \alpha_{эф}) = \frac{e^{\alpha_{эф}z} - 1}{e^{\alpha_{эф}} - 1} \left(\theta_1 + \alpha_{эф} e^{\alpha_{эф}} \int_0^1 \tilde{\Phi}(\xi) e^{-\alpha_{эф}\xi} d\xi \right) - \alpha_{эф} e^{\alpha_{эф}z} \int_0^z \tilde{\Phi}(\xi) e^{-\alpha_{эф}\xi} d\xi. \quad (5)$$

Здесь $\alpha_{эф}$ – эффективное значение числа Пекле на исследуемом интервале. Для решения обратной задачи зависимость $\tilde{\Phi}(\xi)$ представлялась в виде полинома:

$$\tilde{\Phi}(\xi) = \sum_{n=1}^m a_n \xi^n. \quad (6)$$

Тогда решение (5) может быть получено аналитически и представлено в виде разложения по набору функций $H_n(z, \alpha)$:

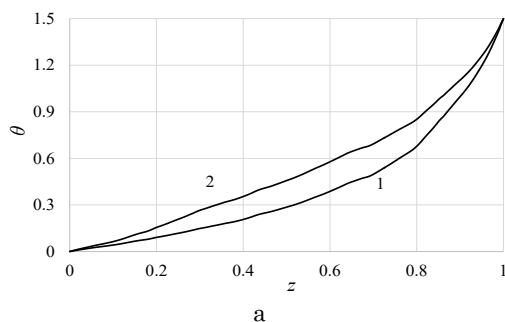
$$\theta(z, \alpha_{эф}) = H_0(z, \alpha_{эф}) + \sum_{n=1}^m a_n H_n(z, \alpha_{эф}), \quad (7)$$

где

$$H_0(z, \alpha_{эф}) = \theta_1 \frac{e^{\alpha_{эф}z} - 1}{e^{\alpha_{эф}} - 1}; \quad H_1(z, \alpha_{эф}) = z - \frac{e^{\alpha_{эф}z} - 1}{e^{\alpha_{эф}} - 1};$$

$$H(z, \alpha_{эф}) = \left[z + \frac{2}{\alpha_{эф}} z - \left(1 + \frac{2}{\alpha_{эф}} \right) \frac{1}{e^{\alpha_{эф}}} \right]; \quad (8)$$

$$H(z, \alpha_{эф}) = \left[z + \frac{3z}{\alpha_{эф}} + \frac{6z}{\alpha_{эф}^2} - \left(1 + \frac{3}{\alpha_{эф}} + \frac{6}{\alpha_{эф}^2} \right) \frac{1}{e^{\alpha_{эф}}} \right].$$



Для расчета зависимости $\tilde{\Phi}(z)$ решалась обратная задача определения неизвестного параметра $\alpha_{эф}$ и коэффициентов a_n полинома (6). Параметры модели a_n определялись из условия минимизации функционала:

$$S = \sum_{i=1}^k (\theta(z_i, \omega) - \theta_i)^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $\theta(z_i, \omega)$ – расчетное значение концентрации на основе формулы (7); θ_i – известное (измеренное) значение концентрации; ω – вектор параметров $(\alpha_{эф}, a_1 \dots a_m)$, минимизирующий функционал S .

Суммирование в формуле (9) проводится по числу расчетных точек, число которых равно k . Неизвестные параметры определялись из представления (6), (7) с использованием методов глобальной оптимизации [18, 19]. Для учета возможных случайных отклонений от измеренных значений концентрации (рандомизация) был реализован метод Монте-Карло.

Рандомизация проводилась следующим образом. Для каждой точки $\theta_i(z_i)$ точного решения в интервале $\Delta\theta_i = \pm 0,05$ с помощью генератора случайных чисел задавалось значение концентрации. Применение метода Монте-Карло основывалось на рассмотрении $N = 1000$ различных реализаций случайного разброса точек в заданном интервале и вычислении средних значений соответствующих параметров $\alpha_{эф}, a_n$ [20]. Расчет показывает, что полином третьей степени (6) дает наиболее точные результаты. Более высокие степени полинома приводят к неустойчивым и физически нереализуемым значениям параметров $\alpha_{эф}, \tilde{\Phi}(1)$.

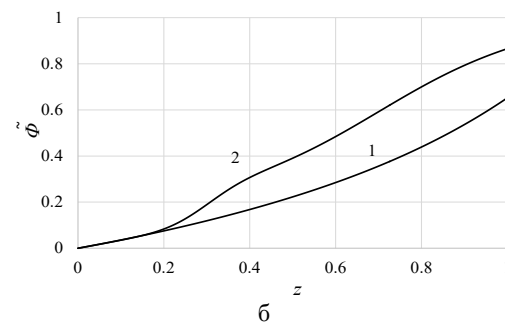


Рис. 3. Распределение концентрации загрязнителя (а) и полного массового расхода (б) для исследуемого участка реки Чарыш: 1 – функция (2); 2 – функция (3).

Расчетное значение коэффициента продольной дисперсии $E = 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$, величина концентрации загрязнителя в нижнем створе $\theta_j = 1,5$

Fig.3 Distributions of pollutant concentration (a) and total mass flow rate (4) (b) for the studied section of the Charysh River.

1 – function (2), 2 – function (3).

The calculated value of the longitudinal dispersion coefficient $E=10^4 \text{ m}^2/\text{s}$, the value of pollutant concentration in the lower section $\theta_j=1.5$

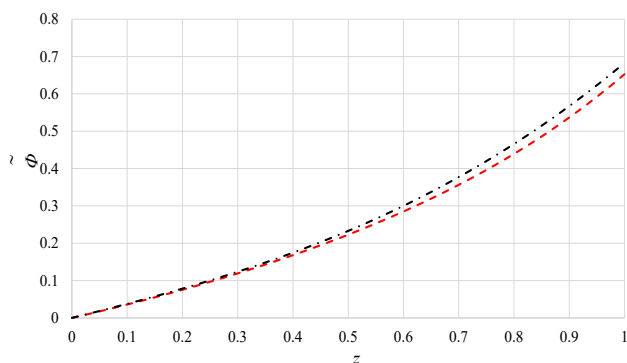


Рис. 4. Распределение полного массового расхода загрязнителя для функции (2): красная кривая – точное решение (рис. 3); черная кривая – решение обратной задачи (9) для полинома третьей степени с использованием метода Монте-Карло

Fig. 4. Distribution of the total mass flow rate of the pollutant for function (2)

The red curve is the exact solution (Fig. 3); the black curve is the solution of the inverse problem (9) for a third-degree polynomial using the Monte Carlo method

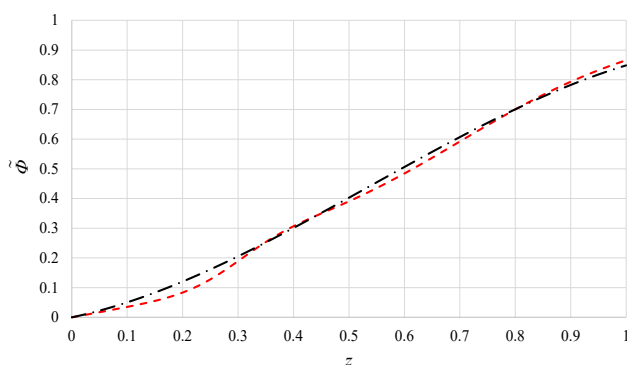


Рис. 5. Распределение полного массового расхода загрязнителя для функции (3): красная кривая – точное решение (рис. 5); черная кривая – решение обратной задачи (9) для полинома третьей степени с использованием метода Монте-Карло

Fig. 5. Distribution of the total mass flow rate of the pollutant for function (3)

The red curve is the exact solution (Fig. 5); the black curve is the solution of the inverse problem (9) for a third-degree polynomial using the Monte-Carlo method

Выводы

1. На основе стационарного уравнения адвекции-диффузии произведено решение прямой задачи для диффузного стока загрязнителя на всем исследуемом интервале реки Чарыш с использованием гидродинамической модели русла. Расчет производился для двух различных сценариев загрязнения (тестовых функций) при

На рисунках 4, 5 приведены результаты расчета обратной задачи для рассмотренных сценариев загрязнения (2), (3).

Как следует из приведенных рисунков, решение обратной задачи восстановления распределения полного массового расхода (6) с использованием рандомизации данных дает хорошее согласие с точным решением для рассмотренных сценариев диффузного загрязнения.

На рисунке 6 представлены распределения числа Пекле и его найденные эффективные значения, полученные в результате решения обратной задачи для рассмотренных тестовых функций.

Как следует из рисунка 6, найденные эффективные значения числа Пекле находятся в интервале реальных значений его изменения.

Таким образом, предложенный метод дает возможность получения разумных значений величин данного параметра.

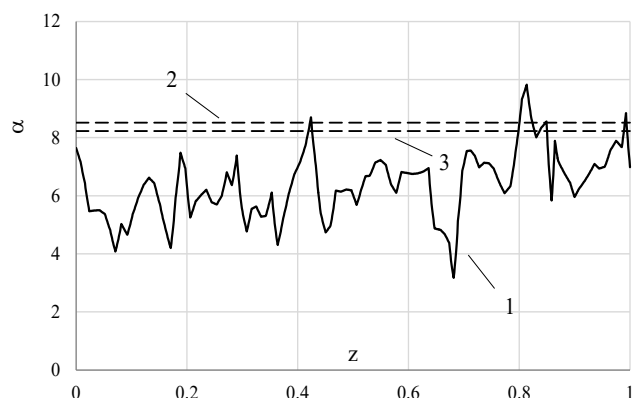


Рис. 6. Распределение значений числа Пекле на исследуемом интервале:

- 1 – результат моделирования;
- 2 – эффективное значение числа Пекле для тестовой функции (2);
- 3 – эффективное значение числа Пекле для тестовой функции (3)

Fig. 6. Distribution of Peclet number values on the studied interval:

- 1 – simulation result,
- 2 – effective Peclet number value for test function (2),
- 3 – effective Peclet number value for test function (3)

заданном значении коэффициента продольной дисперсии.

2. На основе решения прямой задачи с использованием метода глобальной оптимизации и метода Монте-Карло проведено восстановление распределения полного массового расхода загрязнителя и величины числа Пекле. Расчет показал хорошее соответствие восста-

новленного распределения и точного решения задачи.

3. Восстановленные значения эффективного числа Пекле находятся внутри интервала

Список использованных источников

1. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Коллективная монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. М.: Российская академия наук. 2020. 512 с.
2. Коронкевич Н.И. Сток с водосбора как источник диффузного загрязнения рек / Н.И. Коронкевич, С.В. Долгов // Вода и экология, проблемы и решения. 2017. № 4 (72). С. 103-110. EDN: YPORPC
3. Раткович Л.Д. Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты / Л.Д. Раткович, В.Н. Маркин, И.В. Глазунова, С.А. Соколова // Природообустройство. 2016. № 3. С. 64-75. EDN: WJLCP
4. Chueh Yi, Fan C., Huang Y. Copper concentration simulation in a river by SWAT-WASP integration and its application to assessing the impacts of climate change and various remediation strategies // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 279. P. 111613.
5. Liu Q., Cheng Y., Fan C. Pollution characteristics and health exposure risks of heavy metals in river water affected by human activities // Sustainability. 2023. Vol. 15 (10). 8389. <https://doi.org/10.3390/su15108389>
6. Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P. Critical shifts in trace metal transport and remediation performance under future low river flows // Environmental Science & Technology. 2020. Vol. 54 (24). P. 15742-15750. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04016>
7. Ren J., Hao J., Tao L. Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River, China // Environmental science and pollution research. 2021. V. 28. P. 2904-2913. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3>
8. Boano F., Revelli R., Ridolfi L. Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach // Water Resources Research. 2005. V. 41(7). P. 1-13. <https://doi.org/10.1029/2004wr003754>
9. Chaikovskii D., Zhang Y. Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations // Journal of Computational Physics. 2002. V. 470. 111609. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111609>
10. Chen Y., Lin L.S., Viadero R.C., Gang D.D. Nonpoint Source Pollution // Water Environment Research. 2007. V. 79(10). P. 2032-2048. <https://doi.org/10.2175/106143007X218656>
11. Kulbay M., Mukanova B., Sebu C. Identification of separable sources for advection diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data // Inverse Problems in Science and Engineering. 2017. V. 25(2). P. 279-308. <https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396>
12. Kashfipoura S.M., Falconer R.A. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels // Water Research. 2002. V. 36(6). P. 1596-1608. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00351-7](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00351-7)
13. Pannone M., Mirauda D., Vincenzo A.D. Molino, B. Longitudinal dispersion in straight open channels: Anomalous breakthrough curves and first-order analytical solution for the depthaveraged concentration // Water. 2018. V. 10(4). P. 478. <https://doi.org/10.3390/w10040478>

реальных значений его изменения на исследуемом интервале, что позволяет рассматривать найденную величину как разумную оценку.

References

1. Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions / Collective monograph under the guidance of V.I. Danilov-Daniyan. M.: Russian Academy of Sciences, 2020. 512 p.
2. Koronkevich N.I., Dolgov S.V. The runoff from a watershed as a source of diffuse river pollution // Water and Ecology: Problems and Solutions. 2017. No (72). P. 103-110. EDN: YPORPC
3. Ratkovich L.D., Markin V.N., Glazunova I.V., Sokolova S.A. Factors of influence of diffuse pollution on water bodies / L.D. Ratkovich, V.N. Markin, I.V. Glazunova, S.A. Sokolova // Prirodoobustrojstvo. 2016. No 3. P. 64-75. EDN: WJLCP
4. Chueh Yi, Fan C., Huang Y. Copper concentration simulation in a river by SWAT-WASP integration and its application to assessing the impacts of climate change and various remediation strategies // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 279. P. 111613.
5. Liu Q., Cheng Y., Fan C. Pollution characteristics and health exposure risks of heavy metals in river water affected by human activities // Sustainability. 2023. Vol. 15 (10). 8389. <https://doi.org/10.3390/su15108389>
6. Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P. Critical shifts in trace metal transport and remediation performance under future low river flows // Environmental Science & Technology. 2020. Vol. 54 (24). P. 15742-15750. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04016>
7. Ren J, Hao J, Tao L. Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River, China // Environmental science and pollution research. 2021. V. 28. P. 2904-2913. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3>
8. Boano F., Revelli R., Ridolfi L. Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach // Water Resources Research. 2005. V. 41(7). P. 1-13. <https://doi.org/10.1029/2004wr003754>
9. Chaikovskii D., Zhang Y. Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations // Journal of Computational Physics. 2002. V. 470. 111609. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111609>
10. Chen Y., Lin L.S., Viadero R.C., Gang D.D. Nonpoint Source Pollution // Water Environment Research. 2007. V. 79(10). P. 2032-2048. <https://doi.org/10.2175/106143007X218656>
11. Kulbay M., Mukanova B., Sebu C. Identification of separable sources for advection diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data // Inverse Problems in Science and Engineering. 2017. V. 25(2). P. 279-308. <https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396>
12. Kashfipoura S.M., Falconer R.A. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels // Water Research. 2002. V. 36(6). P. 1596-1608. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00351-7](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00351-7)
13. Pannone M., Mirauda D., Vincenzo A.D. Molino, B. Longitudinal dispersion in straight open channels: Anomalous breakthrough curves and first-order analytical solution for the depthaveraged concentration // Water. 2018. V. 10(4). P. 478. <https://doi.org/10.3390/w10040478>

14. Goliatt L., Sulaiman S.O., Khedher K.M., Farooquean A.A., Yaseen Z.M. Estimation of natural streams longitudinal dispersion coefficient using hybrid evolutionary machine learning model // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2021. V. 15 (1). P. 1298-1320. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1972043>

15. Gualtieri C., Ciaravino G., Doria G.P. Analysis of longitudinal dispersion equations in streams and rivers // *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering Philadelphia, USA September 10-13, 2006 (ICHE2006)*. Philadelphia, USA.

16. HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (HEC). 2016. 962 pp.

17. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plain rivers // *Eurasian journal of mathematical and computer applications*. 2023. V. 11(4). P. 14-28. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28>

18. Nocedal J., Wright S.J. *Numerical Optimization*. New York: Springer. 2006. 651 p.

19. *Global Optimization Toolbox. User's Guide*. The MathWorks, Inc., 2020. 877 p.

20. Strijov V., Weber G.W. Nonlinear regression model generation using hyperparameter optimization // *Computers & Mathematics with Applications*. 2010. V. 60(4). P. 981-988. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.03.021>

14. Goliatt L., Sulaiman S.O., Khedher K.M., Farooquean A.A., Yaseen Z.M. Estimation of natural streams longitudinal dispersion coefficient using hybrid evolutionary machine learning model // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2021. V. 15 (1). P. 1298-1320. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1972043>

15. Gualtieri C., Ciaravino G., Doria G.P. Analysis of longitudinal dispersion equations in streams and rivers // *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering Philadelphia, USA September 10-13, 2006 (ICHE2006)*. Philadelphia, USA.

16. HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (HEC). 2016. 962 pp.

17. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plain rivers // *Eurasian journal of mathematical and computer applications*. 2023. V. 11(4). P. 14-28. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28>

18. Nocedal J., Wright S.J. *Numerical Optimization*. New York: Springer. 2006. 651 p.

19. *Global Optimization Toolbox. User's Guide*. The MathWorks, Inc., 2020. 877 p.

20. Strijov V., Weber G.W. Nonlinear regression model generation using hyperparameter optimization // *Computers & Mathematics with Applications*. 2010. V. 60(4). P. 981-988. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.03.021>

Об авторах

Валерий Юрьевич Филимонов, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>; vyfilimonov@rambler.ru

Алексей Васильевич Кудишин, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-5613-5778. avkudishin@yandex.ru

Ольга Вольфовна Ловцкая, старший научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-3942-1350. lov@iwep.ru

Александр Владимирович Дьяченко, научный сотрудник; ORCID: 0000-0003-4178-8415; dychenko@iwep.ru

Константин Валерьевич Марусин, ORCID: 0000-0003-1565-8326; kat@iwep.ru

Information about authors

Valery Yu. Filimonov, DSc (Phys-Math), chief researcher; ORCID: 0000-0003-0229-7058. vyfilimonov@rambler.ru

Alexey V. Kudishin, CSc (Phys-Math), senior researcher of; ORCID: 0000-0002-5613-5778. avkudishin@yandex.ru

Olga V. Lovtskaya, senior researcher of; ORCID: 0000-0002-3942-1350. lov@iwep.ru

Alexander V. Dyachenko, researcher; ORCID: 0000-0003-4178-8415, dychenko@iwep.ru

Konstantin V. Marusin, researcher; ORCID: 0000-0003-1565-8326; kat@iwep.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Филимонов В.Ю., Кудишин А.В., Ловцкая О.В., Дьяченко А.В., Марусин К.В. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Вклад авторов / Contribution of authors

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

Статья поступила в редакцию / The article was received at the editorial office on 19.02.2025

Одобрена после рецензирования / Accepted after peer review on 13.10.2025

Принята к публикации после доработки / Approved for publication on 13.10.2025

Filimonov V.Yu., Kudishin A.V., Lovtskaya O.V., Dyachenko A.V., Marusin K.V. carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-106-116>

УДК 556.18:626/628:627.5:628.1:631.6



АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПОДХОДА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГИДРОМЕЛИОРАЦИЙ

Хала Кабтул¹, И.В. Глазунова^{2✉}, Н.П. Карпенко³, С.А. Соколова⁴ М.А. Ширяева⁵

^{1,2,4} ФГБОУ ВО 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

³ ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, корп. 2, Россия

⁵ Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора; 141014, г. Мытищи, ул. Семашко, 2, Россия

¹ halak93@gmail.com

² ivglazunova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>

³ npkarpenko@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X>

⁴ sokolovasvetlana@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>

⁵ Shiryayeva.MA@fncg.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>

Аннотация. Цель исследований заключается в анализе структуры и условий водопользования в пределах водосбора реки Нерль Калязинского района Тверской области для оценки загрязняющей нагрузки на реку и обоснования водоохранных мероприятий на основе интегрированного подхода с учетом влияния гидромелиораций. Собраны и обобщены данные по природным и хозяйственным условиям для части бассейна реки Нерль, выполнен анализ загрязняющей нагрузки на реку в пределах ее водосбора. Оценены современная хозяйственная обстановка на объекте и перспективы ее развития с характеристиками водопотребления и водоотведения. Выполнены водохозяйственные расчеты на современный и перспективный периоды (для лет 75 и 95% обеспеченности по стоку реки). Произведены расчеты коэффициентов предельной загрязненности для различных отраслевых водопользователей, расчеты объемов водопотребления и водоотведения с учетом предельной загрязняющей нагрузки. Выполнен анализ структуры загрязняющей нагрузки отраслевых водопользователей на основе интегрированного подхода. Разработан необходимый комплекс водоохранных мероприятий по улучшению качества поверхностных водных ресурсов с учетом локальных мероприятий на мелиоративных системах. Определены ежегодные затраты на проведение водохозяйственных водоохранных мероприятий с учетом локальных мероприятий на мелиоративных системах и предотвращенный ущерб от загрязнения воды.

Ключевые слова: водные ресурсы, структура водопользования, гидромелиорация, показатель качества воды, локальные водоохранные мероприятия и сооружения, диффузный сток, дренажный сток, сорбенты, затраты, предотвращенный ущерб

Формат цитирования: Кабтул Х., Глазунова И.В., Карпенко Н.П., Соколова С.А., Ширяева М.А. Анализ условий водопользования при обосновании водоохранных мероприятий на основе интегрированного подхода с учетом влияния гидромелиораций // Природообустройство. 2025. № 5. С. 106-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-106-116>

Original article

ANALYSIS OF WATER USE CONDITIONS IN THE JUSTIFICATION OF WATER PROTECTION MEASURES ON THE BASIS OF THE INTEGRATED APPROACH TAKING INTO ACCOUNT THE IMPACT OF HYDRO-RECLAMATION

Kh. Kabtoula¹, I.V. Glazunova^{2✉}, N.P. Karpenko³, S.A. Sokolova⁴, M.A. Shiryayeva⁵

^{1,2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

³ Federal State Budgetary Institution “Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov”; 127434, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya str., 44, building 2, Russia

⁵ Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman of Rospotrebnadzor; 141014, Mytishchi, Semashko str., 2, Russia

¹ halak93@gmail.com

² ivglazunova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>

³ npkarpenko@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X>

⁴ sokolovasvetlana@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>

⁵ Shiryayeva.MA@fncg.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>

Abstract. The aim of the research was to analyze the structure and conditions of water use within the Nerl River watershed in the Kalyazin district of the Tver region to assess the impact of pollution on the river and provide justification for water protection measures based on an integrated approach that takes into account the impact of hydro-reclamation. Data on the environmental and economic factors were gathered and compiled for part of the Nerl River basin, and an analysis of the pollution impact on the river within the Nerl River watershed was performed. The current economic situation at the site and its development prospects were assessed, including characteristics of water consumption and wastewater discharge. Water management calculations were carried out for current and future periods (for years with 75% and 95% river flow probability). Calculations of maximum permissible pollution coefficients for various sectoral water users were performed, and volumes of water consumption and wastewater discharge were calculated, taking into account the maximum permissible pollutant load. An analysis of the structure of the pollutant load from sectoral water users was carried out based on an integrated approach. A necessary set of water protection measures to improve the quality of surface water resources was developed, including local measures on melioration systems. Annual costs for the implementation of water management and water protection measures, including local measures on melioration systems, were determined, along with the prevented damages from water pollution.

Keywords: water resources, water use structure, hydro-reclamation, water quality indicator, local water protection measures and structures, diffuse runoff, drainage runoff, sorbents, costs, prevented damage

For citation: Kabtoula Kh., Glazunova I.V., Karpenko N.P., Sokolova S.A., Shiryayeva M.A. Analysis of water use conditions in the justification of water protection measures on the basis of the integrated approach taking into account the impact of hydro-reclamation // Prirodobustrojstvo. 2025. № 5. P. 106-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-106-116>

Введение. В настоящее время проблема сохранения и повышения качества воды для хозяйственно-питьевых, технических и гидромелиоративных целей является одной из приоритетных проблем. Известно более 2,5 тыс. загрязнителей природных вод, которые влияют на экологическое состояние окружающей среды: здоровье населения, животного и растительного мира и т.д. Следует отметить, что возрастающее антропогенное воздействие на окружающую среду создает избыток и опасность проникновения различных загрязнителей, органических и минеральных веществ, поступающих в поверхностные воды, – например, со смывом удобрений с полей. В итоге

это создает экологически напряженную ситуацию на водосборных территориях. В настоящее время во многих районах мира и на территории России ощущается существенная нехватка воды, пригодной для хозяйственно-питьевых целей и промышленного производства. Поэтому вопросы оценки качества водных ресурсов в пределах водосборов рек и разработка комплекса природоохранных мероприятий по их улучшению являются актуальной проблемой. Объектом исследований является водосборный бассейн реки Нерль, основная часть которого находится в Калызинском районе Тверской области. Климат исследуемой территории – умеренно-континентальный,

характеризующийся среднесреднегодным годовым количеством осадков $O = 593$ мм, суммарным испарением с поверхности суши $E_c = 363$ мм. Среднегодовая температура воздуха составляет: $t = +3,3^\circ\text{C}$, гидротермический коэффициент – 1,63, что соответствует избыточному увлажнению по агроклиматическому районированию [1-3].

Цель исследований: анализ структуры и условий водопользования в пределах водосбора реки Нерль Калязинского района Тверской области для оценки загрязняющей нагрузки на реку и обоснования водоохраных мероприятий на основе интегрированного подхода с учетом влияния гидромелиораций.

Материалы и методы исследований. Водоснабжение населения и промышленных предприятий осуществляется из подземных водозаборов, которые в гидравлическом отношении не имеют связи с рекой. Подача воды для нужд животноводства и орошения земель осуществляется за счет поверхностных вод из реки Нерль. Тем не менее все сточные воды сбрасываются в реку¹. Так, в 2016 г. прокуратура Калязинского района провела проверку исполнения природоохранного законодательства при эксплуатации очистных сооружений Калязинского муниципального унитарного предприятия «Коммунсервис». По результатам проверки было установлено, что качество сточной воды после очистки на выходе из очистных сооружений не соответствует требованиям СанПиН 2.1.5.980-00 «Гигиенические требования по охране поверхностных вод». Также сообщалось, что 33% исследуемых проб воды из открытых водоемов в Калязине не отвечали требованиям СанПиН 2.1.5.980-00 по санитарно-химическим показателям (БПК₅, ион аммония, общее микробное число).

На водосборной территории реки Нерль находятся осушительные системы общей площадью 1406 га, дренажный сток с осушаемых земель содержит остатки удобрений и пестициды [1, 4]. Для оценки качества поверхностных и дренажных вод необходимо решить ряд важных задач:

- выполнить анализ водохозяйственного комплекса (ВХК) в пределах водосбора на современный период и на перспективу для оценки потенциальных рисков, связанных с водопользованием;

- разработать комплекс водоохраных мероприятий с необходимыми экологическими и экономическими оценками.

¹ СанПиН 2.1.4.1110-02. Зоны санитарной охраны (ЗСО) источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения.

На современном этапе в состав ВХК рассмотренного объекта входят коммунально-бытовое хозяйство, промышленное производство, гидромелиорация, животноводство. В бассейне реки Нерль проживают 42,0 тыс. чел., из которых 13,8 тыс. – это городское население, 28,2 тыс. – сельское. По данным водоканала Калязинского района и в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 5 сентября 2013 г. № 782 «О схемах водоснабжения и водоотведения» на современный период структура водохозяйственного баланса строится следующим образом: объем водопотребления населения – $W_n = 352,77$ тыс. м³; объем водоотведения – $W_{вв.н} = 333,89$ тыс. м³.

На исследуемой территории отмечается существенное развитие промышленности, где ведущими предприятиями являются: ООО «Механический завод «Калязинский»»; ООО «Битца»; ООО «Аванти»; ООО «Европластик»; ООО ПО «Русский хлеб»; ООО «Экспериментальный пищевой комбинат» ЗАО «Калязинский завод молочных продуктов».

Дренажные системы требуют реконструкции на 15% площади осушенных земель.

Результаты и их обсуждение. Исходя из анализа структуры водопользования были оценены и рассчитаны показатели загрязненности сточных вод по коэффициентам предельной загрязненности. Так, показатель качества сточных вод по объемам предельной загрязненности рассчитывается по зависимости [4, 6-7]:

$$W_{пзи} = K_{пзи} \cdot W_{вви}, \text{ млн м}^3, \quad (1)$$

где $K_{пзи}$ – коэффициент предельной загрязненности i -го водопотребителя, который определяется как $K_{пзи} = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{C_{вви}}{\text{ПДК}_i} - 1$ по каждой группе лимитирующего показателя вредности (ЛПВ); $C_{вви}$ – концентрация загрязняющего вещества в сточных водах; $W_{вви}$ – объем водоотведения (возвратные, сточные воды).

Расчетные показатели предельной загрязненности сточных вод коммунально-бытового хозяйства для различных загрязняющих веществ приведены в таблице 1.

Расчеты коэффициентов предельной загрязненности для промышленных предприятий представлены в таблице 2.

Влияние мелиорированных сельскохозяйственных земель определено с учетом структуры севооборота и процентного соотношения мелиорированных земель (рис. 1, 2). На объекте исследований преобладает зерноотравопропашной севооборот. При этом орошаемые земли составляют 2%, осушаемые земли – 5%, поэтому в дальнейших водохозяйственных расчетах учитывается

дренажный и диффузный сток с осушаемых земель.

Показатели качества возвратных вод для осушаемых земель определены для севооборота с преобладанием зерновых культур. Загрязняющая нагрузка на реку со стороны возвратных вод с осушаемых земель (дренажный сток) определена с учетом остатков азота ($K_{пз} = 2,6$) и фосфора ($K'_{пз} = 4,6$) в поверхностном стоке, его сборе и отводе собирателями на массиве осушения, а также расчетом опасности попадания остатков пестицидов и биогенов в дренажный и диффузный сток по известным методикам [3, 4].

Анализ загрязняющей нагрузки на реку со стороны отраслевых водопользователей в структуре общей загрязняющей нагрузки показал, что наибольшую загрязняющую нагрузку по БПК оказывают предприятия легкой и пищевой промышленности, а также коммунально-бытовое хозяйство населенных пунктов. Легкая промышленность также является лидером по загрязнению реки фосфором; основное загрязнение остатками нефтепродуктов происходит со стороны предприятий легкой промышленности [4, 8].

Таблица 1. Коэффициенты предельной загрязненности сточных вод коммунально-бытового хозяйства

Table 1. Coefficients of maximum pollution of municipal wastewater

Загрязняющие вещества <i>Pollutants</i>	$C_{ввп}$, мг/л $C_{ввп}$, mg/l	$ПДК_p$, мг/л, $МРС$, mg/l,	$K_{пз}$
БПК ₅ / BOD_5	69	3	22
Железо / <i>Ferrum</i>	1,0	0,05	19
Медь / <i>Copper</i>	0,02	0,005	3
Цинк / <i>Zinc</i>	0,08	0,01	7
Азот / <i>Nitrogen</i>	20	1	19
Алюминий / <i>Aluminium</i>	0,5	0,5	0
Сульфаты / <i>Sulfates</i>	100	100	0
Хлориды / <i>Chlorides</i>	50	300	0
$K_{пз}$	–	–	22
$K'_{пз}$ *	–	–	6,6
$W_{пз}$, МЛН м ³	–	–	2,18

* С учетом эффективности существующих в настоящее время локальных очистных сооружений

* taking into account the efficiency of existing local treatment facilities

Таблица 2. Коэффициенты предельной загрязненности для промышленных предприятий
Table 2. Maximum pollution influence coefficients for industrial enterprises

Загрязняющие вещества <i>Pollutants</i>	$ПДК_i$, мг/л $МРС_i$ mg/l	Легкая промышленность <i>Light manufacturing</i>		Тяжелое машиностроение <i>Basic engineering industry</i>		Пищевая промышленность <i>Food industry</i>	
		$C_{ввп}$, мг/л	$K_{пз}$	$C_{ввп}$, мг/л	$K_{пз}$	$C_{ввп}$, мг/л	$K_{пз}$
БПК ₅ / BOD_5	3	113,13	36,7	7,95	1,65	104,91	34
Сульфаты / <i>Sulfates</i>	100	209,79	1,10	24,89	0	13,39	0
Хлориды / <i>Chlorides</i>	300	307,08	0,02	46,70	0	66,96	0
Азот / <i>Nitrogen</i>	1,00	4,75	3,75	0,37	0	0,31	0
Фосфор / <i>Phosphorus</i>	0,03	0,81	26,0	0,48	15	0,36	11
Фенолы / <i>Phenols</i>	0,01	0,1006	9,06	0,00	0	0,0156	0,6
Нефтепродукты / <i>Oil products</i>	0,05	0,25	4,00	0,13	1,60	0	0
$K_{пз}$	–	–	36,7	–	15	–	34
$K'_{пз}$ *	–	–	7,34	–	3	–	6,8
$W_{пз}$, МЛН м ³	–	–	3,3	–	1,68	–	2,79

* С учетом эффективности существующих в настоящее время локальных очистных сооружений.

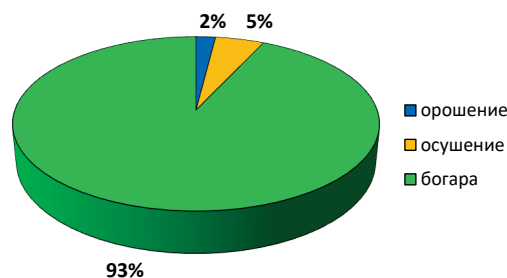


Рис. 1. Структура процентного соотношения мелиорированных земель

Fig. 1. Structure of the percentage of reclaimed land

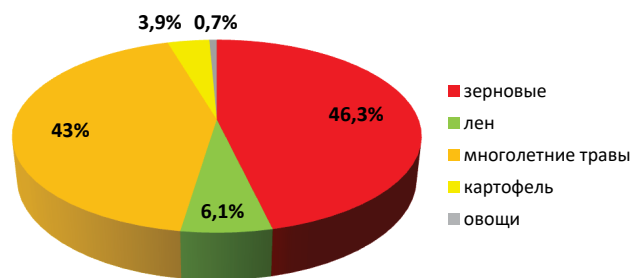


Рис. 2. Структура использования пахотных земель

Fig. 2. Structure of arable land use

На рисунке 3 приведена диаграмма долевого участия различных отраслевых водопользователей в структуре комплексной загрязняющей нагрузки по $K_{пз}$.

Объемы водопотребления и водоотведения с учетом объемов предельной загрязненности на современный период и перспективу до 2035 года представлены в таблице 3. Из данных таблицы следует, что орошение на фоне дренажа тоже создает значительную загрязняющую нагрузку на реку.

В прогнозах были приняты следующие показатели развития: рост численности населения на 0,65% в год (как в периоды стабильного экономического развития); рост в других хозяйственных отраслях на 10...15%.

Для интегрированной оценки особенностей водопользования были составлены водохозяйственные балансы с учетом антропогенного

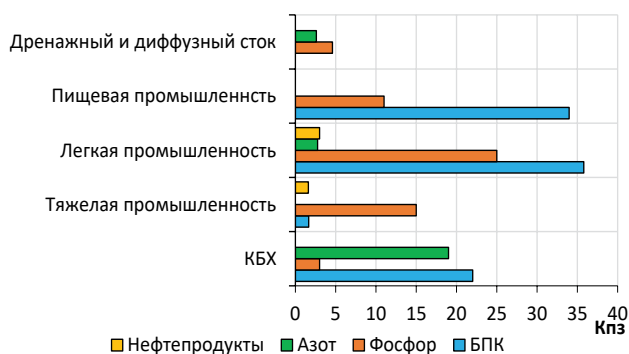


Рис. 3. Диаграмма структуры комплексной загрязняющей нагрузки по $K_{пз}$

Fig. 3. Diagram of the structure of the complex polluting load by C_{PI} (critical pollution indicators)

влияния на качество воды в реке. Качество воды в реке на основе интегрированного подхода оценивалось по величине комплексного коэффициента предельной загрязненности по укрупненным показателям статей водохозяйственного баланса. Уравнение водохозяйственного баланса имеет вид:

$$ВХБ = W_p + W_{п.в.} + \sum W_{вви} - \sum W_i - W_{поп.} - \alpha \cdot W_{п.в.} - \sum W_{пзи}, \quad (1)$$

где W_p – объем стока реки²; $W_{п.в.}$ – объем водозабора из подземных вод; $\sum W_{вви}$ – объем возвратных вод i -го участника ВХК; W_i – объем водопотребления i -м участком ВХК; $W_{поп.}$ – объем расчетных попусков на нижележащий участок реки; α – коэффициент гидравлической связи речных и подземных вод; $\alpha \cdot W_{п.в.}$ – ущерб речному стоку от использования подземных вод; объемы предельной загрязненности³ [4, 5].

Оценки качества речной воды выполнялись в соответствии со стандартной методикой по коэффициенту предельной загрязненности:

$$K_{пз\ p} = \frac{(\sum W_{пзи} + \sum W_{вви})}{W_p + W_{п.в.} + \sum W_{вви} - \sum W_i - \alpha \cdot W_{п.в.}} - 1. \quad (2)$$

Градации качества воды по величине коэффициента предельной загрязненности показана в таблице 4.

При водохозяйственных расчетах подтверждено происходящее загрязнение реки сточными водами участников отраслевого водопользования в прогнозном варианте. Качество воды в реке соответствует уровню «Умеренно загрязненная» для прогнозного сценария развития без принятия мер по снижению загрязняющей нагрузки на реку.

Таблица 3. Объемы водопотребления и водоотведения с учетом объемов предельной загрязненности на современный и перспективный периоды, млн м³

Table 3. Water consumption and wastewater disposal with regard to maximum pollution levels for the current and future periods, million m³

Водопользователи Water consumers	Современный период Current period			Перспективный период Prospective period		
	W_i	$W_{вви}$	$W_{пзи}$	W_i	$W_{вви}$	$W_{пзи}$
Коммунально-бытовое хозяйство (КБХ) housing and communal services	0,353	0,33	2,18	0,406	0,380	2,507
Промышленность / Industry	2,24	1,42	52,11	2,576	1,633	59,93
Животноводство / Livestock farming	0,096	0,053	0,367	0,110	0,061	0,42
Орошение / Irrigation	2,55	0,255	8,342	2,933	0,293	9,59
Осушение / Drainage	–	0,314	0,942	–	0,361	1,083
Итого / Total	5,239	2,372	63,94	6,025	2,728	73,53

² СП 529.1325800.2023 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик».

³ СанПиН 1.2.3685-21 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов и аквапарков»

Исходя из местных условий рекомендован комплекс водохозяйственных и водоохраных мероприятий (ВХМ) по каждому отраслевому водопользователю для повышения качества воды в реке Нерль, в том числе указано на необходимость внутрисистемной очистки диффузного и дренажного стока на мелиоративных системах [10, 11]:

1. Повышение эффективности очистки сточных вод.
2. Повышение долевого участия водооборотных систем водоснабжения.
3. Повышение долевого участия повторных систем водоснабжения.
4. Обустройство водоохраных зон реки.
5. Локальная внутрисистемная очистка поверхностного и дренажного стока с применением сорбентов.

Примером использования сорбентов в локальных природоохранных сооружениях на мелиоративной системе может служить устройство поглотителей поверхностных вод. Для предотвращения поступления загрязняющих веществ с поверхностным стоком возможно обустройство поглотителей поверхностных вод (ППВ) по границе загрязненной территории или местных понижений с засыпкой сорбента.

Конструкция типового ППВ представлена на рисунке 4. Количество поглотителей и объем сорбента рассчитываются из условия, что водосборная площадь дренажного колодца-поглотителя должна составлять не меньше 3,0 га, но не больше величины эрозионно-опасной площади. Количество поглотителей по границе загрязненной территории зависит от модуля поверхностного стока, определяемого

для рассматриваемой части водосборной площади. Необходимое количество сорбента и периодичность его замены рассчитываются с учетом физико-химических показателей сорбентов и загрязняющей нагрузки [1, 12, 13]. В отношении рассматриваемого объекта расчеты выполнены для площади отвода воды с территории 204 га при модуле диффузного стока $0,05 \text{ л/с} \times \text{га}$. Состав загрязнений в диффузном стоке с мелиорируемых земель представлен в таблице 5.

Как следует из представленных рисунков, достичь качества воды класса «Очень

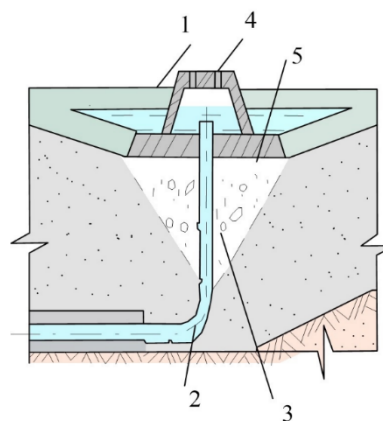


Рис. 4. Конструкция типового поглотителя поверхностных вод

- 1 – перфорированная железобетонная труба;
- 2 – отводная труба из ПВХ;
- 3 – гравий или гранулированный сапропель;
- 4 – перфорированная железобетонная крышка;
- 5 – обратная засыпка

Fig. 4. Design of a typical surface water absorber
1 – Perforated reinforced concrete pipe;
2 – PVC drain pipe; – Gravel or granulated sapropel;
4 – Perforated reinforced concrete cover; 5 – Backfill

Таблица 4. Классы качества воды в реке по коэффициенту предельной загрязненности

Table 4. Water quality classes in the river according to the maximum pollution coefficient

$K_{\text{нзр}}$	$\leq -0,8$	$-0,8-0,0$	$0,0-1$	$1-3$	$3-5$	>5
Класс качества quality category	очень чистая very clean	Чистая clean	Умеренно-загрязненная moderately contaminated	Загрязненная contaminated	Грязная polluted	очень грязная very polluted

Таблица 5. Содержание остатков удобрений и тяжелых металлов в диффузном стоке с мелиорированных земель [12,13]

Table 5. Fertilizer and trace metal residues in diffuse runoff from reclaimed land [12,13]

Загрязняющие вещества Pollutants	$N-NO_3$	P_2O_5	Zn	Cu	Pb	Cd	Mn	Fe
$C_{\text{вв}}, \text{ мг/л}$	9,74	1,94	0,0016	0,0045	0,1875	0,0008	0,0163	0,0764
ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения, мг/л Maximum permissible concentration for fishery waters, mg / l	9,1	0,03	0,01	0,001	0,006	0,005	0,01	0,1

чистая» по укрупненным водохозяйственным показателям позволило введение локальной очистки дренажного и диффузного стока на мелиоративных системах при применении локальных водохозяйственных мероприятий и сооружений с засыпкой сорбентов на основе сапропеля. В частности, обустройство водохозяйственных зон создается с целью: защиты водного объекта от загрязнений, поступающих с диффузными стоками; защиты склонов первой надпойменной террасы от водной эрозии; укрепления берегов. Локальная очистка дренажного стока обеспечивает как снижение загрязняющей нагрузки на реку, так и возможное формирование дополнительного ресурса воды для целей нерегулярного орошения [12-15]. Рассматриваемая река относится к классу «средних», поэтому при расчетах по звеньям речной сети получена площадь водохозяйственной зоны (ВОЗ), равная 1300 га, что составляет 1% от площади лесов на водосборе реки.

С целью оценки экономических затрат на проведение водохозяйственных мероприятий был произведен расчет ежегодных капитальных затрат и издержек (табл. 8).

Также был произведен расчет величины предотвращенного экологического ущерба, который определялся по формуле [7, 8]:

$$Y = p \cdot K_{уд} \cdot \sum W_{ввj} \cdot \sum (C_{ввij} - C'_{ввij}) \cdot A_i, \quad (3)$$

где $p = 0,7$ – коэффициент, учитывающий значимость водного объекта для водохозяйственных целей; $K_{уд}$ – удельная величина предотвращенного ущерба⁴; $C_{ввij}$ – концентрация i -го загрязняющего вещества в возвратных водах j -го участника ВХК до проведения водохозяйственных мероприятий (методов управления); $C'_{ввij}$ – концентрация i -го загрязняющего вещества в возвратных водах j -го участника ВХК после проведения водохозяйственных мероприятий; $W_{ввj}$ – объем возвратных вод j -го участника ВХК; $A_i = 1 / ПДК_i$.

Значения $C'_{ввij}$ приняты с учетом рекомендованных водохозяйственных мероприятий (методов управления).

Значения величины предотвращенного экологического ущерба приведены в таблице 9.

Таблица 6. Физико-химические показатели сорбентов на основе сапропеля

Table 6. Physical and chemical properties of sapropel-based sorbents

Сорбент / Sorbent	Емкость поглощения, мг-экв на 100 г почвы Absorption capacity, mg-eq per 100 g of soil	Удельная поверхность, м ² /г Specific surface area, m ² / g	РН
Сапропель / Sapropel	190	66	7,7

Таблица 7. Среднестатистическая эффективность сокращения уровня загрязнения рек-водоприемников остатками удобрений и пестицидов

Table 7. Average effectiveness of reducing the level of pollution in rivers – water receivers with fertilizers and pesticides residues

Мероприятия / Measures	Эффективность, % Efficiency%
Соблюдение технологии внесения удобрений и пестицидов compliance with fertilizers and pesticides application technology	40-60
Распашка поперек склона / tilling across slopes	10-30
Рыхление почв / soil loosening	5-20
Устройство лесополос / arrangement of forest belts	20-40
Устройство водохозяйственных зон / creation of water protection zones	40-70
Устройство водозадерживающих валов / arrangement of water-retaining shafts	10-30
Устройство бессточных канав, прудов, запруд arrangement of drainless ditches, ponds, dams	30-60
Устройство прудов накопителей дренажного стока arrangement of ponds for drainage runoff accumulators	30-40
устройство биоинженерных сооружений / bioengineering facilities	65-85
Устройство поглотители поверхностного стока / surface runoff absorbers	40-60
Применение сорбентов в локальных сооружениях по очистке поверхностного и дренажного стока на мелиоративной системе application of sorbents in local facilities for cleaning surface and drainage runoff in the land reclamation system	40-70

⁴ $K_{уд}$ – удельный экономический ущерб (443,5 руб/усл. т на 1990 г.). Для расчета ущерба от загрязнения водных объектов используют коэффициенты индексации платежей за загрязнение; в 2013 г. это значение составляло 1,15. К ставкам платы применяется коэффициент индексации, утвержденный нормативным документом: на 2023 г. – 1,26 [16]

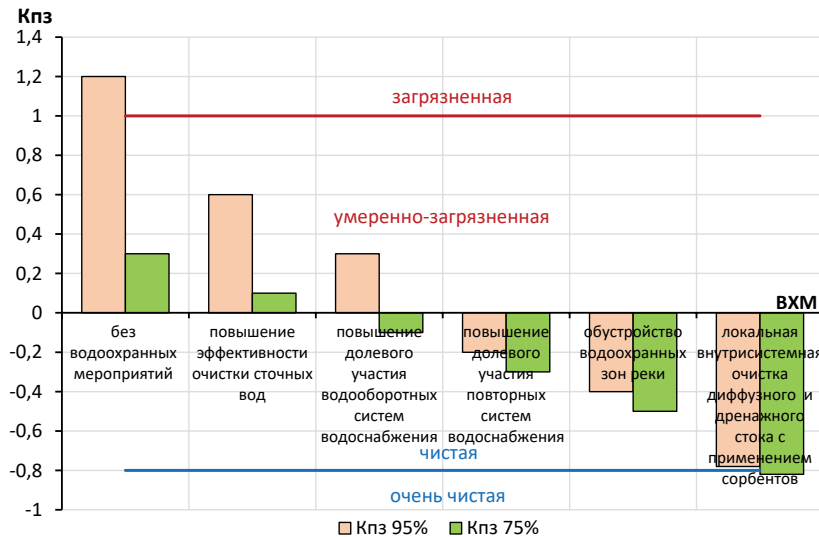


Рис. 5. Изменение качества воды в реке с учетом рекомендуемых ВХМ

Fig. 5. Change in river water quality taking into account recommended water management measures

Таблица 8. Определение ежегодных затрат на проведение водохозяйственных мероприятий

Table 8. Determination of annual costs for water management activities

Мероприятия <i>Measures</i>	Объем <i>Volume</i>	Капитальные затраты <i>capital costs</i>		Ежегодные издержки <i>annual costs</i>		З _г , млн руб./год <i>Z_g, million roubles / year</i>
		Удельные, К _п , руб./м ³ <i>Specific, K_p, roubles / m³</i>	К _п , млн руб. <i>K_p, million roubles</i>	Удельные, С _г <i>Specific, C_g</i>	С _г , млн руб./год <i>C_g, million roubles / year</i>	
Повышение долевого участия водооборотных систем водоснабжения в промышленности <i>Increase in share of industrial water recycling systems</i>	0,12 млн м ³	1000	50	100	5	11,00
Повышение долевого участия повторных систем водоснабжения (животноводство – орошение) <i>Increase in reuse of irrigation water from livestock farming</i>	0,06 млн м ³	2000	120	200	12	26,40
Повышение эффективности очистных сооружений в коммунально-бытовом хозяйстве <i>Improvement of wastewater treatment facilities for housing and communal services</i>	0,38 млн м ³	50	18,55	5	1,855	4,08
Водоохранная зона <i>Water protection zone</i>	1300 га	7400	10,405	740	1,041	2,29
Реконструкция дренажа на переувлажненных землях <i>Reconstruction of drainage on wetlands</i>	1406 га	90000	126,55	9000	12,655	27,84
Сорбенты для засыпки в локальные водоохранные сооружения <i>Sorbents for filling into local water protection structures</i>	94,5 т	33000	3,12	3300	0,312	0,69
Итого/ Total			328,625		32,863	72,30

расчеты выполнены в ценах 2023 года. / calculations are made in 2023 prices.

Таблица 9. Расчет величины предотвращенного ущерба

Table 9. Calculation of the amount of damage prevented

Участник ВХМ Participant of the water management activities	Загрязняющее вещество Pollutant	$C_{\text{вв}ij}$, МГ/Л mg/lf	$C'_{\text{вв}ij}$, МГ/Л mg/l	$W_{\text{вв}ij}$, МЛН М ³ mln m ³	A_i	Y_j , МЛН РУБ. mln rbl
Промышленность industry	БПК ₅ / BOD ₅	7,95	0	0,05	0,33	229,84
	Нефтепродукты / Oil products	0,13	0		20,00	
	Сульфаты / Sulfates	24,89	0		0,01	
Животноводство livestock farming	Азот / Nitrogen	36	0	0,06	1	162,88
	Железо / Ferrum	1,0	0		20,00	
	Цинк / Zinc	0,16	0		100,00	
Коммунально-бытовое хозяйство housing and communal services	Азот / Nitrogen	20	1	0,371	1	110,24
	Железо / Ferrum	1,0	0,05		20,00	
	Цинк / Zinc	0,08	0,01		100,00	
	Железо / Ferrum	0,3	0,03		20,00	
Орошаемые земли / irrigated land	Фосфор P ₂ O ₅ / Phosphorus	0,06	0,03	2,28	33	36,88
Осушение / drainage	Фосфор P ₂ O ₅ / Phosphorus	0,07	0,03	5,7	33	42,60
Итого/ Total						582,44

Выводы

В работе оценены современная водохозяйственная обстановка на объекте и перспективы ее развития с характеристиками водопотребления и водоотведения; выполнены водохозяйственные расчеты на современный и перспективный периоды с учетом качества воды по $K_{\text{нз}}$ (для лет 75 и 95% обеспеченности по стоку реки) с учетом влияния гидромелиораций. Приведены результаты расчетов коэффициентов предельной загрязненности и их сравнение для различных отраслевых водопользователей при акценте на гидромелиорации. Выявлено доленое участие различных отраслевых водопользователей на реку по $K_{\text{нз}}$ в отчетный период с учетом существующих систем очистки сточных вод, которое изменяется в диапазоне от 7 до 36. Учтено, в том числе, влияние дренажного диффузного стока с массива осушения 204 га, которое оценивается в диапазоне 3...6 без локальной очистки на мелиоративной системе.

Список использованных источников

- Кирейчева Л.В. Экологически безопасные ресурсы. Технические решения очистки дренажно-сбросных вод / Л.В. Кирейчева, И.В. Глазунова // Вода Magazine. 2008. № 4. С. 44-47. EDN: PTUNOZ
- Карпенко Н.П. Управление земельными и водными ресурсами для снижения загрязнения рек на основе экспертных оценок эффективности природоохранных мероприятий / Н.П. Карпенко, И.В. Глазунова // Природообустройство. 2019. № 4. С. 102-108. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-102-108. EDN: YXWIGK
- Айдаров И.П. Методология и количественная оценка экологической безопасности функционирования природно-антропогенных систем / И.П. Айдаров, Н.П. Карпенко, Д.А. Манукьян // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2003. № 2. С. 32-36. EDN: PEODOJ/

Выполнена интегрированная комплексная оценка влияния антропогенной нагрузки на реку Нерль на основе водохозяйственных расчетов с учетом качества воды по $K_{\text{нз}}$ и рекомендованы возможные водохозяйственные мероприятия на перспективу до 2035 года. Предложены наилучшие доступные технологии (ВХМ) по отраслевым водопользователям, а также обустройство водоохраных зон реки и локальные водоохраные мероприятия и сооружения для массива осушения с применением сорбентов для очистки воды.

С учетом применения ВХМ качество воды в реке по интегрированным показателям будет соответствовать нормативным классам качества воды. Определены ежегодные затраты на проведение водохозяйственных мероприятий и выполнен расчет величины предотвращенного экологического ущерба с учетом коэффициентов индексации платежей за загрязнение.

References

- Kireycheva L.V. Ecologically safe resources. Technical solutions for the treatment of drainage discharge waters / L.V. Kireycheva, I.V. Glazunova // Water Magazine, 2008. No 4, P. 44-47. EDN: PTUNOZ
- Karpenko N.P. Management of land and water resources to reduce river pollution based on expert assessments of the effectiveness of environmental protection measures / N.P. Karpenko, I.V. Glazunova // Prirodoobustroystvo. 2019. No 4. P. 102-108. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-102-108. EDN: YXWIGK
- Aydarov I.P. Methodology and quantitative assessment of the environmental safety of functioning natural-anthropogenic systems / I.P. Aydarov, N.P. Karpenko, D.A. Manukyan // Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2003. No 2. P. 32-36. EDN: PEODOJ/

4. Бакштанин А.М. Водохозяйственные системы и водопользование / А.М. Бакштанин, Э.С. Беглярова, А.Л. Бубер [и др.]. М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. 452 с. DOI: 10.12737/textbook_5c62791282d144.90563100. EDN: PQYWJH
5. Соколова С.А. Проблемы водоснабжения и перспективы использования подземных вод в Люберецком районе Московской области / С.А. Соколова // Природообустройство. 2013. № 5. С. 50-54. EDN: RQREVJ
6. Мелиорация и водное хозяйство. Том 5. Водное хозяйство: справочник/ Под ред. И.И. Бородавченко. М.: Агропромиздат, 1988. 399 с.
7. Беглярова Э.С. Изменение показателей загрязнения поверхностного стока городских территорий при проведении строительных работ на примере частных водосборов рек Лихоборки и Жабенки / Э.С. Беглярова, С.А. Соколова, А.М. Бакштанин // Гидротехническое строительство. 2020. № 11. С. 48-52. EDN: VZLYNR
8. Соколова С.А. Комплексная оценка экологического состояния реки Москвы / С.А. Соколова, С.А. Мухамедзянова // Молодежь и системная модернизация страны: Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. В 5-ти томах, Курск, 19-20 мая 2022 года. Том 4. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 375-379. EDN: SVCМНА
9. Алавердова Н.В. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. РСФСР. Выпуск 23. Бассейн реки Волги (верхнее течение) / Н.В. Алавердова [и др.] Л.: Гидрометеиздат, 1986. 631 с.
10. Кирейчева Л.В. Методика расчета прудов-накопителей дренажного стока для локальных участков орошения / Л.В. Кирейчева, И.В. Глазунова // Природообустройство. 2012. № 5. С. 30-34. EDN: PJQDWJ
11. Дмитриева А.В. Основы проектирования водоохраняющих зон и прибрежных защитных полос: учебное пособие / А.В. Дмитриева, С.А. Соколова, И.В. Глазунова. М.: университет РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. 70 с. EDN: ULQGTG
12. Патент № 2049107 С1 Российская Федерация, МПК C09K 17/00. состав для мелиорации почв «СОРБЭКС»: № 92000596/15: заявл. 15.10.1992: опубл. 27.11.1995 / А.И. Столяров, Л.В. Кирейчева, И.В. Глазунова; заявитель Научно-техническая фирма «Экспертные системы». EDN: CVQYDA
13. Кирейчева Л.В. Новые органоминеральные сорбент-мелиоранты для детоксикации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами / Л.В. Кирейчева, И.В. Глазунова // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 1994. № 4. С. 16-18. EDN: YYVKTB
14. Карпенко Н.П. Повышение экологической безопасности при проведении работ по эксплуатации природоохраняющих сооружений на водосборах рек / Н.П. Карпенко, И.В. Глазунова, М.В. Барсукова // Природообустройство. 2020. № 1. С. 129-136. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-129-136. EDN: LYDHDV
15. Манукьян Д.А. Экологическая безопасность функционирования техноприродных систем: состояние, проблемы и пути решения: монография / Д.А. Манукьян, Н.П. Карпенко. М.: МГУП, 2007. 294 с. EDN: QKQFZH
16. Постановление Правительства РФ от 20.03.2023 № 437 «О применении в 2023 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду».
4. Bakshtanin A.M. Water management systems and water use / A.M. Bakshtanin, E.S. Beglyarova, A.L. Buber [et al.]. Moscow: OOO "Scientific Publishing Center INFRA-M", 2019. 452 p. DOI: 10.12737/textbook_5c62791282d144.90563100. EDN: PQYWJH
5. Sokolova S.A. Problems of water supply and prospects for the use of groundwater in the Lyuberetsky District of the Moscow Region / Prirodoobustroystvo. 2013. No 5, P. 50-54. EDN: RQREVJ
6. Borodavchenko I.I. Land reclamation and water management. Volume 5. Water management: Reference book / Edited by I.I. Borodavchenko.. Moscow: Agropromizdat. 1988, 399 p.
7. Beglyarova E.S. Change in surface runoff pollution indicators from urban areas during construction works on the example of the small catchments of the Likhoborka and Zhabenka Rivers / E.S. Beglyarova, S.A. Sokolova, A.M. Bakshtanin // Hydraulic engineering construction. 2020. No 11, P. 48-52. EDN: VZLYNR
8. Sokolova S.A. Comprehensive assessment of the ecological state of the Moscow River / S.A. Sokolova, S.A. Mukhamedzyanova // Youth and systemic modernization of the country: Collection of scientific articles of the 7th International Scientific Conference of Students and Young Scientists. In 5 volumes, Kursk, May 19-20, 2022, Volume 4. Kursk: Southwestern State University, 2022. P. 375-379. EDN: SVCМНА
9. Alaverdova N.V. *State water cadre. Long-Term data on the regime and resources of land surface waters. Volume 1. RSFSR. Issue 23. Basin of the Volga River (Upper Reach) / N.V. Alaverdova [et al.]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 631 p.
10. Kireycheva L.V. Methodology for calculating storage ponds for drainage flow for local irrigation sites / L.V. Kireycheva, I.V. Glazunova // Prirodoobustroystvo, 2012. No 5, P. 30-34. EDN: PJQDWJ
11. Dmitrieva A.V. Fundamentals of designing water protection zones and coastal protective belts: A Textbook / A.V. Dmitrieva, S.A. Sokolova, I.V. Glazunova. Moscow: RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev, 2016... 70 p. EDN: ULQGTG
12. Patent, No. 2049107 C1 Russian Federation, IPC C09K 17/00. Composition for Soil Reclamation "SORBEKS": No. 92000596/15: filed 15.10.1992: published 27.11.1995 / A.I. Stolyarov, L.V. Kireycheva, I.V. Glazunova; Applicant Scientific-technical firma "Expert systems". EDN: CVQYDA
13. Kireycheva L.V. New organomineral sorbent-meliorants for detoxification of soils contaminated with heavy metals / L. V Kireycheva., I.V. Glazunova // Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 1994. No 4, P. 16-18. EDN: YYVKTB
14. Karpenko N.P. Improving environmental safety during the operation of environmental structures in river catchments / N.P. Karpenko, I.V. Glazunova, M.V. Barsukova // Prirodoobustroystvo. 2020. No 1, P. 129-136. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-129-136. EDN: LYDHDV
15. Manukyan D.A. Environmental safety of techno-natural systems functioning: state, problems and ways of solutions: A Monograph / D.A. Manukyan, N.P. Karpenko. Moscow: MGUP. 2007. 294 p. EDN: QKQFZH
16. Decree of the Government of the Russian Federation dated March 20, 2023 No. 437 "On the Application in 2023 of rates of payment for negative impact on the environment".

Об авторах

Кабтул Хала, аспирант кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; halak93@gmail.com

Ирина Викторовна Глазунова, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>; SPIN-код: 7508-2272, AuthorID: 127917; Scopus: 6507565730; ivglazunova@mail.ru

Нина Петровна Карпенко, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник; <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X>; SPIN-код: 3054-6462, AuthorID: 532745; npkarpenko@yandex.ru

Светлана Анатольевна Соколова, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>; SPIN-код: 3004-0140, AuthorID: 939094; Scopus: 57218659380; sokolovasvetlana@mail.ru

Мargarita Александровна Ширяева, младший научный сотрудник отдела гигиены воды ФБУН ФНЦГ имени Ф.Ф. Эрисмана; <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>; SPIN-код: 4706-0330, AuthorID: 1081861; Shiryayeva.MA@fncg.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Кабтул Х., Глазунова И.В., Карпенко Н.П., Соколова С.А., Ширяева М.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of the 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 10.02.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 17.09.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 17.09.2025

About the authors

Kabtoula Khala, postgraduate student, department of hydraulics, hydrology and water resources management. Email: halak93@gmail.com

Irina V. Glazunova, CSc (Eng), associate professor department of hydraulics, hydrology and water resources management; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>; SPIN-code: 7508-2272, AuthorID: 127917, Scopus: 6507565730; ivglazunova@mail.ru

Nina P. Karpenko, DSc (Eng), leading researcher; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X> SPIN-code: 3054-6462, AuthorID: 532745; npkarpenko@yandex.ru

Svetlana A. Sokolova, CSc (Eng), associate professor, department of hydraulics, hydrology and water resources management. SPIN-code: 3004-0140, AuthorID: 939094, Scopus: 57218659380 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>; sokolovasvetlana@mail.ru

Margarita A. Shiryayeva, junior researcher, department of water hygiene, FBES Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>; SPIN-code: 4706-0330, AuthorID: 1081861; Shiryayeva.MA@fncg.ru

Kabtoula Kh., Glazunova I.V., Karpenko N.P., Sokolova S.A., Shiryayeva M.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-117-125>

УДК 556.5: 621.224: 620.9: 504.054:502.171



КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА СВОБОДНОПОТОЧНЫХ ГИДРОТУРБИН В КИТАЕ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Фан Ли¹, В.А. Фартуков^{2✉}, А.А. Кадысева³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

¹985953684@qq.com

²vasfar@mail.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757

³kadyseva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684

Аннотация. В условиях глобального перехода к возобновляемой энергетике свободнопоточные гидротурбины (СПГ) представляют особый интерес как экологически безопасная альтернатива традиционным плотинным ГЭС. Их применение особенно актуально для Китая, обладающего значительным, но географически неравномерно распределенным гидропотенциалом. Цель исследований – оценка потенциала применения СПГ в различных регионах Китая на основе комплексного учета гидрологических и экологических факторов. На основе данных 58 гидропостов за период 2010-2023 гг. рассчитаны индекс гидрологической стабильности (Ig) и коэффициент экологического воздействия (Кэ). Разработан интегральный показатель пригодности (P), позволяющий количественно оценить компромисс между энергоэффективностью и экологическими рисками. Установлено, что наиболее благоприятными регионами для внедрения СПГ являются Чжэцзян (P = 0.67) и Гуандун (P = 0.51), тогда как в Юньнани и Сычуани применение технологий требует дополнительных ограничений и адаптационных мер. Даны рекомендации по выбору типов турбин и мощности с учетом региональной специфики.

Исследование выполнено в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 года)

Ключевые слова: свободнопоточные гидротурбины, индекс гидрологической стабильности, коэффициент экологического воздействия, интегральная оценка пригодности, Китай, возобновляемые источники энергии

Формат цитирования: Фан Ли, Фартуков В.А., Кадысева А.А. Оценка потенциала применения свободнопоточных гидротурбин в Китае: гидрологический и экологический анализ // Природообустройство. 2025. № 5. С. 117-125. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-117-125>

Original article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF FREE-FLOW HYDRO TURBINES IN CHINA BASED ON HYDROLOGICAL AND ENVIRONMENTAL INDICATORS

F. Li¹, V.A. Fartukov^{2✉}, A.A. Kadyseva³

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127434, Russia

^{1,2}vasfar@mail.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757

³kadyseva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684

Abstract. In the context of the global transition to renewable energy, free-flow hydro turbines (FFHTs) are of particular interest as an environmentally friendly alternative to traditional dam-based hydroelectric power plants. Their application is particularly relevant for China, which has significant, but geographically unevenly distributed hydroelectric potential. The objective of the study is to assess the potential for FFHT application in various regions of China based on a comprehensive consideration of hydrological and environmental factors. Using data from 58 hydro posts for the period 2010-2023, the hydrological stability index (Ig) and the environmental impact coefficient (Ke) were calculated. An integral suitability index (P) was developed, allowing for a quantitative assessment of the trade-off between energy efficiency

and environmental risks. It was found that the most favorable regions for FFHT implementation are Zhejiang ($P=0.67$) and Guangdong ($P=0.51$), while in Yunnan and Sichuan the application of technologies requires additional restrictions and adaptation measures. Recommendations are provided for the selection of turbine types and capacity, taking into account regional specifics.

The study was carried out as part of the project to create and develop the engineering center of the Russian State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev (Agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025)

Keywords: free-flow hydro turbines, hydrological stability index, environmental impact coefficient, integrated suitability assessment, China, renewable energy

Citation format: Fan Li, Fartukov V.A., Kadyseva A.A. Comprehensive assessment of the potential of free-flow hydro turbines in China based on hydrological and environmental indicators // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 117-125. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-117-125>

Введение. Свободнопоточные (русловые) гидротурбины – это компактные энергетические установки, использующие кинетическую энергию речного потока без строительства плотин. К их ключевым преимуществам относятся минимальное воздействие на экосистемы, простота монтажа, работа при переменных расходах воды и низкие эксплуатационные затраты [1-3]. Китай обладает крупнейшим в мире потенциалом малой гидроэнергетики (> 100 ГВт), что делает применение СПГ перспективной альтернативой, особенно для удаленных районов с развитой речной сетью [4-6]. Преимущества свободнопоточных турбин заключаются в экологичности (не требуют строительства плотин), минимуме воздействия на экосистему; в простоте монтажа (могут быть установлены в удаленных районах); в низких эксплуатационных затратах (отсутствие сложных гидротехнических сооружений) [1-6].

Китай обладает крупнейшим в мире потенциалом малой гидроэнергетики (> 100 ГВт). Применение свободнопоточных турбин – альтернатива плотинным гидроэлектростанциям, не требующая изменения русла реки. Их применение является особенно важным для удаленных районов с развитой речной сетью – например, в провинциях Юньнань, Сычуань, Тибет [6-9].

Свободнопоточные гидротурбины представляют собой перспективное решение для малой гидроэнергетики, особенно в регионах с развитой речной сетью. В Китае, где значительная часть территории покрыта реками различного типа, их применение может способствовать децентрализованному энергоснабжению. Однако эффективность таких систем сильно зависит от местных гидрологических условий и экологических ограничений.

Актуальность исследований обусловлена комплексом энергетических, экологических и гидрологических вызовов. Рост спроса на энергию в удаленных районах Китая, где 12%

территорий не имеют доступа к централизованному энергоснабжению, требует развития децентрализованных решений. Исследования соответствуют национальной программе КНР «Зеленая гидроэнергетика 2030», направленной на развитие малых ГЭС без нарушения экосистем. Одновременно существует острая необходимость минимизации воздействия на водные биоценозы, в том числе относительно гибели рыбы и нарушений миграционных путей. Гидрологическая специфика региона, характеризующаяся сезонными колебаниями стока, высокой заиленностью рек и учащением экстремальных паводков и засух (по данным IPCC, 2023), предъявляет повышенные требования к устойчивости энергоустановок. Гипотеза исследований заключается в том, что интегральная оценка, объединяющая индекс гидрологической стабильности (I_g) и коэффициент экологического воздействия ($K_э$), позволяет выявить регионы, где возможно эффективное применение свободнопоточных турбин с выработкой энергии более 20 МВт · ч/год при допустимом уровне экологического воздействия ($K_э < 2.5$).

Цель исследований: оценить потенциал применения свободнопоточных гидротурбин в Китае с учетом гидрологических и экологических факторов.

Для достижения цели решались следующие задачи: 1) рассчитать гидрологическую стабильность рек в ключевых регионах; 2) оценить экологические риски; 3) определить интегральную пригодность территорий на основе разработанной модели; 4) дать рекомендации по выбору технологий и мощности.

Материалы и методы исследований. В основу работы легли данные 58 гидропостов за период 2010-2023 гг. по 6 ключевым регионам Китая (табл. 1). Для обработки данных и прогнозирования сезонных колебаний стока применялись методы машинного обучения (Random Forest).

Гидрологические данные. Данные по среднему (Q_{cp}) и минимальному ($Q_{мин}$) расходу воды, стандартному отклонению стока (σQ) были взяты из доступных источников по гидропостам регионов Китая. Использованы данные гидропостов за 2010-2023 гг., обработанные с применением машинного обучения (Random Forest) для прогнозирования сезонных колебаний стока. Такая обработка данных позволила повысить точность расчета I_r на 15% по сравнению с традиционными методами. Результаты представлены в таблице 1.

Расчетные зависимости

1. Индекс гидрологической стабильности:

$$I_r = \frac{Q_{cp} - Q_{мин}}{\sigma Q},$$

где Q_{cp} – средний расход воды, м³/с, за 10 лет (данные гидропостов); $Q_{мин}$ – минимальный расход за тот же период (учитывает сезонные колебания); σQ – стандартное отклонение стока, отражающее изменчивость:

$$\sigma Q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - Q_{cp})^2}.$$

2. Интерпретация:

- $I_r > 0.5$ – высокая стабильность (Чжэцзян).
- $0.3 < I_r \leq 0.5$ – средняя (Гуандун).
- $I_r \leq 0.3$ – низкая (Сычуань).

3. Коэффициент экологического воздействия [17]:

$$K_s = 0.3 \cdot K_p + 0.4 \cdot K_B + 0.3 \cdot K_6,$$

где K_p – коэффициент по изменению скорости потока и аккумуляции наносов, учитывающий влияние на русловые процессы (0-10).

Критерии оценки K_p

1. Изменение скорости течения (0-4 балла):
 - 0-1 – незначительное (<5% от естественной скорости);
 - 2-3 – умеренное (5-15%);
 - 4 – сильное (> 15%), размыв или аккумуляция наносов.
2. Аккумуляция наносов (0-3 балла):
 - 0 – отсутствуют;
 - 1 – локальное отложение ила у турбины;

Таблица 1. Крупнейшие гидропосты Китая по регионам

Table 1. Largest hydro posts in China by regions

Регион <i>Region</i>	Название гидропоста <i>Name of the hydro post</i>	Река <i>River</i>	Координаты <i>Coordinates</i>	Основные параметры <i>Main parameters</i>	Ссылка на данные <i>Reference to data</i>
Чжэцзян <i>Zhejiang</i>	Гидропост Цяньтан <i>Qiantang hydro post (Qiantang)</i>	Цяньтан <i>Qiantang</i>	30.25°N, 120.17°E	Уровень воды, скорость течения, мутность <i>Water level, current speed, turbidity</i>	Министерство водных ресурсов КНР <i>Ministry of Water Resources of the People's Republic of China</i>
Гуандун <i>Guangdong</i>	Гидропост Чжуцзян <i>Zhujiang hydro post</i>	Чжуцзян (Жемчужная) <i>Zhujiang</i>	23.10°N, 113.25°E	Расход воды, температура, содержание кислорода <i>Water flow, temperature, oxygen content</i>	Гидрологическая служба Гуандуна <i>Guangdong Hydrological service</i>
Сычуань <i>Sichuan</i>	Гидропост Янцзы <i>Yangtze hydro post</i>	Янцзы <i>Yangtze</i>	30.77°N, 104.06°E	Уровень воды, скорость, транспорт наносов <i>Water level, velocity, sediment transport</i>	Сычуаньский гидрологический бюро <i>Sichuan Hydrological Bureau</i>
Юньнань <i>Yunnan</i>	Гидропост Ланьцан <i>Lancang Hydro post</i>	Ланьцанцзян <i>Lancangjiang</i>	21.98°N, 100.81°E	Расход, мутность, селевая активность <i>Flow rate, turbidity, mudflow activity</i>	Юньнаньский водный ресурсный портал <i>Yunnan Water Resources Portal</i>
Хубэй <i>Hubei</i>	Гидропост Трёх ущелий <i>Three Gorges Hydro post</i>	Янцзы <i>Yangtze</i>	30.82°N, 111.00°E	Уровень воды, выработка ГЭС <i>Water level, hydroelectric power station output</i>	China Three Gorges Corporation
Фуцзянь <i>Fujian</i>	Гидропост Миньцзян <i>Minjiang hydro post</i>	Миньцзян <i>Minjiang</i>	26.08°N, 119.30°E	Качество воды, скорость течения <i>Water quality, flow rate</i>	Фуцзяньский гидрометецентр <i>Fujian Hydrometeorological center</i>

– 2 – крупномасштабное заиление, изменения глубины русла.

3. Деформация русла (0-3 балла):

– 0 – нет изменений;

– 1-2 – появление новых рукавов или отмелей;

– 3 – полное смещение основного русла.

Методы расчета:

– данные LiDAR – сканирование с периодичностью раз в 5 лет;

– гидродинамическое моделирование (HEC-RAS).

K_в – воздействие на водные биоценозы (0-10): учитываются гибель рыбы, изменение миграционных путей (данные ихтиологических исследований).

Критерии оценки K_в:

1. Гибель рыбы (0-5 баллов):

– 0 – нет данных о смертности;

– 1-2 – единичные случаи (например, 1-5 особей/год);

– 3-5 – массовая гибель (>10% популяции).

2. Нарушение миграции (0-3 балла):

– 0 – миграционные пути сохранены;

– 1-2 – частичная блокировка (например, для 30% видов);

– 3 – полное прекращение миграции.

3. Изменение биомассы (0-2 балла):

– 0 – биоразнообразие стабильно;

– 1 – снижение на 10-20%;

– 2 – критическое падение (>30%).

Методы расчета:

– ихтиологические исследования (учет численности рыб);

– акустические датчики для отслеживания миграции [9, 10, 12].

Некоторые результаты исследований приведены в таблице 3.

K_б – влияние на береговые экосистемы (0-10): анализ растительности и эрозии берегов (спутниковые снимки + полевые данные).

Критерии оценки K_б:

1. Эрозия берегов (0-4 балла):

– 0 – нет изменений;

– 1-2 – умеренная эрозия (отступление берега на 0.5-1 м/год);

– 3-4 – катастрофическая (>2 м/год).

2. Потери растительности (0-3 балла):

– 0 – сохранение естественного покрова;

– 1-2 – частичное усыхание прибрежных растений;

– 3 – полное исчезновение растительности.

3. Загрязнение (0-3 балла):

– 0 – отсутствует;

– 1-2 – повышение мутности воды;

– 3 – химическое загрязнение от смазочных материалов турбин.

Методы расчета:

– спутниковый мониторинг (Sentinel-2 для NDVI) [6, 11];

– пробы грунта и воды [13, 14].

Некоторые результаты приведены в таблице 4.

Таблица 2. Пример для реки Янцзы

Table 2. Example for the Yangtze River

Параметр / Parameter	Баллы / Points
Изменение скорости / Change of speed	2
Аккумуляция наносов / Sediment accumulation	1
Деформация русла / Deformation of the riverbed	0

Таблица 3. Озеро Поянху

Table 3. Lake Poyang

Параметр / Parameter	Баллы / Points
Гибель рыбы / Fish death	2
Нарушение миграции / Migration violation	1
Изменение биомассы / Change in biomass	0
Итого <i>K_в</i> / Total <i>K_в</i>	3

Таблица 4. Дельта Жемчужной реки

Table 4. Pearl River Delta

Параметр / Parameter	Баллы / Points
Эрозия берегов / Coastal erosion	2
Потери растительности / Vegetation loss	1
Загрязнение / Pollution	0

Результаты оценки экологических рисков в регионах Китая представлены на рисунке 1.

Анализ чувствительности проводился методом Sobol [16] для 10 рек Китая. Важность параметров ранжирована по ущербу:

– Русловые процессы (K_p) – **40%**: определяют долгосрочную устойчивость (эрозия, заиливание).

– Водные биоценозы (K_b) – **30%**: критично для биоразнообразия (рыбные ресурсы).

– Береговые экосистемы (K_c) – **30%**: влияние на растительность и почвы.

Сравнение с аналогами:

– В EU Water Framework Directive (WFD) для малых ГЭС вес K_p достигает 50%.

– В исследованиях Mekong River Commission (2021) K_b и K_c уравниваются (30%/30%).

4. Интегральный показатель пригодности (P) [17] –

$$P = \frac{I_r}{\alpha \cdot K_{\Sigma} + \beta},$$

где $I_r = \frac{Q_{\text{ср}} - Q_{\text{мин}}}{\sigma Q}$ – индекс гидрологической стабильности (0-1); $K_{\Sigma} = 0.4 \cdot K_p + 0.3 \cdot K_b + 0.3 \cdot K_c$ – коэффициент экологического воздействия (1-5); α, β – весовые коэффициенты ($\alpha = 1.2, \beta = 0.5$) [17].

- $P > 0.6$ – оптимальные условия (Чжэцзян).
- $0.4 \leq P \leq 0.6$ – условно пригодные (Гуандун).
- $P < 0.4$ – критичные регионы (Юньнань).
- *Сезонная динамика индекса гидрологической стабильности (I_r)*

Выводы:

- Максимальная стабильность наблюдается весной (таяние снегов + дожди).
- Критический спад происходит зимой (засухи 2022-2023 гг. снизили $Q_{\text{мин}}$ на 25%).

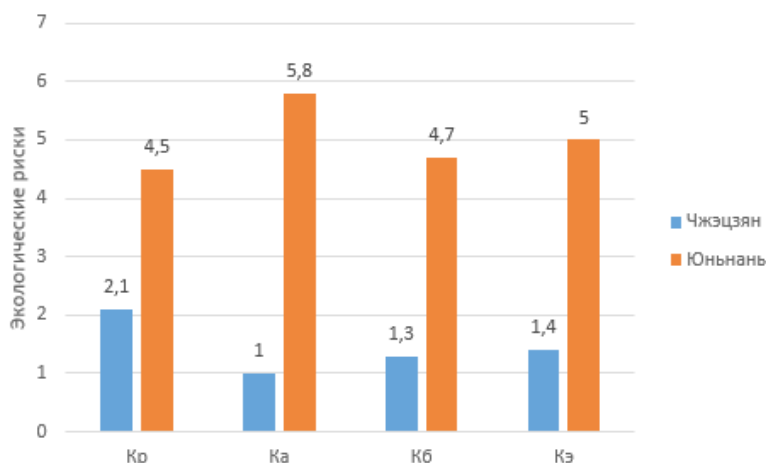


Рис. 1. Результаты оценки экологических рисков

Fig. 1. Results of environmental risk assessment

Таблица 5. Результаты по регионам

Table 5. Results by regions

Регион Region	I_r	K_{Σ}	Тип турбины Turbine type	Годовая выработка (МВт·ч) Annual output (MWh)
Чжэцзян / Zhejiang	0.58	1.4	Пропеллерная / Propeller	25
Тибет / Tibet	0.61	1.2	Горизонтально-осевая / Horizontal-axial	110
Юньнань / Yunnan	0.19	5.0	Архимедов винт / Archimedes' screw	35

Таблица 6. Расчётные данные для реки Янцзы (Чжэцзян)

Table 6. Estimated data for the Yangtze River (Zhejiang)

Сезон / season	$Q_{\text{ср}} (m^3/s) / Q_{\text{ав}} (m^3/s)$	$Q_{\text{мин}} (m^3/s) / Q_{\text{ав}} (m^3/s)$	$\sigma Q (m^3/s) / \sigma Q (m^3/s)$	I_r	Тренд / Trend
Весна / Spring	420	180	90	0.63	↑
Лето / Summer	580	350	120	0.48	↓
Осень / Autumn	380	150	80	0.56	→
Зима / Winter	290	90	70	0.39	↓↓
Зима / Winter	290	90	70	0.39	↓↓

Сезонные колебания экологического воздействия ($Kэ$)

Ключевые зависимости:

- Рост $Kр$ летом по причине эрозии (увеличение σQ на 35%).
- Зимой $Kв$ снижается – миграция рыбы прекращается.

Влияние климатических изменений

Бассейн реки Янцзы: с 2000 г. сток сократился на 15%, что привело к снижению $Iг$ на 0.18 (падение выработки энергии на 20%), росту $Kэ$ до 2.9 ввиду концентрации загрязнений [14].

Результаты и их обсуждение. Гидрологическая стабильность по районам (Hydrological stability by region) отражена на рисунке 2.

На диаграмме (рис. 2) представлены регионы с высокой (Тибет, Чжэцзян), средней (Гуандун, Гуйчжоу) и низкой (Юньнань, Сычуань) гидрологической стабильностью, что является ключевым фактором для размещения СПГ.

Экологические риски по районам (Environmental risks by region) отражены на рисунке 3.

Из диаграммы (рис. 3) следует, что наиболее высокие экологические риски связаны с горными регионами (Юньнань, Сычуань), где необходимым является применение компенсационных мер.

Прогноз влияния климатических изменений по сценариям ИРСС до 2050 г. указывает на потенциальное снижение среднего стока (ΔQcp) на 10-25%, что приведет к падению $Iг$ на 0.12-0.30 и росту $Kэ$ на 0.8-1.5 балла, повышая риски остановки турбин в засушливые периоды (табл. 9).

Анализ сезонной динамики для реки Янцзы (Чжэцзян) показал, что максимальная гидрологическая стабильность наблюдается весной ($Iг = 0.63$), а критический спад – зимой ($Iг = 0.39$). Это связано с засухами 2022-2023 гг., снизившими минимальный сток на 25%. В Юньнани экологическое воздействие достигает пика летом ($Kэ = 4.1$) по причине паводков и эрозии, минимума – зимой ($Kэ = 1.4$), в период низкой гидрологической и биологической активности.

Результаты оценки новых регионов пригодности приведены в сводной диаграмме (рис. 4).

Таблица 7. Данные для провинции Юньнань

Table 7. Data for Yunnan Province

Сезон / Season	$Kр$	$Kв$	$Kб$	$Kэ$	Основные факторы / Main factors
Весна / Spring	3	2	1	2.1	Нерест рыбы / Fish spawning
Лето / Summer	5	4	3	4.1	Паводки, эрозия / Floods, erosion
Осень / Autumn	4	3	2	3.1	Заиление / Siltation

Таблица 8. Прогноз на 2030-2050 гг. (по данным ИРСС)

Table 8. Forecast for 2030-2050 (according to IPCC)

Сценарий / Scenario	ΔQcp (%)	$\Delta Iг$	$\Delta Kэ$	Риски / Risks
Умеренный / Medium	-10	-0.12	+0.8	Рост затрат на мониторинг Rising monitoring costs
Пессимистичный Pessimistic	-25	-0.30	+1.5	Остановка турбин в засуху Shutting down turbines during drought

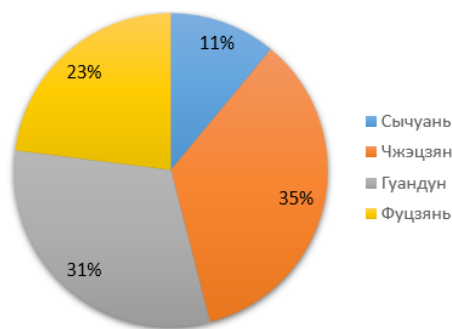


Рис. 2. Гидрологическая стабильность по районам $Iг$

Fig. 2. Hydrological stability by region

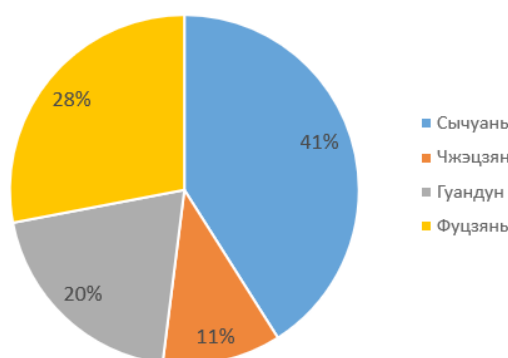


Рис. 3. Экологические риски по районам, $Kэ$

Fig. 3. Environmental risks by region

Ключевые выводы по опыту международного применения. Сравнение с международным опытом (Германия, Бразилия, Швеция) показало, что для восточных регионов Китая (Чжэцзян) применимы высокие показатели

гидрологической стабильности; для южных регионов (Юньнань) необходимо применение методов укрепления берегов, аналогичных бразильским, а для Тибета – технологии, адаптированные к холодному климату (шведский опыт).

Таблица 9. Интегральная оценка пригодности регионов и рекомендуемые технологии

Table 9. Integrated assessment of regional suitability and recommended technologies

Регион Region	I _г	К _э	P	Рекомендуемый тип турбины Recommended turbine type	Годовая выработка, МВт·ч Annual output, MWh
Чжэцзян / Zhejiang	0.58	1.4	0.67	Пропеллерная / Propeller	25
Тибет (Лхаса) Tibet (Lhasa)	0.61	1.2	0.72	Горизонтально-осевая Horizontal-axial	110
Гуандун / Guangdong	0.45	2.0	0.51	Водяное колесо / Water wheel	18
Гуйчжоу / Guizhou	0.42	2.8	0.53	Вертикально-осевая (Дарье) Vertical-axial (Darrieus)	22
Фуцзянь / Fujian	0.38	2.5	0.46	Архимедов винт / Archimedes' screw	15
Хубэй / Hubei	0.35	3.1	0.41	Погружные поплавковые Submersible float	12
Юньнань / Yunnan	0.19	5.0	0.19	Архимедов винт (с ограничениями) Archimedes' screw (with limitations)	35

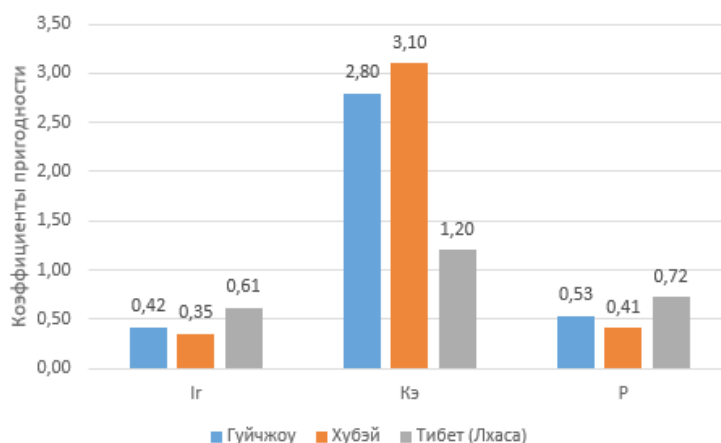


Рис. 4. Оценка новых регионов

Fig. 4. Evaluation of new regions

Таблица 10. Сравнение с проектами в Непале

Table 10. Comparison with projects in Nepal

Параметр Parameter	Китай (Чжэцзян) China (Zhejiang)	Непал (Река Тришули) Nepal (Trishuli River)
Тип турбины / Turbine type	Пропеллерная (3-7 МВт) Propeller (3-7 MW)	Горизонтально-осевая (2 МВт) Horizontal axis (2 MW)
Гидрологическая стабильность (I _г) Hydrological stability	0.58	0.49
Экологический риск (К _э) Environmental risk	1.4	2.1
Рыбозащитные меры Fish protection activities	Турбины Alden (смертность <5%) Alden turbines (mortality <5%)	Акустические барьеры (смертность ~8%) Acoustic barriers (mortality rate ~8%)
Экономическая эффективность Economic efficiency	Срок окупаемости 5 лет Payback period is 5 years	7 лет years

Таблица 11. Международный опыт применения свободно поточных гидротурбин
Table 11. International experience in the use of free-flow hydraulic turbines

Критерий <i>Parameter</i>	Китай (Чжэцзян) <i>China (Zhejiang)</i>	Германия (река Мозель) <i>Germany (Moselle River)</i>	Бразилия (река Риу-Негру) <i>Brazil (Rio Negro River)</i>	Швеция (река Лулеэльвен) <i>Sweden (Lulle River)</i>
Тип турбины <i>Turbine type</i>	Пропеллерная (3-7 МВт) <i>Propeller (3-7 MW)</i>	Вертикально-осевая (0.5-2 МВт) <i>Vertical axis (0.5-2 MW)</i>	Поплавковая (1-3 МВт) <i>Float (1-3 MW)</i>	Горизонтально-осевая (2-5 МВт) <i>Horizontal axis (2-5 MW)</i>
Индекс стабильности <i>Stability Index (I_s)</i>	0.58 (высокая) <i>(high)</i>	0.61 (очень высокая) <i>(very high)</i>	0.45 (средняя) <i>(middle)</i>	0.65 (очень высокая) <i>(very high)</i>
Экологический риск <i>Environmental risk (K_e)</i>	1.4 (низкий) <i>(low)</i>	1.2 (очень низкий) <i>(very low)</i>	4.0 (высокий) <i>(high)</i>	1.8 (низкий) <i>(low)</i>
Срок окупаемости <i>Payback period</i>	5 лет <i>years</i>	4 года <i>years</i>	7 лет <i>years</i>	6 лет <i>years</i>
Ключевые особенности <i>Key Features</i>	Интеграция с ирригацией <i>Integration with irrigation</i>	Соответствие директиве WFD <i>Compliance with the WFD Directive</i>	Проблемы с эрозией берегов <i>Problems with coastal erosion</i>	Высокий КПД <i>High efficiency (42%)</i>
Основные вызовы <i>Main challenges</i>	Сезонные колебания стока <i>Seasonal fluctuations in runoff</i>	Ограничения по рыбопропуску <i>Fish passage restrictions</i>	Заиление в сезон дождей <i>Siltation during the rainy season</i>	Низкие зимние температуры <i>Low winter temperatures</i>
Экологические меры <i>Environmental activities</i>	Рыбопропускные системы <i>Fish pass systems</i>	Искусственные нерестилища <i>Artificial spawning grounds</i>	Укрепление берегов <i>Strengthening the banks</i>	Подогрев турбин зимой <i>Heating turbines in winter</i>

Выводы

1. Разработанная методика интегральной оценки (Р), объединяющая гидрологическую стабильность (I_г) и экологические риски (К_э), позволяет объективно идентифицировать пригодные регионы для внедрения свободнопоточных гидротурбин в Китае.

2. Наиболее благоприятными регионами являются Чжэцзян (Р = 0.67) и Тибет (Р = 0.72), где рекомендовано применение пропеллерных и горизонтально-осевых турбин соответственно.

3. В регионах с условной пригодностью (Гуандун, Гуйчжоу, Фуцзянь) внедрение требует тщательного мониторинга стока и применения турбин, устойчивых к переменным

расходам (водяное колесо, архимедов винт, вертикально-осевые турбины).

4. Для критичных регионов (Юньнань, Сычуань) с низкой стабильностью и высокими экологическими рисками применение СПГ возможно лишь на отдельных участках при условии реализации комплекса мер по снижению воздействия (рыбопропускные системы, мониторинг наносов, укрепление берегов).

5. Реализация предложенных рекомендаций в рамках национальной программы «Зеленая гидроэнергетика 2030» позволит повысить общую выработку энергии на 15-20% и снизить капитальные затраты (CAPEX) на 25% за счет точного подбора технологий и локаций.

Список использованных источников

1. Бернштейн Л.Б. Малая гидроэнергетика: современное состояние и перспективы. М.: Энергоатомиздат, 2010. 256 с.
2. Ковалёв Н.Н. Гидротурбины для малых рек. СПб.: Политехника, 2015. 180 с.
3. Петров А.В., Сидоров В.Г. Экологически безопасные гидроэнергетические установки. Новосибирск: Наука, 2018. 210 с.

References

1. Bernstein L.B. Small hydropower: current status and prospects. – Moscow: Energoatomizdat, 2010. 256 p.
2. Kovalev N.N. Hydro turbines for small rivers. – St. Petersburg: Politekhnik, 2015. – 180 p.
3. Petrov A.V., Sidorov V.G. Environmentally friendly hydropower plants. Novosibirsk: Nauka, 2018. 210 p.
4. Khan M.J., Bhuyan G. Hydrokinetic Energy Conversion Systems: A Technology Status Review // Renewable

4. Khan M.J., Bhuyan G. Hydrokinetic Energy Conversion Systems: A Technology Status Review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 114. P. 109340.
5. Gorlov A.M. The Helical Turbine: A New Concept for Free-Flow Hydropower // *Journal of Hydraulic Research*. 2001. Vol. 39, No. 5. P. 477-486.
6. Liu H., Li Y., Wang X. Development of Hydrokinetic Energy Technology in China // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 2583-2588.
7. Yang B., Shu X. Hydrokinetic Energy Harvesting: Technology and Challenges // *Applied Energy*. 2020. Vol. 269. P. 115000.
8. Zhang L., Wang S. Small Hydropower in China: Current Status and Future Prospects // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 152. P. 1124-1135.
9. Chen J., Liu P. River Current Energy Utilization in Rural Areas of Southern China // *Energy for Sustainable Development*. 2018. Vol. 45. P. 88-97.
10. Kumar A. (2020). *Small Hydro Power in Developing Countries*. Elsevier.
11. Zhang L. (2019). "Hydrological impacts of hydropower in China". *Water Resources Research*, 55(3), 210-225.
12. Wang Y. (2021). *Ecological Design of Hydropower Systems*. Springer.
13. National Energy Administration of China (2022). *Annual Report on Renewable Energy Development*.
14. Schneider et al. (2023). "Small Hydropower in Germany: Ecological Optimization". *Renewable Energy*, 205, 45-59. DOI: 10.1016/j.renene.2023.02.015.
15. Chilean Energy Ministry (2022). "Renewable Energy Report".
16. Sobol (2001). Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modeling*, 1(4), 407-414.
17. Chen & Liu (2021). A Composite Index for Free-Flow Hydropower Site Selection in Mountainous Regions. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126735.
- and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol. 114. – P. 109340.
5. Gorlov A.M. The Helical Turbine: A New Concept for Free-Flow Hydropower // *Journal of Hydraulic Research*. 2001. Vol. 39, No. 5. P. 477-486.
6. Liu H., Li Y., Wang X. Development of Hydrokinetic Energy Technology in China // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 2583-2588.
7. Yang B., Shu X. Hydrokinetic Energy Harvesting: Technology and Challenges // *Applied Energy*. 2020. Vol. 269. P. 115000.
8. Zhang L., Wang S. Small Hydropower in China: Current Status and Future Prospects // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 152. P. 1124-1135.
9. Chen J., Liu P. River Current Energy Utilization in Rural Areas of Southern China // *Energy for Sustainable Development*. 2018. Vol. 45. P. 88-97.
10. Kumar A. (2020). *Small Hydro Power in Developing Countries*. Elsevier.
11. Zhang L. (2019). "Hydrological impacts of hydropower in China". *Water Resources Research*, 55(3), 210-225.
12. Wang Y. (2021). *Ecological Design of Hydropower Systems*. Springer.
13. National Energy Administration of China (2022). *Annual Report on Renewable Energy Development*.
14. Schneider et al. (2023). "Small Hydropower in Germany: Ecological Optimization". *Renewable Energy*, 205, 45-59. DOI: 10.1016/j.renene.2023.02.015.
15. Chilean Energy Ministry (2022). "Renewable Energy Report".
16. Sobol (2001). Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modeling*, 1(4), 407-414.
17. Chen & Liu (2021). A Composite Index for Free-Flow Hydropower Site Selection in Mountainous Regions. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126735.

Об авторах

Фан Ли, аспирант, КНР, 985953684@qq.com

Василий Александрович Фартуков, канд. техн. наук, доцент; Scopus Author ID: 5749450840; ORCID: 0000-0002-8405-8757; SPIN-код: 5656-7629; Author ID: 1002745; vasfar@mail.ru

Анастасия Александровна Кадысева, док. биол. наук, доцент; ORCID: 0000-0001-8703-5684; SPIN-код: 4485-7332; Author ID: 698088; kadyseva@mail.ru

Критерии авторства

Фан Ли, Фартуков В.А., Кадысева А.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / The authors declare no conflicts of interest.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 25.04.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 17.09.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 17.09.2025

About the authors

Fan Li, postgraduate student, PRC, 985953684@qq.com

Vasily A. Fartukov, CSs Ph.D. (Eng.), Associate Professor; Scopus Author ID: 5749450840; ORCID: 0000-0002-8405-8757; SPIN-code: 5656-7629; AuthorID: 1002745; vasfar@mail.ru

Anastasia A. Kadyseva, DSs (Bio), Associate Professor; ORCID: 0000-0001-8703-5684; SPIN-code: 4485-7332; Author ID: 698088; kadyseva@mail.ru

Fan Li, Fartukov V.A., Kadyseva A.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have the copyright for the article and are responsible for plagiarism.

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

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-126-135>

УДК 630*:631.4:504.53



ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЧВЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ДРЕВЕСНОЙ ЩЕПЫ (В УСЛОВИЯХ ГБС РАН)

Т.В. Прокофьева¹, К.А. Горохов², М.С. Розанова³,
С.Л. Рысин⁴, В.А. Терехова⁵, А.А. Снег⁶, Г.Р. Васильев⁷

^{1,3,4,5,6,7} Факультет почвоведения Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ), г. Москва, Россия

² Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук (ГБС РАН), г. Москва, Россия

¹ tatianaprokofieva@yandex.ru ORCID: 0000-0002-7729-2684;

² gorki0211@gmail.com;

³ rozanova_ms@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0048-1556;

⁴ ser-rysin@yandex.ru; ORCID: 0009-0000-6635-3114;

⁵ vterekhova@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9121-639X;

⁶ sneg_anna@mail.ru; ORCID: 0009-0006-7865-1534;

⁷ gena_vasilev_02@bk.ru

Аннотация. Цель исследований – выявление различных аспектов влияния разлагающейся щепы на почву под покрытием. Проведено исследование трансформации свойств дерново-подзолистой контактно-глубокоосветленной почвы на моренном сутлинке в результате рекреационной нагрузки на тропы в дендрарии ГБС РАН. Исследованы свойства почв в фоновом разрезе, под грунтовой тропой, под тропой с покрытием из щепы лиственных пород деревьев и на модельных делянках. Выявлено увеличение плотности почв под тропами на 0,3 г/см³ в гумусовых и элювиальных горизонтах. В модельном опыте (1 сезон) щепа оказала защитное действие от переуплотнения. В почвах тропиной сети выявлено увеличение рН, в горизонтах под щеповым покрытием – увеличение содержания углерода органических соединений. В мелкоделяночном опыте зафиксирована потеря массы щепой на делянках без рекреационной нагрузки и с имитацией нагрузки на 22 и 28% соответственно. Методом лабораторного фитотестирования в почве под покрытиями из щепы лиственных пород выявлена тенденция угнетения ростовых показателей однодольных тест-растений *Avena sativa* L.

Финансовая поддержка исследования. Исследование частично выполнено в рамках государственного задания ГБС РАН по теме № 122042700002-6

Ключевые слова: дерново-подзолистые контактно-осветленные почвы (Albic, Stagnic, Abraptic Retisols), почвы городских рекреационных территорий, фитотоксичность, рекреационная нагрузка, мелкоделяночный опыт

Формат цитирования: Прокофьева Т.В., Горохов К.А., Розанова М.С., Рысин С.Л., Терехова В.А., Снег А.А., Васильев Г.Р. Изменение свойств почвы под влиянием дорожного покрытия из древесной щепы (в условиях ГБС РАН) // Природообустройство. 2025. № 5. С. 126-135. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-126-135>

Original article

CHANGES IN SOIL PROPERTIES UNDER THE INFLUENCE OF WOOD CHIP ROAD SURFACES (UNDER CONDITIONS OF THE MAIN BOTANICAL GARDEN OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES)

T.V. Prokofjeva¹, K.A. Gorokhov², M.S. Rozanova³,
S.L. Rysin⁴, V.A. Terekhova⁵, A.A. Sneg⁶, G.R. Vasiliev⁷

^{1,3,4,5,6,7}Faculty of soil science, Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

²Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹tatianaprokofieva@yandex.ru ORCID: 0000-0002-7729-2684;

²goroki0211@gmail.com;

³rozanova_ms@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0048-1556;

⁴ser-rysin@yandex.ru; ORCID: 0009-0000-6635-3114;

⁵vterekhova@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9121-639X;

⁶sneg_anna@mail.ru; ORCID: 0009-0006-7865-1534;

⁷gena_vasilev_02@bk.ru

Abstract. The purpose of the study is to identify various aspects of the effect of decomposing wood chips on the soil under the coating. A study on the transformation of the properties of sod-podzolic contact-deeplyclarified soil on moraine loam as a result of recreational effects on paths in the arboretum of the MBG RAS has been conducted. The properties of natural forest soil, soil under a dirt path, soil of the path covered with hardwood chips and under model plots were studied. An increase in the soil density under footpaths by 0.3g/cm³ in humus and eluvial horizons were revealed. The plots of the modeling experiment (season1) the wood chips a protective effect against over compaction had been disclosed. An increase in pH was detected in the soils of the pathway network. An increase in the carbon content of the organic compounds was detected in the horizons under the chip coating. In the small-scale experiment, a loss of chip mass in plots without recreational load and in plots with simulated load was fixed by 22% and 28%, respectively. The method of laboratory phytotesting in soil affected by a coating of hardwood chips revealed a tendency to inhibit the growth rates of monocots *Avena sativa* L. test plants.

Financial support for the research. The research was partially carried out as part of the state assignment of the GBS RAS under the topic No. 122042700002-6

Keywords: sod-podzolic contact-clarified soils (Albic, Stagnic, Abraptic Retisols), soils of urban recreational areas, phytotoxicity, recreational load, small-scale experiment

Format of citation: Prokofjeva T.V., Gorokhov K.A., Rozanova M.S., Rysin S.L., Terekhova V.A., Sneg A.A., Vasiliev G.R. Changes in soil properties under the influence of wood chip road surfaces (under conditions of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences) // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 126-135. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-126-135>

Введение. Несмотря на весьма высокий уровень антропогенных нагрузок, в границах «старой» Москвы (исторически сложившейся до расширения города в 2012 г.) и сегодня сохраняются лесные массивы, которые играют важную роль в формировании благоприятной для человека среды обитания. Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук (ГБС РАН), созданный в 1945 г., является ООПТ федерального значения и одновременно включен в Природно-исторический парк «Останкино» [1].

Комплекс хозяйственных мероприятий по уходу за насаждениями ГБС РАН включает в себя удаление или обрезку деревьев и кустарников, угнетающих коллекционные растения, а также сухостойных или аварийных деревьев. После проведения этих работ образуется значительное

количество порубочных остатков, которые подлежат утилизации путем дробления. Часть полученной щепы используется в качестве мульчи. Однако большая часть может быть применена для создания дорожных покрытий на всей территории сада.

Проблемы функционирования дорожно-тропиночных сетей и рекреационного воздействия на экосистемы городских парков отражены в целом ряде научных исследований [2-4]. В большинстве работ объектом изучения являются верхние слои почвы, тогда как вопрос о влиянии на более глубокие горизонты остается открытым. Многие исследователи обращают внимание на необходимость минимизации рекреационной нагрузки на экосистемы парков и лесопарков. Одним из способов решения этой проблемы является создание пешеходных дорожек

с покрытием, препятствующим переуплотнению почвы [5].

Дорожные покрытия из древесной щепы имеют ряд преимуществ, среди которых можно выделить низкую стоимость, экологичность и высокую проницаемость для воды и тепла. В научной литературе имеются сведения о том, что древесная щепка и кора, используемые для мульчирования, являются источником питательных веществ растений [6, 7] и что покрытие почвы органическими материалами может предотвратить ухудшение некоторых ее характеристик [8]. Несмотря на преимущества использования древесной щепы в качестве материала для дорожного покрытия, остаются нерешенными вопросы о долговечности такого покрытия и о его воздействии на почву и растительность.

В статье представлены результаты исследований изменений некоторых свойств дерново-подзолистой почвы под воздействием рекреационной нагрузки при формировании троп: грунтовой и с покрытием из щепы лиственных пород.

Цель исследований: выявление различных аспектов влияния разлагающейся щепы на почву под покрытием.

Материалы и методы исследований. Работу проводили в центральной части ГБС РАН – на территории так называемой «заповедной дубравы» и в ее окрестностях.

Главный ботанический сад занимает площадь 331,49 га, и значительная его часть (около 200 га) представлена быстро стареющими лесными насаждениями естественного происхождения, сформированными в XVI-XX вв. в результате длительного антропогенного воздействия разного характера [13]. В составе насаждений преобладают дуб черешчатый (*Quercus robur* L.),

береза повислая (*Betula pendula* Roth) и пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.). В состав также входят липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), осина (*Populus tremula* L.) и др. В густом подлеске доминирует лещина обыкновенная (*Corylus avellana* (L) H. Karst.).

Территория исследований находится на моренном плато днепровского возраста, мощность моренного суглинка на котором достигает 15 м. В прошлом здесь произрастали еловые и елово-широколиственные леса [10].

При выборе мест для закладки разрезов использовались материалы из архива лаборатории дендрологии ГБС РАН: оцифрованная версия карты почв территории ботанического сада 1945 г. [11] и карта-схема дорожно-тропиночной сети с изолиниями рельефа. В программе QGIS (версия 3.32.0-Lima, ревизия 311a8cb8a6) была создана карта исследуемой территории (рис. 1а). Для исследований были выбраны места с одинаковым составом почвенного покрова из дерново-подзолистых почв на моренных суглинках [12].

Фоновый разрез (разрез 1) был заложен на опушке вырубki площадью 0,6 га, сделанной в год проведения исследований при опытной реконструкции деградирующего насаждения в южной части заповедной дубравы.

Разрез 2 был заложен на участке грунтовой тропы, покрытой щепой. К моменту исследований толщина слоя щепы составляла 5-8 см и имела визуальные признаки переработки живыми организмами: присутствовали обильный мицелий, колонии муравьев.

Разрез 3 был заложен на грунтовой тропе без покрытия. В верхнем горизонте присутствовала втоптанная прошлогодняя листва (рис. 1а).

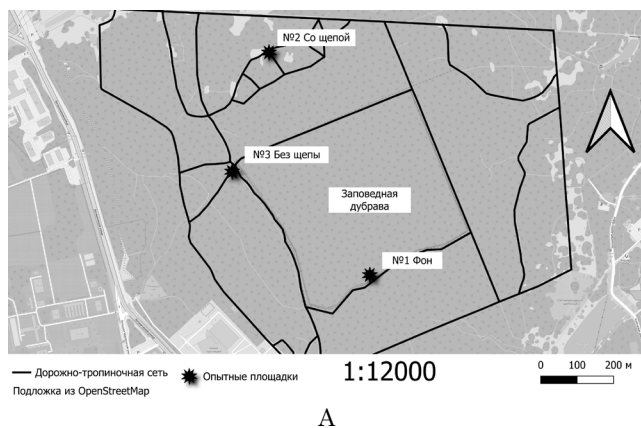


Рис. 1. Объект исследований:

А – площадки исследований и дорожно-тропиночная сеть ГБС РАН; Б – опытные делянки, покрытые щепой

Fig. 1. Objects of study:

A – Research sites and road and path network of the MBG RAS; B – Experimental plots covered with wood chips

На месте санитарной рубки в непосредственной близости от фонового разреза 1 был заложен мелкоделяночный полевой опыт с целью определения скорости разложения щепы листовенных пород и ее воздействия на почвы в определенный период. Были подготовлены 4 делянки размером $2 \times 0,75$ м (рис. 1б). На поверхность почвы был насыпан слой щепы толщиной 5-8 см (аналогично слою на тропе со щепой, разрез 2). На двух из четырех делянок (1 и 3) была проведена имитация рекреационной нагрузки (вытаптывания) за один теплый сезон (5 месяцев, 1667 чел.), рассчитанная согласно [13] и аналогичная той, которая приходится на соседнюю с участком пешеходную тропу. Делянки 2 и 4 рекреационному воздействию не подвергались.

В лаборатории определяли ряд химических и физических показателей. Плотность почвы определяли методом кольца в трехкратной повторности [14]. Измерение рН почв производилось потенциометрически. Углерод органических соединений (Сорг) определяли методом Тюрина с титриметрическим окончанием [15].

Для оценки влияния рекреационной нагрузки и щепового покрытия на способность почв служить полноценным субстратом для роста и развития растений проводили фитотестирование согласно методике Фитоскан-2 (ФР.1.31.2020.38716). В лабораторных экспрессных фитотестах исследовали верхние горизонты почв на предмет воздействия на ростовые показатели однодольных и двудольных растений: овса посевного (*Avena sativa* L.) и горчицы белой (*Sinapis alba* L.). Проращивание семян проводили аппликационным способом в одноразовых пластиковых двухкамерных планшетах («Европолитест»; <https://europolytest.ru/>). По окончании экспозиции измеряли длину корней и ростков. Фитоэффект (ФЭ) рассчитывали по формуле:

$$\Phi \text{Э}_i = \frac{\left(\overset{-0}{x_i} - \overset{-x}{x_i} \right)}{\overset{-x}{x_i}} \cdot 100,$$

где $\overset{-0}{x_i}$, $\overset{-x}{x_i}$ – средние арифметические значения тест-параметра в опыте и в контроле соответственно [16]. Статистическая обработка результатов произведена с использованием пакета анализа MS Excel.

Результаты и их обсуждение. *Изменение морфологических свойств и плотности почв под тропами и опытом.* Во вскрытых разрезах описаны дерново-подзолистые почвы на моренных отложениях [17]:

Разрез 1 и разрез 2 – постагродерново-подзолистые контактно-глубокоосветленные легко-тяжелосуглинистые на моренном щебнистом суглинке;

Разрез 3 – дерново-подзолистая контактно-глубокоосветленная легко-тяжелосуглинистая на моренном щебнистом суглинке.

Мощность гумусово-аккумулятивных горизонтов первых двух разрезов (АУ + АУра) составляет около 20 см (рис. 2). Выделяется верхняя часть, хорошо оструктуренная и обильно пронизанная корнями. Горизонты имеют ровную границу с ясным переходом к элювиальному горизонту (ЕЛ). Нами интерпретирован этот признак как наличие в прошлом распашки на этой территории. Однако характер горизонтов сформировался, возможно, не под пашней, а под луговой растительностью в период использования под выгон.

Элювиальный горизонт фонового разреза 1 разделен на два подгоризонта. В нижнем ЕЛg наблюдались признаки переувлажнения в виде интенсивной отбеленности и большого количества железисто-марганцевых конкреций. В горизонте обнаружены включения щебня. Гранулометрический состав верхних горизонтов – пылеватый легкий суглинок, в переходном субиллювиальном горизонте (ВЕЛ) гранулометрический состав – пылеватый средний суглинок, и только в иллювиальном горизонте (ВТ) он становится тяжело-суглинистым. В плотном горизонте ВТ отмечено наличие железистых стяжений и конкреций. Корни распространялись в основном по межгратным порам-трещинам. Почвообразующая порода – некарбонатная щебнистая морена. Реакция с HCl (10%) отсутствовала.

В гумусовых горизонтах разреза 2 были найдены включения щепы. Отдельные щепки проникали до глубины 29 см. Корни менее обильные, чем в фоновом разрезе, верхние горизонты уплотнены.

Гумусовый горизонт разреза 3 отличался комковато-глыбистой структурой и большим количеством втоптанного в него листового опада. Старопахотный горизонт не был выделен, но отмечены ясный переход и ровная граница между гумусово-элювиальным (АЕЛ) и элювиальным горизонтами. Эти горизонты обладали чешуйчатой структурой с тенденцией деления на плитовидные отдельности, что указывает на сильную вертикальную нагрузку. Мелкие корни в обилии обнаружены в иллювиальном горизонте. У поверхности наблюдались преимущественно крупные корни.

В разрезах 1 и 2 с глубиной объемная масса изменялась по элювиально-иллювиальному типу (рис. 3а). Влияние почвообразующей породы обуславливает повышение значений плотности с глубиной. Показатели плотности гумусовых

горизонтов фонового разреза 1 были несколько более 1 г/см^3 . В почве на тропе со щепой они были выше, чем у фоновых горизонтов, на величину около $0,2-0,3 \text{ г/см}^3$ и до глубины залегания горизонта ВЕL (около 40 см от поверхности). В разрезе 3 наблюдалось резкое уменьшение значений в горизонте АУ по сравнению с другими разрезами. Втоптанное в верхний горизонт тропинки опавшие листья уменьшают ее массу и тем самым способствуют уменьшению плотности. В горизонте АЕL значения выше значений АУра фонового разреза на $0,3 \text{ г/см}^3$. Горизонт ЕL сильно уплотнился, что затруднило прорастание корней растений.

Многолетнее покрытие из щепы лишь отчасти предотвратило уплотнение. Это может быть связано как с утратой буферности щепы при ее максимальном уплотнении, так и с уплотнением почвы до подсыпки щепы. Верхние горизонты почв под тропами деградировали в мощности по причине рекреационной нагрузки по сравнению с фоновой почвой, в то время как мощность горизонта ВЕL практически не изменилась (рис. 2).

Значения плотности в гумусовых горизонтах под опытными делянками практически не отличались от фона ($1,12 \text{ г/см}^3$). Незначительные отличия обусловлены лишь локальными характеристиками мест отбора проб.

Так, среднее значение для делянок с нагрузкой составляло $0,99 \text{ г/см}^3$, а для делянок без нагрузки – $0,94 \text{ г/см}^3$. Данная разница укладывается в рамки погрешности. Отсутствие проросших растений на опытных делянках ввиду невозможности пробиться сквозь щеповое покрытие повлияло на количество мелких корней и уменьшило плотность дерновины. Возможно, это привело к небольшому снижению плотности почв по сравнению с фоном. Отсутствие увеличения плотности связано, вероятно, также с защитной ролью щепового покрытия. Покрытие из щепы лиственных пород деревьев за один сезон уплотнилось под воздействием рекреационной нагрузки более интенсивно, чем без нее.

Показатель кислотности. Изменения показателя рН в почвах связаны со многими факторами. Так, на тропях значения рН гумусовых горизонтов были выше, чем у фона, на 1,0-1,5 ед.: поверхностные горизонты разреза 2 составляли 6,5, разреза 3-5,9, в то время как в фоновом разрезе 1-4,9. Подщелачивание может быть связано как с привнесом материала рекреантами на подошвах обуви с троп, имеющих гравийное покрытие из известкового материала, так и с постепенным разложением щепы покрытия. Эти данные хорошо согласуются с источниками литературы [6, 18], где отмечается подщелачивание почв парковых тропинок.

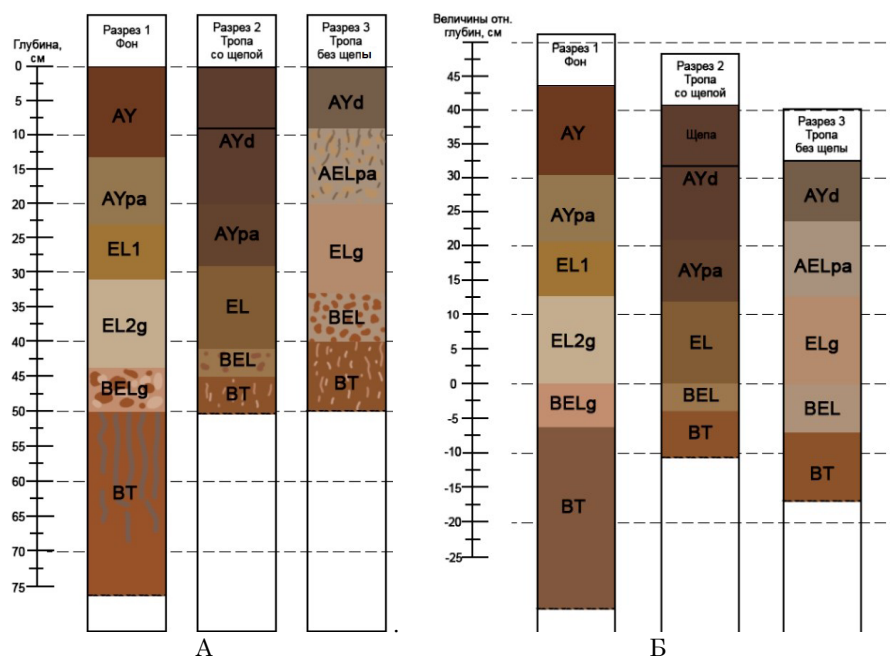


Рис. 2. Соотношение горизонтов в профилях исследованных почв:

А – схематическое изображение почвенных профилей; Б – схематическое изображение почвенных профилей, где за точку отсчета взята нижняя граница горизонта ЕL

Fig. 2. The ratio of horizons in the profiles of the studied soils:

А – schematic representation of soil profiles, Б – schematic representation of soil profiles, where the lower boundary of the EL horizon is taken as the reference point

С глубиной значения рН в почвах под тропами снижаются (рис. 3б). На уровне элювиальных горизонтов (30-35 см) значения рН в фоновом разрезе и разрезе 3 выравниваются, тогда как в разрезе 2 они остаются выше, чем в фоновой почве. Отсутствие антропогенного влияния в фоновом разрезе подтверждается низкими значениями рН, характерными для ненарушенных дерново-подзолистых почв.

Опытные делянки были заложены на удалении от активно используемых посетителями троп и огорожены. Здесь предполагалось наблюдать тенденцию изменений свойств почв, не связанных с другими факторами, кроме щепового покрытия. В первый год опыта различия в показателе кислотности с фоновым разрезом были незначительными. Так, для делянок с нагрузкой среднее значение рН в верхнем горизонте составляло 4,8. На делянках без нагрузки этот показатель находился на уровне рН 5,1.

Содержание углерода органических соединений. На поступление водорастворимого органического вещества из щепового покрытия указывают как потемнение окраски элювиальных горизонтов, так и повышение содержания в них Сорг (рис. 3в). Содержание Сорг в верхних горизонтах почв составило: разрез 1-2,1%; разрез 2-2%; разрез 3-4,4%. Повышение содержания органического углерода в почве под тропой без покрытия связано с втаптыванием опавшей листвы в верхний горизонт почвы. Аналогичные данные были ранее получены для почв Лосиногостовского острова и Битцевского парка [6]. Щеповое покрытие

не повысило содержание Сорг в гумусовом горизонте, но проникновение щепы на глубину до 29 см привело к накоплению Сорг в горизонте EL, для которого характерно минимальное содержание углерода. Так, для этих горизонтов его содержание составило: в разрезе 1: EL1-0,71%, EL2g – 0,08%; в разрезе 2: EL – 0,92%; в разрезе 3: ELg – 0,29%. Фоновый разрез показал распределение Сорг, характерное для дерново-подзолистых почв.

На опытных делянках содержание Сорг выше, чем в разрезе 1, что может быть связано как с локальной неоднородностью, так и с поступлением органических компонентов из щепы. Повышение значений Сорг относительно фона на всех делянках также можно отнести за счет разложения остатков подстилки и мелких корней (рис. 3в). Исследования на лесосеках показывают, что после рубки интенсивным является поступление углерода из валежа, порубочных остатков и подстилок в почву и почвенные растворы [19, 20]. Повышение величин рН в первый месяц после рубки связывают с изменением поступления веществ-метаболитов из растений, а также с уменьшением количества поступающего углекислого газа на фоне снижения микробиологической активности [19].

На опытных делянках были заложены мешочки со щепой из лиственных пород деревьев известной массы для оценки потери массы в зависимости от наличия рекреационной нагрузки. Масса щепы за сезон значительно уменьшилась: на 22% на делянках без нагрузки;

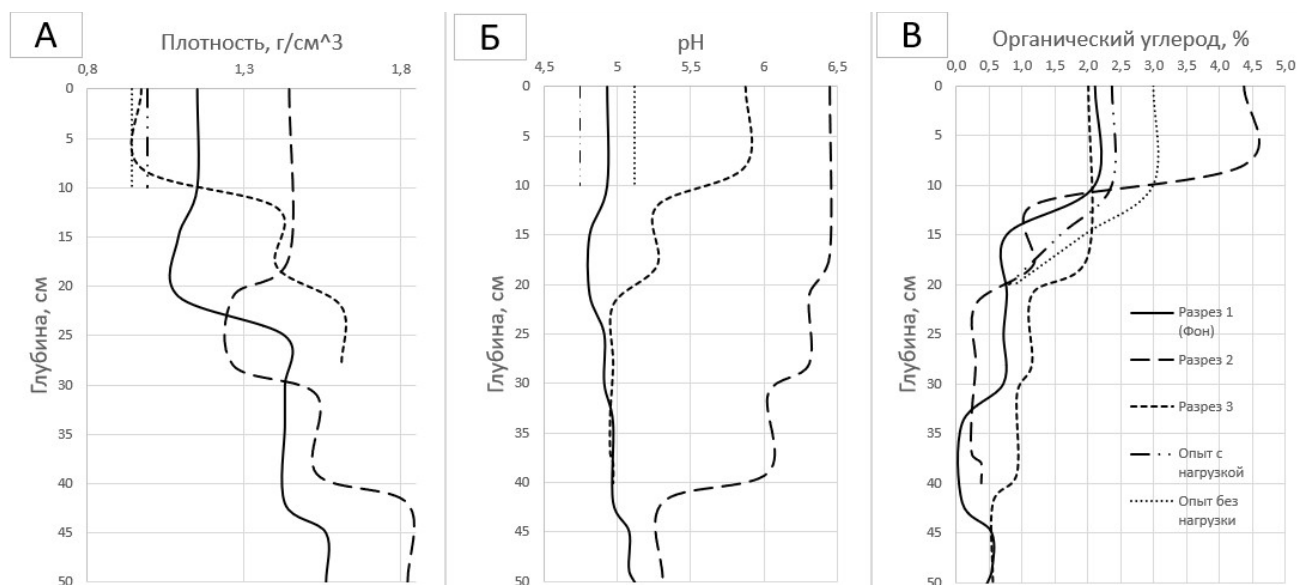


Рис. 3. Свойства почв – распределение по профилям в верхних горизонтах на опытных делянках: А – плотность; Б – рН; В – содержание углерода органических соединений

Fig. 3. Soil properties – distribution by profiles in the upper soil horizons on experimental plots: А – density; В – рН; С – carbon content of organic compounds

на 28% на делянках с имитацией рекреационной нагрузки. Такая высокая скорость разложения свойственна древесным остаткам лиственных пород. В отличие от хвойных в их древесине отсутствуют смолистые вещества [21].

Фитотестирование – выбранный для лабораторного фитотестирования апликатный способ, при котором семена прорастают в контакте с твердой массой почвы. Эффект стимуляции твердых субстратов наблюдают при увеличении энергии прорастания и/или длины корней, и/или ростков проросших семян на 20% и более относительно холостого опыта. Эффект ингибирования (токсический фитоэффект) наблюдают при снижении указанных параметров.

Семена выбранных тест-растений различались по всхожести (у *A. Sativa* – 96%, у *S. alba* – 70%) и по энергии прорастания. Невысокая всхожесть, более продолжительный период развития проростков семян горчицы (сорт «Профи») привели к увеличению вариабельности в измеренных показателях длины корней и ростков, что не позволило выявить значимые отличия между исследуемыми вариантами почвенных образцов.

В результате измерений длины корней и ростков *A. sativa* установлено, что наибольшее угнетение тест-параметров (в два раза относительно фона) оказывал образец из разреза 2 под разлагающейся щепой (рис. 4). Между образцами из разрезов 1 и 3 различия не выявлены, что свидетельствует об отсутствии негативного воздействия рекреационной нагрузки на проростки растений.

На модельных экспериментальных делянках с имитацией рекреационной нагрузки выявлено небольшое угнетающее воздействие почвы на развитие растений *A. sativa* (рис. 4). Различия в ростовых параметрах *S. alba* в сравниваемых вариантах были статистически незначимыми.

Расчеты значений фитоэффекта образцов почв на растения в разных вариантах исследований представлены в таблице 2. Выявлен отрицательный фитоэффект на развитие проростков *A. sativa* относительно того и другого контроля в почве разреза 2, а также в отношении корней на опытных делянках с рекреационной нагрузкой. Угнетение тест-культуры на почве разреза 2 может быть связано с выделениями веществ

Таблица 1. Средние значения длины корней и ростков проростков семян тест-растений, мм

Table 1. Average lengths of roots and sprouts of test-plant seedlings, mm

Вид тест-растения Type of test plant	Тест-параметр, мм Test parameter, mm	Контроль Control		Фон разрез 1 Background section 1	Тропа path		Опыт (средние) Experiment (average)	
		вода water	грунт ground		под щепой разрез 2 under the wood chips, section 2	без щепы разрез 3 without wood chips section 3	с нагрузкой with load	без нагрузки no load
<i>Avena sativa</i> L.	длина корня root length	65,1	34,7	38,7	27,0	44,1	28,6	38,6
	длина ростка sprout length	50,1	25,7	43,0	20,7	48,6	39,1	42,6
<i>Sinapis alba</i> L.	длина корня root length	78,6	51,2	65,2	63,5	76,3	86,7	76,9

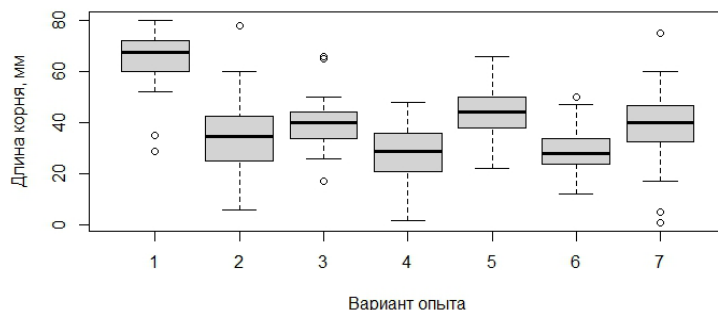


Рис. 4. Длина корня проростков семян овса посевного (*Avena sativa* L.) в вариантах фитотестов:

1 – контроль, вода; 2 – контроль, почвогрунт; 3 – фоновая почва; 4 – почва разреза 2; 5 – почва разреза 3; 6 – делянки с нагрузкой; 7 – делянки без нагрузки

Fig. 4. Root length of oat seedlings (*Avena sativa* L.) in phytotest variants:

1 – water control; 2- soil control; 3- background soil; 4 – soil of section 2; 5 – soil of section 3; 6 – plots with load; 7 – plots without load

Таблица 2. Фитоэффект (%) исследованных образцов почв
на ростовые тест-параметры проростков семян *Avena sativa* L. и *Sinapis alba* L.

Table 2. Phytoeffect (%) of the studied soil samples on growth test parameters
of *Avena sativa* L. and *Sinapis alba* L. seed sprouts

Тест-параметр, мм Test parameter, mm	Контроль Control	Фон, разрез 1 Back-ground, section 1	Тропа path		Опыт с нагрузкой Experiment with load		Опыт без нагрузки Experiment without load	
			Под щепой разрез 2 under the wood chips, section 2	Без щепы разрез 3 without wood chips, section 3	Опыт 1 Experiment 1	Опыт 3 Experiment 3	Опыт 2 Experiment 2	Опыт 4 Experiment 4
<i>Avena sativa</i> L.								
Длина корня root length	Вода / water	-40,6	-58,5	-32,2	-52,5	-29,0	-52,5	-29,0
	Грунт / ground	11,4	-22,2	27,1	-11,0	-24,8	-11,0	33,2
Длина ростка sprout length	Вода / water	-14,2	-58,6	-3,1	-15,5	-23,3	-15,5	-14,6
	Грунт / ground	67,2	-19,2	89,0	64,7	49,6	64,7	66,6
<i>Sinapis alba</i> L.								
Длина корня root length	Вода / water	16,98	19,14	-2,94	24,73	-4,02	11,79	-16,06
	Грунт / ground	27,36	24,04	48,90	91,35	47,23	71,49	28,77

от разлагающейся щепы. Сидератная культура *S. alba* оказалась более устойчивой к таким воздействиям. Рекреационная нагрузка без щепового покрытия практически не оказала негативного влияния.

Модельный опыт позволяет рассмотреть начальный этап влияния щепы на почвенный покров. Наблюдается большой разброс значений, скорее всего не связанный с рекреационным воздействием или воздействием щепы на площадки. Однако слабые отрицательные фитоэффекты, рассчитанные для корней растений, могут указывать на возможное угнетающее воздействие щепового покрытия уже на первых стадиях его разложения.

Выводы

Верхние горизонты дерново-подзолистой почвы на щебнистом моренном суглинке (гумусовые и элювиальные) на тропах уплотняются на 0,2-0,3 г/см³. Их суммарная мощность уменьшается на величину до 10 см. Опыт с имитацией нагрузки не привел к увеличению плотности покрытой почвы за первый год моделирования. В то же время за несколько лет щепы заметно разлагается и уплотняется (разрез 2), теряя свои защитные свойства.

Список использованных источников

1. Большая Российская энциклопедия. Главный ботанический сад имени Н.В. Цицина РАН <https://bigenc.ru/c/glavnyi-botanicheskii-sad-imeni-n-v-tsitsina-ran-07bb7d>
2. Зеликов В.Д. Влияние уплотнения почвы на насаждения в лесопарках / В.Д. Зеликов, В.Г. Пшоннова // Лесное хозяйство. 1964. № 12. С. 34-37.
3. Карпионов Р.А. Дубравы лесопарковой зоны Москвы. М.: Наука, 1967. 104 с.

Покрытие из щепы лиственных пород деревьев не является единственной причиной подщелачивания почв под тропами. Более сильное влияние оказывает, по всей видимости, привнесение материала с городских щебневых и асфальтовых покрытий. Влияние привнесенного материала на рН почвы под тропой без покрытия достигает горизонта ЕL. Признаки подщелачивания были выявлены также на модельных участках без нагрузки и в почве под тропой со щеповым покрытием.

В результате разложения щепы повышается содержание органического углерода в гумусовых горизонтах на экспериментальных площадках по сравнению с фоновыми значениями. Это может быть обусловлено как разложением щепы, так и разложением мелких корней, оставшихся после удаления растительности на вырубке.

В ходе эколого-токсикологического тестирования было выявлено угнетение однодольных растений в почве, на которую было нанесено покрытие из щепы лиственных пород.

Таким образом, щеповое покрытие может препятствовать зарастанию травой тропинок и эффективно защищать от заглушения сорняками коллекционные растения.

References

1. Great Russian Encyclopedia. Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin RAS. <https://bigenc.ru/c/glavnyi-botanicheskii-sad-imeni-n-v-tsitsina-ran-07bb7d>
2. Zelikov V.D. The influence of soil compaction on plantings in forest parks / V.D. Zelikov, V.G. Pshonnova // Lesnoye khozyaystvo. 1964. No. 12. P. 34-37.
3. Karpisonova R.A. Oak groves in the forest park area of Moscow. M.: Nauka, 1967. 104 p.

4. Кузнецов В.А. Изменение свойств почв лесопарков Москвы при высоком уровне рекреационной нагрузки // В.А. Кузнецов, И.М. Рыжова, Г.В. Стома // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1270-1280. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17100057> EDN: ZHVFLP
5. Данчева А.В. Анализ состояния сосновых древостоев в городских лесах города Тюмень (на примере парка «Гилевская роща») / А.В. Данчева, С.В. Залесов, В.В. Назарова // Природообустройство. 2024. № 3. С. 125-133. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-125-133>
6. Pickering J.S., & Shepherd A. Evaluation of organic landscape mulches: composition and nutrient release characteristics. *Arboricultural Journal*, 2000. 4(2-3), 175-187. <https://doi.org/10.1080/03071375.2000.9747271>
7. Downer J., Hodel D. The effects of mulching on establishment of *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Becc., *Washingtonia robusta* H. Wendl. And *Archontophoenix cunninghamiana* (H. Wendl.) H. Wendl. and Drude in the landscape. // *Sci. Hortic.* 2001.87:85-92. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(00\)00171-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(00)00171-0)
8. Iqbal R., Raza M.A.S., Valipour M., Saleem M.F., Zaheer M.S., Ahmad S., Toleikiene M., Haider I., Aslam M.U., Nazar M.A. Potential agricultural and environmental benefits of mulches – a review. *Bull. Natl. Res. Cent.* 44, 75 (2020). <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00290-3>
9. Савов К.П. О состоянии и динамике лесной растительности Останкинской дубравы // Бюллетень Главного Ботанического Сада РАН. Выпуск 167. Издательство «Наука» Москва 1993, с. 53-58
10. Леса Москвы. Опыт организации мониторинга / Л.П. Рысин, Г.А. Полякова, Л.А. Савельева и др. М.: Институт лесоведения РАН, 2001. 148 с.
11. Вадковская О.А. Почвы территории Главного Ботанического Сада АН СССР // Бюллетень Главного Ботанического Сада АН СССР. Выпуск 3. Издательство АН СССР, 1949. С. 29-33.
12. Офицерова О.Ф. Характеристики почв дендрария Главного Ботанического Сада АН СССР // Бюллетень Главного Ботанического Сада АН СССР. Выпуск 156. М.: Изд-во «Наука» 1990. С. 34-40.
13. Временная методика определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок. М.: ВНИИЛМ, 1987. 43 с.
14. Теории и методы физики почв. Колл. монография // Под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. М.: «Гриф и Ъ», 2007, 616 с.
15. Теория и практика химического анализа почв (под ред. Л.А. Воробьевой) М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
16. Терехова В.А. Практикум по биотестированию экоотоксичности почв: учебное пособие / В.А. Терехова, А.А. Рахлеева, Е.В. Федосеева, А.П. Кирюшина // М.: МАКС Пресс, 2022. 102 с. <https://doi.org/10.29003/m3054.978-5-317-06868-4>
17. Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
18. Меланхолин П.Н. Влияние дорожно-тропиночной сети на травяную растительность и почвы дубовых лесов Москвы и ближнего Подмосковья / П.Н. Меланхолин, А.Б. Лысиков // Лесоведение. 2014. № 2. С. 38-45.
19. Dymov A.A. Soils of Cuttings and Secondary Forests // *Eurasian Soil Science*, 2023, SSN1064-2293, Vol. 56, Suppl. 1, pp. S46-S83. <https://doi.org/10.1134/S1064229323700205>
4. Kuznetsov V.A. Changes in the properties of soils of Moscow forest parks under the impact of high recreation loads // V.A. Kuznetsov, I.M. Ryzhova, G.V. Stoma // *Soil science*. 2017. № 10. P. 1270-1280. <https://doi.org/10.1134/S1064229317100052> EDN: ZHVFLP
5. Dancheva A.V. Assessment of the condition of pine stands in the urban forests of the city of Tyumen (on the example of the park “Gilevskaya Roshcha”) / A.V. Dancheva, S.V. Zalesov, V.V. Nazarova // *Prirodoobustrojstvo*. 2024; № 3, P. 125-133. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-125-133>
6. Pickering J.S., & Shepherd A. Evaluation of organic landscape mulches: composition and nutrient release characteristics. *Arboricultural Journal*, 2000. 24(2-3), 175-187. <https://doi.org/10.1080/03071375.2000.9747271>
7. Downer J., Hodel D. The effects of mulching on establishment of *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Becc., *Washingtonia robusta* H. Wendl. And *Archontophoenix cunninghamiana* (H. Wendl.) H. Wendl. and Drude in the landscape. // *Sci. Hortic.* 2001.87:85-92. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(00\)00171-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(00)00171-0)
8. Iqbal R., Raza M.A.S., Valipour M., Saleem M.F., Zaheer M.S., Ahmad S., Toleikiene M., Haider I., Aslam M.U., Nazar M.A. Potential agricultural and environmental benefits of mulches – a review. *Bull. Natl. Res. Cent.* 44, 75 (2020). <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00290-3>
9. Savov K.P. State and dynamics of the woody vegetation in Ostandkino oak-grove // *Bulletin of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences*. Issue 167. M.: Nauka, 1993. P. 53-58
10. Forests of Moscow. Experience in monitoring organization / L.P. Rysin, G.A. Polyakova, L.A. Savelyeva et al. – M.: Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences, 2001. 148 p.
11. Vadkovskaya O.A. Soils of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences territory // *Bulletin of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences*. Issue 3. Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1949. P. 29-33
12. Ofitserova O.F. Characteristics of the soils of the arboretum of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences // *Bulletin of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences*. Issue 156. M.: Publishing house “Science” 1990. P. 34-40
13. Temporary methodology for determining recreational loads on natural complexes when organizing tourism, excursions, mass everyday recreation and temporary norms for these loads. – M.: VNIILM, 1987. – 43 p.
14. Theories and methods of soil physics. Collective monograph // Edited by Ye.V. Shein and L.O. Karpachevsky. M.: “Grif and C”, 2007, 616 p.
15. Theory and practice of chemical analysis of soils (edited by L.A. Vorobyeva) – M.: GEOS, 2006. 400 p.
16. Terekhova V.A. Tutorial on biotesting of soil ecotoxicity: textbook / V.A. Terekhova, A.A. Rakhleeva, E.V. Fedoseeva, A.P. Kiryushina // Moscow: MAKS Press, 2022. 102 p. <https://doi.org/10.29003/m3054.978-5-317-06868-4>
17. Classification and diagnostics of soils in Russia / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oycumena, 2004. 342 p.
18. Melankholin P.N. The road and trail network impact on grass vegetation and soils of the oak forests of Moscow and nearest Moscow area / P.N. Melankholin, A.B. Lysikov // *Lesovedenie (Forestry)*. 2014. No. 2. P. 38-45.

20. Евдокимов И.В. Активность выделения CO₂, азотфиксации и денитрификации при разложении крупных древесных остатков ели обыкновенной в южной тайге / Евдокимов И.В., Костина Н.В., Быховец С.С., Кураков А.В. // Почвоведение, 2023, № 3, с 370-379. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600949>

21. Капица Е.А. Разложение коры в составе порубочных остатков после сплошных рубок в среднетаежных лесах / Е.А. Капица, Е.В. Шорохова, И.В. Ромашкин, Н.А. и др. // Лесоведение. 2019, № 1, С. 38-48. <https://doi.org/10.1134/S0024114819010066>

19. Dymov A.A. Soils of Cuttings and Secondary Forests // Eurasian Soil Science, 2023, SSN1064-2293, Vol. 56, Suppl. 1, P. S46–S83. <https://doi.org/10.1134/s1064229323700205>

20. Yevdokimov I.V. Activities of CO₂ emission, N₂ fixation, and denitrification during the decay of Norway spruce coarse woody debris in southern taiga / I.V. Yevdokimov, N.V. Kostina, S.S. Bykhovets, A.V. Kurakov // Soil Science, 2023, No. 3, P. 370-379. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600949>

21. Kapitsa E.A. Decomposition of bark as part of logging residues after clear cuttings in middle taiga forests/ E.A. Kapitsa, E.V. Shorokhova, I.V. Romashkin, N.A. Galibina, K.M. Nikerova, I.A. Kazartsev // Lesovedenie (Forestry), 2019, No. 1, P. 38-48. <https://doi.org/10.1134/S0024114819010066>

Об авторах

Татьяна Вадимовна Прокофьева, канд. биол. наук, доцент кафедры географии почв ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова; ResearcherID: U-9681-2019; ORCID: 0000-0002-7729-2684; РИНЦ (SPIN): 3378-3712; tatianaprokofieva@yandex.ru

Кирилл Алексеевич Горохов, студент 1 курса магистратуры ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова; gorki0211@gmail.com

Марина Сергеевна Розанова, канд. биол. наук, старший преподаватель кафедры химии почв ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова; ORCID: 0000-0003-0048-1556; Scopus Author ID: 6603197226; ResearcherID: O-7618-2015; rozanova_ms@mail.ru

Сергей Львович Рысин, канд. биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией ГБС РАН; ORCID: 0009-0000-6635-3114; РИНЦ (PIN): 8528-0744. ser-rysin@yandex.ru

Вера Александровна Терехова, д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры земельных ресурсов и оценки почв ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова; РИНЦ (SPIN): 4488-9505; ResearcherID: B-4808-2013; ORCID: 0000-0001-9121-639X; Scopus Author ID: 6603443333; vterekhova@gmail.com

Анна Арнольдовна Снег, канд. биол. наук, инженер кафедры общего земледелия и агроэкологии ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова; ORCID: 0009-0006-7865-1534; sneg_anna@mail.ru

Геннадий Родионович Васильев, студент 1 курса магистратуры ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова; gena_vasilev_02@bk.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Прокофьева Т.В., Горохов К.А., Розанова М.С., Рысин С.Л., Терехова В.А., Снег А.А., Васильев Г.Р. выполнили теоретические и практические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of the 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 21.02.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review 17.08.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 17.08.2025

About the authors

Tatiana V. Prokofeva, CSc (Bio), Associate Professor of the Department of Soil Geography, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University Researcher ID: U-9681-2019; ORCID: 0000-0002-7729-2684; RSCI (SPIN): 3378-3712; tatianaprokofieva@yandex.ru

Kirill A. Gorokhov, 1st year student of the magistrature; gorki0211@gmail.com

Marina S. Rozanova, CSc (Bio), Senior Lecturer LMSU, Soil Science faculty, ORCID: 0000-0003-0048-1556; Scopus Author ID: 6603197226; ResearcherID: O-7618-2015; rozanova_ms@mail.ru

Sergey L. Rysin, CSc (Bio), Associate Professor, Leading Researcher, Head of Laboratory MBG RAS, ORCID: 0009-0000-6635-3114; PSCI (SPIN): 8528-0744. ser-rysin@yandex.ru

Vera A. Terekhova, DSc (Bio), Professor LMSU, Soil Science faculty, Istina ResearcherID (IRID): 500242; RSCI (SPIN): 4488-9505; ResearcherID: B-4808-2013; ORCID: 0000-0001-9121-639X; Scopus Author ID: 6603443333; vterekhova@gmail.com

Anna A. Sneg, CSc (Bio), Specialist LMSU, Soil Science faculty, ORCID: 0009-0006-7865-1534; sneg_anna@mail.ru

Gennady R. Vasiliev, 1st year student of the magistrature; gena_vasilev_02@bk.ru

Prokofjeva T.V., Gorokhov K.A., Rozanova M.S., Rysin S.L., Terekhova V.A., Sneg A.A., Vasiliev G.R. 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/10.26897/1997-6011-2025-5-136-145>

УДК 630*:551.577.3



ПОВТОРЯЕМОСТЬ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗАСУХ И ДИНАМИКА РЕЖИМА УВЛАЖНЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЛЕСОСТЕПИ

С.М. Матвеев^{1✉}, Д.А. Литовченко²^{1,2} Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова¹ lisovod@bk.ru; ORCID: 0000-0001-8532-1484;² timashchuk90@mail.ru; ORCID: 0000-0003-2973-7447

Аннотация. Целью исследований является анализ повторяемости и интенсивности засух и динамики ключевых метеорологических факторов (сумм атмосферных осадков и температур воздуха) в Центральной лесостепи (ЦЧР), определяющих условия произрастания древесных растений. Анализ динамики режима увлажнения на территории Центральной лесостепи выполнен с использованием гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова (ГТК), рассчитанного по данным метеостанций № 34123 «Воронеж», № 27930 «Липецк», № 34214 «Белгород», № 34009 «Курск». Повторяемость сильных засух ($ГТК_{м-с} 0,3-0,6$) по названным метеостанциям за последние 85 лет (1940-2024) составила от 3 до 6, умеренных ($ГТК_{м-с} 0,6-0,8$) – от 3 по метеостанции «Курск» до 14 по метеостанции «Белгород». Выявлен сильный вклад сумм атмосферных осадков в значения ГТК за период май-сентябрь, связь высокая ($r = 0,91$), вклад температур воздуха меньше, связь значительная ($r = 0,69$). Динамика значений ГТК за период май-сентябрь показывает общее снижение уровня влагообеспеченности территории Центральной лесостепи, особенно в последнем тридцатилетии. По всем метеостанциям наблюдается значительный рост средних температур воздуха. Распределение сумм атмосферных осадков по полугодиям показало снижение и в теплом, и в холодном периодах по метеостанциям «Белгород» и «Липецк» и небольшой рост в холодном периоде по метеостанциям «Воронеж» и «Курск». Средние значения $ГТК_{м-с}$ за период наблюдений по названным метеостанциям составили: «Воронеж» – 1,06; «Липецк» – 1,07; «Белгород» – 1,03; «Курск» – 1,25. В последнем тридцатилетии значения составили: «Воронеж» – 1,03; «Липецк» – 0,96; «Белгород» – 0,94; «Курск» – 1,22.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-16-20047 «Структура популяций и внутривидовая изменчивость дендрофенотипов сосны обыкновенной и дуба черешчатого как основа адаптационной устойчивости к изменениям климата и иным внешним воздействиям».

Ключевые слова: метеостанции, сумма атмосферных осадков, засуха, гидротермический коэффициент Селянинова, условия произрастания древесных растений

Формат цитирования: Матвеев С.М., Литовченко Д.А. Повторяемость и интенсивность засух и динамика режима увлажнения в Центральной лесостепи // Природообустройство. 2025. № 5. С. 136-145. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-136-145>

Original article

FREQUENCY AND INTENSITY OF DROUGHTS AND DYNAMICS OF THE MOISTURE REGIME IN THE CENTRAL FOREST-STEPPE

S.M. Matveev^{1✉}, D.A. Litovchenko²^{1,2} Voronezh state university of forestry and technologies named after G.F. Morozov; 394087, Voronezh, Timiryazev st., 8. Russia

Abstract. The analysis of the dynamics of the moisture regime in the Central forest-steppe was performed using the hydrothermal coefficient of G.T. Selyaninov (HTC) calculated based on the data of meteorological stations No. 34123 “Voronezh”, No. 27930 “Lipetsk”, No. 34214 “Belgorod”, No. 34009 “Kursk”. The frequency of severe droughts ($HTC_{m-s} 0.3-0.6$) at the named meteorological stations over the past 85 years (1940-2024) is from 3 to 6, moderate droughts ($HTC_{m-s} 0.6-0.8$) – from 3 at the meteorological station “Kursk” to 14 at the meteorological station “Belgorod”. A strong contribution of precipitation amounts to the HTC for the period May-September values was revealed, the relationship is high ($r = 0.91$), the contribution of air temperatures is less, the relationship is significant ($r = 0.69$). The dynamics of the hydrothermal coefficient values for the period May-September shows a general decrease in the level of moisture supply in the Central

Forest-Steppe territory, especially in the last thirty years. A significant increase in average air temperatures is observed at all meteorological stations. The distribution of precipitation amounts by half-years showed a decrease in both the warm and cold periods at the meteorological stations "Belgorod" and "Lipetsk" and a slight increase in the cold period at the meteorological stations "Voronezh" and "Kursk". The average HTC values for the observation period at the named meteorological stations were: "Voronezh" – 1.06, "Lipetsk" – 1.07, "Belgorod" – 1.03, "Kursk" – 1.25. In the last thirty years: "Voronezh" – 1.03, "Lipetsk" – 0.96, "Belgorod" – 0.94, "Kursk" – 1.22.

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 24-16-20047 "Population structure and intraspecific variability of dendrophenotypes of Scots pine and English oak as a basis for adaptive resistance to climate change and other external influences".

Keywords: weather stations, precipitation totals, drought, Selyaninov's hydrothermal coefficient, growing conditions for woody plants

Format of citation: Matveev S.M., Litovchenko D.A. Frequency and intensity of droughts and dynamics of the moisture regime in the Central forest-steppe // Prirodobustrojstvo. 2025. № 5. P. 136-145. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-136-145>

Введение. Закономерности климатического отклика лесобразующих древесных пород Центральной лесостепи (сосны обыкновенной и дуба черешчатого) выявляются по адаптивной реакции на повторяющиеся климатические события (засуха, высокие температуры). В свою очередь, анализ динамики климатических параметров за длительный период, сопоставимый с периодом жизни древесных растений, формирует необходимый базис для изучения закономерностей климатического отклика деревьев.

Лесистость Центральной лесостепи в настоящее время составляет 8-11% [1, 2] и далека от оптимальной (20-25%) [3]. Изменения климата, наблюдаемые в последние десятилетия, изменяют условия произрастания древесных растений. Значительные изменения климатических условий в региональном масштабе могут привести к сдвигам границ природных зон и, соответственно, границ лесосеменных районов для искусственного лесовосстановления и лесоразведения. Оценка динамики ключевых параметров климата за длительный период позволит уточнить границы лесосеменных районов, семенной материал которых подходит для лесовосстановления в Центральной лесостепи.

На динамику прироста древесных растений в течение периода вегетации в Центральной лесостепи влияют ключевые параметры климата: суммы атмосферных осадков и температуры воздуха, обуславливающие наступление либо влажных с благоприятным температурным режимом комфортных условий роста, либо засушливых с недостатком осадков и высокими температурами воздуха [4]. В свою очередь, режим климатических параметров обусловлен формой циркуляции атмосферы над территорией региона,

преобладанием циклонической либо антициклонической погоды [5].

Наблюдаемое во второй половине XX в. и первой четверти XXI в. глобальное потепление выражается рядом взаимосвязанных циркуляционных процессов и динамикой ключевых климатических параметров: сумм атмосферных осадков и температур воздуха [6, 7].

Динамика температур воздуха в регионе показывает значительный растущий тренд, в большей степени – в холодный период года, на фоне внутрисезонной и внутримесячной амплитуды температур (так называемые «качели»), особенно в XXI в. [8, 9]. Суммы атмосферных осадков значительно возросли во второй половине XX в. Однако в XXI в. значительный рост не наблюдается, но есть изменения средних значений по месяцам года и учащение повторяемости длительных засушливых периодов в различные сезоны года [10, 11]. На территории Центральной лесостепи зимой отмечается увеличение числа суток с большим количеством осадков (> 10 мм), а летом – напротив, их уменьшение.

Цель исследований: анализ повторяемости и интенсивности засух и динамики ключевых метеорологических факторов (сумм атмосферных осадков и температур воздуха) в Центральной лесостепи (ЦЛР), определяющих условия произрастания древесных растений.

Материалы и методы исследований. Для исследований использованы данные рядов наблюдений метеостанций: № 34123 «Воронеж» (51°42'55" с.ш., 39°12'57" в.д.), длительность ряда наблюдений – 152 года (1873-2024 гг.); № 27930 «Липецк» (52°70'45" с.ш., 39°52'79" в.д.), длительность ряда наблюдений – 85 лет (1940-2024 гг.); № 34214

«Белгород» (50°63'57» с.ш., 36°58'45» в.д.), длительность ряда наблюдений – 95 лет (1930-2024 гг.); № 34009 «Курск» (51°77'33» с.ш., 36°17'36» в.д.), длительность ряда наблюдений – 128 лет (1897-2024 гг.) [12].

Одним из наиболее часто используемых количественных показателей климата, особенно режима увлажнения, является гидротермический коэффициент Селянинова, определяемый в период со среднесуточными температурами воздуха выше 10°C (с так называемыми активными температурами, ограничивающими период активной вегетации растений). Гидротермический коэффициент (ГТК) разработан Г.Т. Селяниновым для климатических условий России. Для календарных месяцев, когда в условиях Центральной лесостепи наблюдаются только положительные среднесуточные температуры воздуха (май-сентябрь), С.М. Матвеевым [13] предложен упрощенный вариант расчета ГТК_{м-с} (не по среднесуточным температурам, а через среднемесячные температуры) по следующей формуле:

$$\text{ГТК}_{\text{м-с}} = \frac{\sum P_{\text{м-с}}}{\sum \text{ср.}t^{\circ}\text{C}_{\text{м-с}} \times 3,06}, \quad (1)$$

где ГТК_{м-с} – ГТК за май-сентябрь; P_{м-с} – сумма осадков за май-сентябрь; t[°]C_{м-с} – средняя температура воздуха за май-сентябрь.

Значения ГТК_{м-с} рассчитаны по четырем рассматриваемым метеостанциям за период мая-сентября. Значения ГТК_{м-с} выше 1 характеризуют условия нормального и избыточного увлажнения, ниже 1 – увлажнение недостаточное. Классификация зон увлажнения по ГТК_{м-с}: влажная – 1,6-1,3; слабо засушливая – 1,3-1,0;

засушливая – 1,0-0,7; очень засушливая – 0,7-0,4; сухая – <0,4 [14]. Колебания значений ГТК_{м-с} для зон неустойчивого увлажнения значительны и связаны с неравномерностью выпадения осадков.

Количественные характеристики связи ГТК за май-сентябрь с суммой атмосферных осадков и средних температур воздуха определены с помощью линейной корреляции Пирсона в пакете программ Microsoft Excel 2020:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где x_i – значения переменных в выборке X; y_i – значения переменных в выборке Y; \bar{x} – среднее арифметическое в выборке X; \bar{y} – среднее арифметическое в выборке Y.

В соответствии со шкалой Чеддока [15] связь считается слабой от 0 до 30%, умеренной – от 31 до 50%, значительной – от 51 до 70%, высокой (тесной) – от 71 до 90%, очень высокой (очень тесной) – от 91% и больше. Для анализа связи между независимыми переменными (предикторами) и зависимой переменной применяли линейную регрессию.

При обработке метеоданных и полученных значений ГТК_{м-с} определили следующие статистические показатели: среднее арифметическое; ошибка средней арифметической; коэффициент вариации; показатель достоверности среднего значения признака [15]. Графики и диаграммы построены в пакете программ Microsoft Excel 2020.

Принято считать нормой среднее значение метеорологической величины за многолетний



Рис. 1. Карта-схема расположения метеостанций:

«Воронеж» № 34123 (1); «Липецк» № 27930 (2); «Белгород» № 34214 (3); «Курск» № 34009 (4)

Fig. 1. Map-scheme of the location of meteorological stations:

“Voronezh”, No. 34123 (1), “Lipetsk”, No. 27930 (2), “Belgorod” No. 34214 (3), “Kursk” No. 34009 (4)

период. Расчет климатических норм производится по 30-летним периодам; в настоящее время действует норма 1991-2020 гг.

Результаты и их обсуждение. Условия существования и продуктивность древесных растений в различных районах земного шара определяют режимы теплообеспеченности и увлажнения. В регионе Центральной лесостепи древесные растения страдают от периодически повторяющихся засух [16-18]. В вековой динамике засух в Центральной лесостепи хорошо прослеживаются циклы: 11-летний (солнечный или Швабе-Вольфа); магнитный (Хейла); Брикнера – имеющие важное прогностическое значение [19]. Периодичность (цикличность) повторения сильных, с катастрофическими последствиями засух, коррелирует с циклом Брикнера (средний интервал повторяемости – 33-35 лет) [20]. В XX-XXI столетиях это засухи 1938-1939, 1971-1972, 2008-2010 гг. Для оценки динамики режимов теплообеспеченности и увлажнения в Российской Федерации предпочитают использовать комплексный показатель – ГТК [13, 14, 21-23]. Рассчитанное нами среднее значение ГТК_{м-с} за период 1873-2024 гг. по метеостанции «Воронеж» составило 1,06 при диапазоне его изменения от 0,42 (1891 г.) до 2,24 (1980 г.); среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,15$; коэффициент вариации $C_v = 0,36$. Коэффициент вариации превысил значение 0,33, что свидетельствует о большей вариативности рядов исходных значений (температур воздуха и сумм атмосферных осадков) на метеостанции «Воронеж».

Следует учесть, что по метеостанции «Воронеж» имеется самый длительный ряд наблюдений (с 1873 г.). Это, безусловно, увеличивает вариативность данных, однако прямая зависимость коэффициента вариации от длительности ряда

по данным других метеостанций региона не прослеживается. Среднее значение ГТК_{м-с} за период 1940-2024 гг. по метеостанции «Липецк» составило 1,07 при диапазоне его изменения от 0,38 (2010 г.) до 2,09 (1980 г.); среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,11$ (данные лежат очень близко к средней); коэффициент вариации $C_v = 0,28$. Среднее значение ГТК_{м-с} по метеостанции «Белгород» за 1930-2024 гг. составило 1,03 при варьировании от 0,26 (2024 г.) до 2,11 (1978 г.); среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,11$ (данные лежат очень близко к средней); коэффициент вариации $C_v = 0,31$. Среднее значение ГТК_{м-с} по метеостанции «Курск» за 1897-2024 гг. составило 1,25 при диапазоне от 0,39 (1938 г.) до 2,12 (1933 г.); среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,17$; коэффициент вариации $C_v = 0,25$; колебания вариационного ряда относительно средней невелики, что свидетельствует об однородной совокупности данных ($C_v < 0,33$). Среднее значение ГТК за период мая-сентября по метеостанции «Курск» выше, чем по другим исследуемым метеостанциям, однако остается в зоне увлажнения от 1 до 1,3 (слабо засушливая).

Для проведения сравнительного анализа за одинаковый временной интервал возьмем данные по минимальному ряду («Липецк»), то есть с 1940 по 2024 гг. (табл. 1).

Как следует из данных таблицы 1, значений ГТК за период мая-сентября свыше 1,3 по метеостанции «Курск» больше, чем на других метеостанциях (34), что является следствием особенностей циркуляции атмосферы, рельефа местности и расположения Курской области в северо-западной части Центральной лесостепи. В других областях Центральной лесостепи снижается влияние атлантических циклонов [24]. Значение ГТК_{м-с} < 0,3 наблюдалось только

Таблица 1. Повторяемость (количество лет) значений ГТК за период май-сентябрь различных диапазонов увлажнения-засушливости с 1940 по 2024 гг. по данным метеостанций «Воронеж», «Липецк», «Белгород», «Курск»

Table 1. Frequency (number of years) of the HTC for the period of May-September values for different humidification-aridity ranges from 1940 to 2024 according to the data of the meteorological stations “Voronezh”, “Lipetsk”, “Belgorod”, “Kursk”

Диапазоны ГТК HTC ranges	Интенсивность засухи Drought intensity	Количество лет по диапазонам для метеостанций Number of years by ranges for weather stations			
		«Воронеж» «Voronezh»	«Липецк» «Lipetsk»	«Белгород» «Belgorod»	«Курск» «Kursk»
> 1,3	–	20	20	18	34
1,0-1,3	–	24	30	28	28
0,8-1,0	Слабая / weak	24	19	19	17
0,6-0,8	Умеренная / moderate	13	10	14	3
0,3-0,6	Сильная / strong	4	6	5	3
< 0,3	Экстремальная / extreme	–	–	1	–

на метеостанции «Белгород» в 2024 г. По метеостанции «Воронеж» отметили равное количество лет для двух диапазонов: 1,0-1,3 и 0,8-1,0. Значения ГТК по метеостанции «Липецк» в отдельные, наиболее засушливые годы (1972, 1977, 1984, 2002, 2010, 2018 гг.) [12], показывают более глубокие минимумы относительно значений других метеостанций. Значения ГТК_{м-с} по метеостанции «Воронеж», и особенно по метеостанции «Курск», показывают наибольшую вариативность. По метеостанции «Курск» наблюдаются и более высокие значения. Годы экстремальных значений ГТК за май-сентябрь по четырем метеостанциям совпадают далеко не всегда (рис. 2).

Для выявления вклада колебаний значений осадков и температур теплого периода

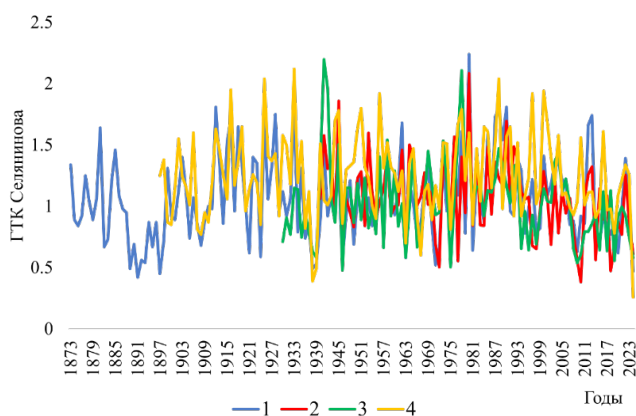


Рис. 2. Динамика ГТК Селянинова по данным метеостанций «Воронеж» (1), «Липецк» (2), «Белгород» (3), «Курск» (4)

Fig. 2. Dynamics of the Selyaninov HTC according to the data from the meteorological stations "Voronezh" (1), "Lipetsk" (2); "Belgorod" (3); "Kursk" (4)

в динамику комплексного показателя ГТК_{м-с} проведен попарный корреляционный анализ значений названных параметров на примере наиболее длительного ряда (152 года) метеостанции «Воронеж». Выявлен сильный вклад сумм осадков вегетационного периода в значения ГТК_{м-с}, связь характеризуется как очень высокая: $r = 0,91$ (рис. 3). Вариативность значений сумм атмосферных осадков сравнительно слабая, с редкими значительными отклонениями (от 263 до 824 мм) [12]. Вклад в изменения значений ГТК_{м-с} температур воздуха меньше, чем осадков, однако связь характеризуется как значительная $r = 0,69$, причем вариативность значений температур заметно больше (от 2,6 до 9°C) [12].

Сравнительный анализ средних значений ГТК за период мая-сентября, сумм атмосферных осадков за год и среднегодовых температур воздуха по 30-летним климатическим периодам для четырех метеостанций Центральной лесостепи представлен в таблице 2. Для оценки и наглядного представления направления многолетних изменений засушливости и увлажненности [11, 25] на исследуемых метеостанциях на рисунке 4 представлены тренды (полиномиальный и линейный) ГТК_{м-с} за 85 лет (период наблюдений, имеющийся по всем метеостанциям).

Динамика значений ГТК_{м-с} по метеостанции «Воронеж» менялась за 85 лет наблюдений циклически, с практически ровным линейным трендом (рис. 4, табл. 2), линейные тренды значений ГТК_{м-с} по данным трех других метеостанций показывают снижение уровня влагообеспеченности территории Центральной лесостепи.

С 1873 по 1961 гг. наблюдалось снижение сумм атмосферных осадков по метеостанции

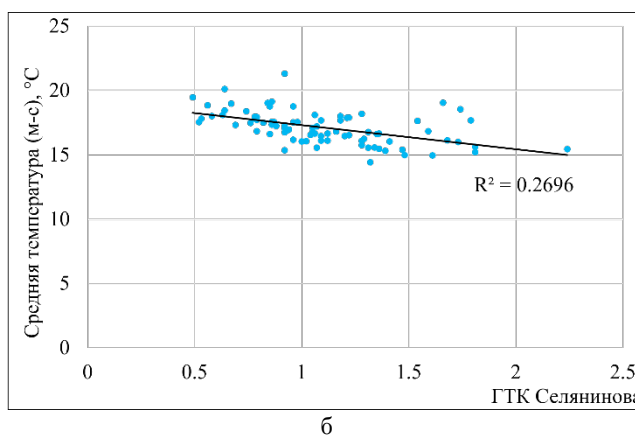
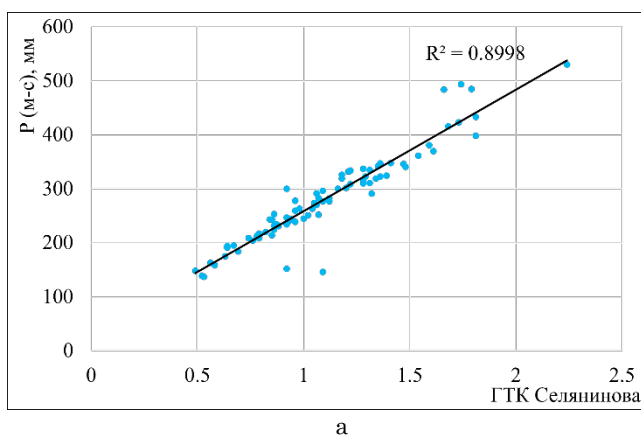


Рис. 3. Доля влияния сумм атмосферных осадков за вегетационный период (а) и средней температуры воздуха (б) на изменения значений ГТК Селянинова за май-сентябрь по метеостанции «Воронеж»

Fig. 3. The share of influence of the total amount of atmospheric precipitation during the growing season (a) and the average air temperature (b) in the change in the values of the Selyaninov hydrothermal coefficient for the period May-September at the Voronezh weather station

«Воронеж»), а с 1961 по 2020 гг. – значительный рост (на 100 мм). В результате с 1873 по 2020 гг. произошло увеличение сумм атмосферных осадков, что в комплексе с ростом температур теплого периода могло привести к некоторой оптимизации гидротермического режима (растущий тренд $ГТК_{м-с}$) в отношении благоприятствования росту древесных растений. Однако в последнем 30-летнем климатическом периоде наблюдается значительное снижение значений $ГТК_{м-с}$ (рис. 4, табл. 2), то есть ухудшение условий роста древесных растений.

На трех других метеостанциях с более короткими рядами наблюдений сглаженные колебания сумм атмосферных осадков имеют меньшую амплитуду, а линейные тренды значений $ГТК_{м-с}$ снижаются, и особенно

интенсивно – в последнем 30-летнем периоде. Наиболее высокие средние значения $ГТК_{м-с}$ наблюдаются на метеостанции «Курск». Разнонаправленные тренды температур воздуха, и особенно сумм атмосферных осадков, на различных метеостанциях наблюдаются и в других регионах мира [26, 27].

При исследовании закономерностей динамики увлажнения, по данным наблюдений сумм атмосферных осадков за год на метеостанциях «Воронеж» и «Липецк» [12], можно выделить глубокие совпадающие минимумы в 1949, 1984, 1991, 2008-2009, 2014 гг.

В XXI в. на метеостанции «Липецк» наблюдаются наиболее глубокие минимумы сумм атмосферных осадков – глубже, чем на метеостанции «Воронеж». В настоящее время климатическая норма сумм атмосферных осадков за год для г. Воронежа составляет 583 мм, для г. Липецка – 491 мм. Максимальное количество осадков на метеостанции «Воронеж» отмечено в 2012 г. (874 мм), минимальное – в 1891 г. (263 мм). В последнее десятилетие (с 2012 по 2022 гг.) наблюдается максимальная амплитуда колебаний годовых сумм атмосферных осадков. При этом 2014 г. был одним из самых засушливых, а 2012 и 2023 гг. – самыми увлажненными за весь период наблюдений.

Значения годовых сумм атмосферных осадков по расположенным западнее метеостанциям «Белгород» и «Курск» (рис. 1) показывают сходную амплитуду колебаний. Суммы атмосферных осадков за год по метеостанции «Белгород» заметно ниже, чем по метеостанции «Курск». Наиболее глубокие минимумы по метеостанции «Белгород» отмечены в 1946 г. (316 мм), в 1975 г. – 333 мм, 2008 г. – 388 мм. Наибольший

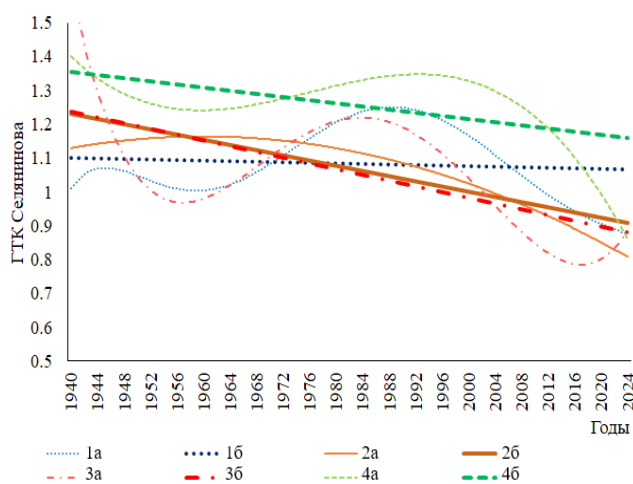


Рис. 4. Полиномиальная (а) и линейная (б) линии тренда $ГТК$

Fig. 4. Polynomial (a) and linear (b) trend lines of the HTC for meteorological stations: “Voronezh” (1), “Belgorod” (2), “Lipetsk” (3), “Kursk” (4)

Таблица 2. Средние значения по 30-летним климатическим периодам (норма) сумм атмосферных осадков за год (P, мм), среднегодовых температур воздуха (t, °C) и $ГТК$ Селянинова за период май-сентябрь по исследуемым метеостанциям

Table 2. Average values for 30-year climatic periods (norm) of annual precipitation amounts (P, mm), average annual air temperatures (t, °C) and Selyaninov hydrothermal coefficient for the period of May-September at the studied meteorological stations

Метеостанция Meteorological stations	«Воронеж» “Voronezh”			«Липецк» “Lipetsk”			«Белгород» “Belgorod”			«Курск» “Kursk”		
	P, мм	t, °C	ГТК	P, мм	t, °C	ГТК	P, мм	t, °C	ГТК	P, мм	t, °C	ГТК
1873-1900	515	5,5	0,91	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1901-1930	508	5,3	1,16	–	–	–	–	–	–	624	5,3	1,27
1931-1960	480	5,5	1,02	569	4,8	1,15	548	6,1	1,05	648	5,5	1,28
1961-1990	580	6,1	1,18	545	5,0	1,15	582	6,4	1,15	616	5,7	1,27
1991-2020	583	7,5	1,03	491	6,3	0,96	529	7,7	0,94	632	7,1	1,22

максимум выпавших атмосферных осадков выявлен в 2016 г. по метеостанции «Курск» – 965 мм.

Анализ динамики минимумов атмосферных осадков относительно нормы 1991-2020 гг. за весь период наблюдения (1873-2024 гг.) по метеостанции «Воронеж» выявил аномальные значения выпавших осадков в отдельные годы и месяцы. Разница в отдельные месяцы составляет от 8 раз в июне 1960 г. (7 мм) относительно нормы (61 мм) до 390 раз в феврале 1931 г. (0,1 мм) относительно нормы (39 мм). В 2024 г. наблюдалось минимальное количество выпавших осадков в отдельные месяцы: март – 3 мм относительно нормы 38 мм; сентябрь – 0 мм относительно нормы 51 мм [12].

В условиях наблюдающихся изменений климата изменяются не только количественные характеристики режима увлажнения (суммы атмосферных осадков), но и их распределение в течение года. Результаты осредненных сумм атмосферных осадков за два 30-летних климатических периода, в теплый и холодный периоды, оценены по t-критерию Стьюдента ($t_{st} = 2,0$) для выявления значимых различий между периодами (табл. 3). Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения по t-критерию Стьюдента ($P < 0,05$).

Как следует из данных таблицы 3, за два климатических периода (1961-1990 гг.

и 1991-2020 гг.) по метеостанции «Воронеж» наблюдаются снижение средних значений сумм атмосферных осадков теплого периода и рост холодного (меньший, чем снижение теплого, на 10 мм). По метеостанции «Липецк» также наблюдается снижение осадков теплого периода, но и статистически значимое снижение осадков холодного периода (на 38 мм). По метеостанции «Белгород» аналогичная метеостанции «Липецк» тенденция статистически значима для снижения осадков теплого периода (на 46 мм). По метеостанции «Курск» средние суммы осадков теплого периода практически не изменились, а холодного периода – выросли (статистически незначимо, на 16 мм).

В последнем 30-летнем периоде (1991-2020 гг.) в Центральной лесостепи увеличились амплитуды колебаний среднемесячных и среднегодовых значений ключевых характеристик климата (температур воздуха и сумм атмосферных осадков) на фоне общего повышения значений температур воздуха (особенно января-марта и летних месяцев [12]). Поскольку суммы атмосферных осадков за тот же период показали неравномерное перераспределение по теплому и холодному периодам без общего повышения, наблюдаются учащение засух и повышение их интенсивности.

Таблица 3. Средние значения сумм атмосферных осадков (P, мм) тёплого и холодного периодов за два тридцатилетних климатических периода с оценкой значимости различий на 5%-ном уровне

Table 3. Average values of precipitation amounts (P, mm) of warm and cold periods for two thirty-year climatic periods with an assessment of the significance of differences at the 5% level

Метеостанция <i>Meteorological stations</i>	(1961-1990 гг.) / (1991-2020 гг.) (1961-1990) / (1991-2020)		Знач. t-критерия на 5%-м уровне <i>t-test values at 5% level</i>	
	Теплый период <i>Warm period</i>	Холодный период <i>Cold period</i>	Теплый период <i>Warm period</i>	Холодный период <i>Cold period</i>
«Воронеж» / <i>Voronezh</i>	336,6 / 310,1	246,3 / 261,6	1,23	0,94
«Липецк» / <i>Lipetsk</i>	315,9 / 282,8	237,1 / 198,7	1,79	3,01
«Белгород» / <i>Belgorod</i>	330,8 / 284,0	255,0 / 238,6	2,64	0,94
«Курск» / <i>Kursk</i>	349,4 / 349,8	266,6 / 282,8	0,02	0,80

Выводы

Самая увлажненная в Центральной лесостепи – метеостанция «Курск» в 1991-2020 гг. (норма сумм атмосферных осадков составляет 632 мм, ГТК за период май-сентябрь – 1,22), наиболее засушливые – «Липецк» (норма сумм атмосферных осадков составляет 491 мм, ГТК_{м-с} – 0,96) и «Белгород» (норма сумм атмосферных осадков – 529 мм, ГТК_{м-с} – 0,94) (табл. 2).

По метеостанции «Воронеж» норма сумм атмосферных осадков составляет 583 мм,

ГТК_{м-с} – 1,03. Повторяемость сильных засух (ГТК_{м-с} 0,3-0,6) по названным метеостанциям за последние 85 лет (1940-2024) составляет от 3 до 6, умеренных (ГТК_{м-с} 0,6-0,8) – от 3 по метеостанции «Курск» до 14 по метеостанции «Белгород».

Динамика значений ГТК за май-сентябрь показывает общее снижение уровня влагообеспеченности территории Центральной лесостепи, особенно в последнем тридцатилетии. По всем метеостанциям наблюдается значительный рост средних температур воздуха в XX и XI вв. Вклад

значений осадков в ГТК_{м-с} больше (0,91), чем температур (0,69), при этом значения температур показывают большую вариативность. Распределение сумм атмосферных осадков теплого и холодного периодов за два 30-летних климатических периода (1961-1990 гг.)/(1991-2020 гг.) показывает разнонаправленные тренды: по метеостанциям «Белгород» и «Липецк» наблюдается снижение и в теплом, и в холодном периодах,

по метеостанциям «Воронеж» и «Курск» – небольшой рост в холодном периоде.

В целом в Центральной лесостепи условия увлажнения теплого периода, лимитирующие рост древесных растений в регионе, показывают тенденцию снижения на фоне повышения среднегодовых температур воздуха, что неблагоприятно сказывается на росте древесных растений.

Список использованных источников

1. Мусиевский А.Л. Динамика лесистости и структуры лесного фонда Воронежской области // Лесотехнический журнал, 2013. Т. 3. С. 13-21. DOI: 10.12737/1767
2. Аничкина Н.В. Состояние лесов Липецкой области как результат взаимодействия природы и человека // Успехи современного естествознания, 2015. № 12. С. 64-67; URL: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35724> (дата обращения: 14.08.2025).
3. Лозовой А.Д. Лесистость и ее оптимальность для условий Центрального Черноземья // Материалы Всероссийской научно-технической конференции, «Динамика лесистости в малолесных районах Европейской части России. Проблемы и перспективы». Воронеж: ВГЛУ, 2003. С. 9-12.
4. Костебелова С.А. Изменение климата за последние 50 лет в Воронежской области / С.А. Костебелова, А.А. Мажонченко // Материалы международной научно-практической конференции «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы». Воронеж: Изд-во «Цифровая полиграфия», 2019. С. 20-24. EDN: ATHDYC
5. Дмитриева В.А. Термический режим г. Воронежа на фоне глобального потепления климат // Вестник ВГУ, серия География и Геоэкология, 2001. № 1. С. 129-135. EDN: SLHPRB
6. Черенкова Е.А. Региональные особенности засух на юге европейской территории России и их связь с изменениями атмосферной циркуляции // Международная научно-практическая конференция «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы». Воронеж: Изд-во «Цифровая полиграфия», 2019. С. 65-72.
7. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2022. Общее резюме. СПб: Наукоемкие технологии. 124 с.
8. Переведенцев Ю.П. Современные изменения климата и их последствия // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География и геоэкология, 2019. № 2. С. 98-102. EDN: NMCTYA
9. Дмитриева В.А. Региональная пространственно-временная изменчивость годовой и сезонной температуры воздуха // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология, 2024. № 1. С. 97-104. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2024/1/97-104.
10. Уткузова Д.Н. Статистический анализ эпизодов экстремальной засухливости и увлажненности на территории РФ / Д.Н. Уткузова, В.М. Хан, Р.М. Вильфанд // Оптика атмосферы и океана, 2015. Т. 28. № 1. С. 66-75. EDN: TEDBBL
11. Золотокрылин А.Н. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами / А.Н. Золотокрылин, Е.А. Черенкова, Т.Б. Титкова // Известия РАН. Сер. Геогр., 2020. Т. 84. № 2. С. 207-217. DOI: 10.31857/S258755662002017X, EDN: SFCKUS

References

1. Musievsky A.L. Dynamics of forest cover and structure of the forest fund of the Voronezh region // Forestry Engineering journal, 2013. Vol. 3. P. 13-21. DOI: 10.12737/1767
2. Anichkina N.V. State of forests of the Lipetsk region as a result of interaction between nature and man // Advances in modern natural science, 2015. No. 12. P. 64-67; URL: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35724> (date of access: 14.08.2025).
3. Lozovoy A.D. Forest cover and its optimality for the conditions of the Central Black Earth Region // Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference, "Dynamics of forest cover in sparsely forested areas of the European part of Russia. Problems and prospects". Voronezh: VGTU, 2003. P. 9-12.
4. Kostebelova S.A. Climate change over the past 50 years in the Voronezh region / S.A. Kostebelova, A.A. Makhonchenko // Proceedings of the international scientific and practical conference "Global climate change: regional effects, models, forecasts". Voronezh, 2019. P. 20-24. EDN: ATHDYC
5. Dmitrieva V.A. Thermal regime of Voronezh against the background of global warming. VSU Bulletin, Geography and Geocology series, 2001. No. 1. P. 129-135. EDN: SLHPRB
6. Cherenkova E.A. Regional features of droughts in the south of European Russia and their relationship with changes in atmospheric circulation. International scientific and practical conference "Global climate change: regional effects, models, forecasts". Voronezh, 2019. P. 65-72.
7. The Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation. 2022. General Summary. Saint Petersburg: Science-Intensive Technologies. 124 p.
8. Perevedentsev Yu.P. Modern Climate Change and Its Consequences. Voronezh State University Bulletin. Series: Geography and Geocology, 2019. No. 2. P. 98-102. EDN: NMCTYA
9. Dmitrieva V.A. Regional Spatio-Temporal Variability of Annual and Seasonal Air Temperature. Voronezh State University Bulletin. Series: Geography. Geocology, 2024. No. 1. P. 97-104. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2024/1/97-104.
10. Utkuzova D.N. Statistical analysis of episodes of extreme drought and humidity in the territory of the Russian Federation / D.N. Utkuzova, V.M. Khan, R.M. Vilfand // Optics of the atmosphere and ocean, 2015. Vol. 28. No. 1. P. 66-75. EDN: TEDBBL
11. Zolotokrylin A.N. Aridization of arid lands of the European part of Russia and the relationship with droughts / A.N. Zolotokrylin, E.A. Cherenkova, T.B. Titkova // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Series: Geogr., 2020. Vol. 84. No. 2. P. 207-217. EDN: QKMMQN
12. Weather and climate. Official website. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/>. Date of access: 14.08.2025.

12. Погода и климат. Официальный сайт. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/>. Дата обращения: 14.08.2025.
13. Матвеев С.М. Дендроиндикация динамики состояния сосновых насаждений Центральной лесостепи. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. 272 с. EDN: QKMMQN
14. Страшная А.И. Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет / А.И. Страшная, Т.А. Максименкова, О.В. Чуб // Труды Гидрометцентра России, 2011. Вып. 345. С. 194-214.
15. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки: учебник. М.: Колос, 2011. 547 с.
16. Акимов Л.М. Пространственно-временные закономерности атмосферных засух на территории Воронежской области в вегетационный период // Аридные экосистемы, 2013. Т. 19. № 2 (55). С. 15-20. EDN: RABHLN
17. Матвеев С.М. Динамика ключевых характеристик климата Воронежской области с 1961 по 2018 гг. и её отражение в приросте древостоев сосны обыкновенной / С.М. Матвеев, Д.А. Тимащук // В сборнике: Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. Материалы международной научно-практической конференции. Под общей редакцией С.А. Куролапа, Л.М. Акимова, В.А. Дмитриевой. Воронеж: Изд-во «Цифровая полиграфия», 2019. С. 90-93. EDN: CHAEHL
18. Матвеев С.М. Особенности реакции на климатические условия радиального прироста деревьев сосны обыкновенной 100-140-летнего возраста (Воронежский биосферный заповедник) / С.М. Матвеев, Д.А. Литовченко // В сборнике: Лесные экосистемы как глобальный ресурс биосферы: вызовы, угрозы, решения в контексте изменения климата. Материалы Международного лесного форума. Отв. редактор Н.В. Яковенко. Воронеж: Изд-во ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2022. С. 64-74. EDN: CHAEHL
19. Кулик К.Н. Катастрофические засухи в степной Европейской части России, их дендрохронологическая индикация и связь с цикличностью солнечной активности / К.Н. Кулик, А.Т. Барабанов, В.И. Панов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2016. Т. 18. № 2(2). С. 438-443.
20. Матвеев С.М. Дендроклиматический анализ 200-летнего древостоя сосны обыкновенной в Воронежском биосферном заповеднике / С.М. Матвеев, Д.А. Тимащук // Лесоведение, 2019. № 2. С. 93-104. DOI: 10.1134/S0024114819020074, EDN: VUFBCG
21. Селянинов Г.Т. Методика сельскохозяйственной характеристики климата. В кн.: Мировой агроклиматический справочник: Л-М: 1937. 428 с.
22. Таранков В.И. Влияние климатических и антропогенных факторов на состояние и продуктивность сосновых насаждений зеленой зоны г. Воронежа. Сосновые леса России в системе многоцелевого лесопользования: Тез. Всерос. Конф. Воронеж, 1993. С. 94-96.
23. Мещерская А.В. Засуха 2010 г. на фоне многолетнего изменения засушливости в основных зерносеющих районах европейской части России / А.В. Мещерская, В.М. Мирвис, М.П. Голод // Тр. ГГО. Вып. 2011. 563. 318 с. EDN: PGOTWD
24. Акимов Л.М. Современные изменения агроклиматического потенциала Центрально-Черноземного района / Л.М. Акимов, Е.Л. Акимов // Метеорология и гидрология, 2023. № 10. С. 25-36. EDN: OWJUNO
25. Dong T., Liu J., Liu D.H., He P.X., Li Z., Shi M.J., Xu J. Characteristics of the Spatiotemporal Variability of Climate Extremes in Xinjiang during 1960-2019. Environ. Sci. Pollut. R, 2023. 30. 57316-57330. DOI: 10.1007/s11356-023-26514-3
13. Matveev S.M. Dendroindication of the dynamics of the state of pine stands in the Central forest-steppe. Voronezh: VSU Publishing House, 2003. 272 p. EDN: QKMMQN
14. Strashnaya A.I. Agrometeorological features of the 2010 drought in Russia compared to droughts of past years / A.I. Strashnaya, T.A. Maksimenkova, O.V. Chub // Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia, 2011. Issue. 345. P. 194-214.
15. Dospikhov B.A. Methodology of field experiment with the basics of statistical processing: tutorial. Moscow: "Kolos", 2011. 547 p.
16. Akimov L.M. Spatio-temporal patterns of atmospheric droughts in the Voronezh region during the growing season. Arid ecosystems, 2013. Vol. 19. No. 2 (55). P. 15-20. EDN: RABHLN
17. Matveev S.M. Dynamics of key climate characteristics of the Voronezh region from 1961 to 2018. and its reflection in the growth of Scots pine stands / S.M. Matveev, D.A. Timashchuk // In the collection: Global climate change: regional effects, models, forecasts. Proceedings of the international scientific and practical conference. Under the general editorship of S.A. Kurolap, L.M. Akimova, V.A. Dmitrieva, 2019. P. 90-93. EDN: CHAEHL
18. Matveev S.M. Features of the reaction to climatic conditions of the radial growth of 100-140-year-old Scots pine trees (Voronezh Biosphere Reserve) / S.M. Matveev, D.A. Litovchenko // In the collection: Forest ecosystems as a global resource of the biosphere: challenges, threats, solutions in the context of climate change. Proceedings of the International Forestry Forum. Responsible. editor N.V. Yakovenko. Voronezh, 2022. P. 64-74. EDN: CHAEHL
19. Kulik K.N. Catastrophic droughts in the steppe European part of Russia, their dendrochronological indication and connection with the cyclicity of solar activity / K.N. Kulik, A.T. Barabanov, V.I. Panov // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2016. Vol. 18. No. 2(2). P. 438-443. VUFBCG
20. Matveev S.M. Dendroclimatic analysis of a 200-year-old Scots pine stand in the Voronezh Biosphere Reserve / S.M. Matveev, D.A. Timashchuk // Lesovedenie, 2019. No. 2. P. 93-104 DOI: 10.1134/S0024114819020074 EDN: VUFBCG
21. Selyaninov G.T. Methodology of agricultural climate characteristics. In the book: World agroclimatic reference: L. M, 1937. 428 p.
22. Tarankov V.I. Influence of climatic and anthropogenic factors on the condition and productivity of pine plantations in the green zone of Voronezh. Pine forests of Russia in the system of multi-purpose forest management: Abstracts of the All-Russian Conf. Voronezh, 1993. P. 94-96. EDN: PGOTWD
23. Meshcherskaya A.V. The 2010 Drought Against the Background of Long-Term Changes in Aridity in the Main Grain-Growing Regions of European Russia / A.V. Meshcherskaya, V.M. Mirvis, M.P. Golod // Tr. GGO. Issue, 2011. 563. 318 p. EDN: PGOTWD
24. Akimov L.M. Modern changes in the agroclimatic potential of the Central Black Earth region / L.M. Akimov, E.L. Akimov // Meteorology and Hydrology, 2023. No. 10. P. 25-36. EDN: OWJUNO
25. Dong T., Liu J., Liu D.H., He P.X., Li Z., Shi M.J., Xu J. Characteristics of the Spatiotemporal Variability of Climate Extremes in Xinjiang during 1960-2019. Environ. Sci. Pollut. R, 2023. 30. 57316-57330. DOI: 10.1007/s11356-023-26514-3

Environ. Sci. Pollut. R., 2023. 30. 57316-57330. DOI: 10.1007/s11356-023-26514-3

26. Wang C.X., Chen C., Zhang S.Q., Ma Z.F., Pang Y.M. Variation characteristics of extreme climate events in South-west China from 1961 to 2017. *Heliyon*, 2023. 9. e19648. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19648

27. Du H.B., Donat M.G., Zong S.W., Alexander L.V., Manzanas R., Kruger A., Choi G., Salinger J., He H.S., Li M.H., et al. Extreme Precipitation on Consecutive Days Occurs More Often in a Warming Climate. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2022. 103. E1130-E1145

26. Wang C.X., Chen C., Zhang S.Q., Ma Z.F., Pang Y.M. Variation characteristics of extreme climate events in South-west China from 1961 to 2017. *Heliyon*, 2023. 9. e19648. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19648

27. Du H.B., Donat M.G., Zong S.W., Alexander L.V., Manzanas R., Kruger A., Choi G., Salinger J., He H.S., Li M.H., et al. Extreme Precipitation on Consecutive Days Occurs More Often in a Warming Climate. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2022. 103. E1130-E1145

Об авторах

Сергей Михайлович Матвеев, профессор, д-р биолог. наук, заведующий кафедрой, ORCID: 0000-0001-8532-1484; Scopus: 57191472414; РИНЦ ID: 133854; WOS Research ID: Q-5614-2016; lisovod@bk.ru

Дарья Андреевна Литовченко, канд. биолог. наук, доцент, ORCID: 0000-0003-2973-7447; Scopus: 57192711518; РИНЦ ID: 745766; WOS Research ID: T-9721-2019; timashchuk90@mail.ru

About the authors

Sergey M. Matveev, DSs (Bio), professor, head of department, ORCID: 0000-0001-8532-1484; Scopus: 57191472414; RSCID: 133854; WOS Research ID: Q-5614-2016; lisovod@bk.ru

Darya A. Litovchenko, CSs (Bio), associate professor, ORCID: 0000-0003-2973-7447; Scopus: 57192711518; RSCI ID: 745766; WOS Research ID: T-9721-2019; timashchuk90@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

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

Matveev S.M., Litovchenko D.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Matveev S.M., Litovchenko D.A. have a copyright for the article and are responsible for plagiarism.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of the 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 18.06.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 17.09.2025

Принята к публикации после доработки / Accepted for publication 04.10.2025

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-146-150>

УДК 630*: 582.475:630.232



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСТАНДАРТНОГО ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА И СТИМУЛИРУЮЩЕГО ПРЕПАРАТА В ХОДЕ СОЗДАНИЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР ЕЛИ

А.Ю. Ушаков^{1✉}, В.А. Савченкова², Н.Г. Иванкин³

^{1,2,3}Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал; 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1, Россия

¹ushakov-les@yandex.ru, ORCID: 0009-0009-8353-473X

²v9651658826@yandex.ru; orcid: 0000-0001-8593-7887

³nikgen74@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6498-8458

Аннотация. В статье рассматривается вопрос повышения эффективности искусственного лесовосстановления при создании лесных культур ели европейской. Внимание уделяется сравнению биометрических показателей лесных культур, созданных с использованием стандартного и нестандартного посадочного материала. Эксперимент проводился с применением методики, предложенной Г.К. Незабудкиным, на пробной площади 0,5 га. Результаты показали, что средний годичный прирост осевого побега в высоту у лесных культур, созданных нестандартным посадочным материалом, составил 4,1 см (52% от высоты сеянца на этапе закладки), в то время как у культур со стандартным материалом – 5,2 см (33% от высоты сеянцев). Рассмотрено применение биологически активного органо-минерального комплекса на основе торфа «Гумитон» для обработки корневой системы сеянцев ели перед посадкой. Эксперимент проводился весной 2024 г., и результаты показали положительную динамику прироста осевого побега у обработанных препаратом сеянцев. Результаты исследований могут быть полезны для специалистов в области лесного хозяйства, занимающихся вопросами лесовосстановления и улучшения качественных показателей посадочного материала.

Ключевые слова: лесные культуры, ель европейская, лесовосстановление, торф, «Гумитон», стимулирующий препарат, нестандартный посадочный материал

Формат цитирования: Ушаков А.Ю., Савченкова В.А., Иванкин Н.Г. Использование нестандартного посадочного материала и стимулирующего препарата в ходе создания лесных культур ели // Природообустройство. 2025. № 5. С. 146-150. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-146-150>

Original article

USING NON-STANDARD PLANTING MATERIAL AND A STIMULATING DRUG DURING THE CREATION OF SPRUCE FOREST CROPS

A.Y. Ushakov¹, V.A. Savchenkova², N.G. Ivankin³

^{1,2,3}Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Mytishchi Branch; 1-ya Institutskaya str., Mytishchi, Moscow region, 141005, Russia

¹ushakov-les@yandex.ru, ORCID: 0009-0009-8353-473X

²v9651658826@yandex.ru; orcid: 0000-0001-8593-7887

³nikgen74@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6498-8458

Abstract. The article discusses the issue of increasing the efficiency of artificial reforestation in the creation of European spruce forest crops. Attention is paid to comparing biometric indicators of forest crops created using standard and non-standard planting material. The experiment was carried out using the methodology proposed by G.K. Nezabudkin on a trial area of 0.5 hectares. The results showed that the average annual increase in axial shoot height in forest crops created with non-standard planting material was 4.1 cm (52% of the seedling height at the laying stage), while in crops with standard material it was 5.2 cm (33% of the seedling height). The article also discusses the use of a biologically active organo-mineral complex based on peat “Gumiton” for the treatment of the root system of spruce seedlings before planting. The experiment was conducted in the spring of 2024, and the results showed a positive trend in axial shoot growth in seedlings treated with the drug. The study may be useful for forestry specialists involved in reforestation and improving the quality of planting material.

Keywords: forest crops, Norway spruce, reforestation, Gumiton peat, stimulating preparation, non-standard planting material

Format of citation: Ushakov A.Y., Savchenkova V.A., Ivankin N.G. Using non-standard planting material and a stimulating drug during the creation of spruce forest crops // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 146-150. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-146-150>

Введение. Для формирования лесного насаждения требуется длительное время, так как активная часть процесса лесовосстановления после вырубki занимает до 20 лет в условиях Центральной части Восточно-Европейской равнины в зоне хвойно-широколиственных лесов. В связи с этим требуются многолетние наблюдения на экспериментальных участках. Такого рода исследования помогают выявить закономерности, особенности изменения лесорастительных условий после рубки и их влияние на создаваемые лесные культуры. Изменение условий окружающей среды (освещенности, влажности, температуры почвы и воздуха) может существенно отразиться на смене пород, напочвенного покрова, подлеска, молодого поколения под пологом, а также на морфологических и биологических особенностях растений [1].

На схожих вырубках наблюдаются разные типы естественного лесовосстановления вследствие природных процессов (изменение условий окружающей среды, повышение количества видов растений, особые условия для роста и развития подростa лиственных пород, изменение химических свойств почвы, заболачивание или разболачивание заболоченной вырубki, возобновление может быть семенным или вегетативным). Они зависят от большого количества факторов, в том числе неуправляемых, которые невозможно спрогнозировать, и, безусловно, влияют на ход искусственного лесовосстановления – как положительно, так и негативно [2]. Лиственные породы – в частности, береза, в течение нескольких первых лет после рубки улучшают почвенные и гидрологические условия; происходит постепенное разболачивание и формируется органическое вещество почвы. Все эти процессы способствуют созданию условий, подходящих для возобновления основной лесобразующей породы, и росту, развитию ели под пологом лиственных пород [3].

Актуальными задачами лесного хозяйства являются: исследование лесных культур ели; повышение качества создаваемых культур и их приживаемости; дальнейшее выращивание в перспективе [4].

Создание лесных культур представляет собой ключевой аспект процесса воспроизводства высокопродуктивных лесов, который находится в прямой зависимости от качества используемого посадочного материала, а также от методологии, применяемой при создании лесных культур.

Исследования проводились в условиях хвойно-широколиственных лесов на территории

Калужской области с использованием посадочного материала, параметры которого приведены в таблице 1, соответствующего (далее – стандартный) и не соответствующего (далее – нестандартный) Правилам лесовосстановления [5] и ОСТ 56-98-93.

Цель исследований: повышение эффективности искусственного лесовосстановления при создании лесных культур ели европейской (*Picea abies*).

Материалы и методы исследований. Заложены 2 пробные площади размером по 0,5 га каждая. Подготовка почвы проводилась плугом ПКЛ-70, ширина между рядами составила 3,5 м, шаг посадки – 56 см. Сеянцы ели с открытой корневой системой высажены в дно борозды под меч Колесова.

В лесных культурах ели произведены учет посадочных мест и замеры биометрических показателей в количестве, необходимом для обеспечения точности измерений до 5%. По каждому растению было установлено его состояние, а также измерены высота, диаметр стволика у корневой шейки, годичный прирост осевого и бокового побегов.

Для измерений была применена методика, предложенная Г.К. Незабудкиным [6]. Опытные участки были заложены по общепринятой методике. Полевой эксперимент проведен в соответствии с методикой, разработанной Б.А. Доспеховым [7]. Измерение биометрических характеристик лесных культур произведено на пробных площадях в полевых условиях с использованием общепринятых методик. Для определения высоты, а также осевого и бокового прироста использовалась измерительная линейка с точностью до 1 мм. Диаметр у корневой шейки измерялся с помощью штангенциркуля с такой же точностью. Полученные данные обработаны в программе Excel, в результате чего были определены средние значения исследуемых параметров для каждого из вариантов.

Из данных таблицы следует, что стандартный посадочный материал составил 50% от общего объема используемых в эксперименте сеянцев, нестандартный – также 50%.

Пробная площадь была заложена весной 2024 г. на площади 0,5 га. Промежуточные результаты по приросту и приживаемости получены в конце вегетационного периода 2024 г. (табл. 2).

Результаты и их обсуждение. Средний годичный прирост осевого побега в высоту за один вегетативный период в лесных культурах ели, созданных нестандартным посадочным материалом, составил 4,1 см, или 52% от высоты сеянца на этапе

закладки лесных культур, в то время как средний прирост лесных культур, созданных стандартным посадочным материалом, составил 5,2 см, или 33% от высоты сеянцев на этапе закладки культур. Средний прирост бокового побега составил 3,4 и 4,5 см соответственно. Приживаемость указанных культур не имеет существенных различий: разница между ними составляет менее 1%.

Одной из актуальных проблем лесного хозяйства является улучшение качественных показателей посадочного материала.

В настоящее время активно исследуются перспективы использования стимуляторов роста для получения высококачественного посадочного материала в лесных питомниках. Применение стимулирующих препаратов в предпосевной обработке семян способствует повышению энергии их прорастания, активизации процессов роста растений и защите от болезней на начальном этапе выращивания в открытом грунте [8, 9].

В ходе исследований проведен эксперимент по обработке корневой системы сеянцев ели перед посадкой на лесном участке биологически активным органоминеральным комплексом на основе

торфа «Гумитон». Имеется патент на изобретение [10], доказавший свою эффективность в ходе применения на сельскохозяйственных культурах при многочисленных исследованиях [11, 12], но не апробированный на лесных культурах.

«Гумитон» разработан во ВНИИРАЭ (НИЦ «Курчатовский институт», г. Обнинск Калужской области), используется при предпосевной обработке семян, а также для поверхностной обработки растений в период вегетации. В результате исследований, проведенных в Калужской и Брянской областях, было установлено, что органоминеральный комплекс «Гумитон» показывает высокую эффективность на различных типах почв как для повышения урожайности зерновых культур (таких, как ячмень, овес и озимая пшеница), так и для улучшения качества получаемой сельскохозяйственной продукции [12].

Механизм действия данного препарата базируется на активации биохимических процессов в растениях под воздействием содержащихся в нем биологически активных веществ – гуматов калия. Применение комплекса «Гумитон» способствует укреплению иммунной системы растений,

Таблица 1. Параметры используемого посадочного материала

Table 1. Parameters of the planting material used

Порода <i>Species, age</i>	Высота стволика, см <i>Trunk height, cm</i>	Диаметр корневой шейки, не менее, мм <i>Diameter of the root collar, at least, mm</i>	Параметры посадочного материала возраст <i>Planting material parameters</i>	Объем, тыс. шт. на га / на пробной площади <i>Volume, thousand units per ha / on the sample plot</i>
Ель европейская (обыкновенная), 2 года <i>European Spruce (Common), 2 years</i>	12-19	2	Стандартный, соответствует Приказ № 1024 [12] <i>Standard, complies with the Order № 1024 [12]</i>	5000 / 1250
Ель европейская (обыкновенная), 2 года <i>European Spruce (Common), 2 years</i>	6-11	1,5	Не стандартный посадочный материал <i>Non-standard planting material</i>	5000 / 1250

Таблица 2. Характеристика лесных культур (ель европейская)

Table 2. Characteristics of forest cultures (European spruce)

Используемый посадочный материал <i>Planting material used</i>	Средняя высота стволика, см, при посадке <i>Average trunk height, cm, when planting</i>	Средняя высота стволика, см, после первого вегетативного периода <i>Average height of the trunk, cm, after the first vegetative period</i>	Средний прирост, см и в процентах за вегетативный период <i>Average growth, cm and as a percentage for the vegetative period</i>	Средний прирост бокового побега, см, за вегетативный период <i>Average growth of a lateral shoot, cm, for the vegetative period</i>	Приживаемость, % <i>Survival, %</i>	
Стандартный (от 12 см) <i>Standard (from 12 cm)</i>	15,7	20,9	5,2	33%	4,5	95,6
Не стандартный (менее 12 см) <i>Non-standard (less than 12 cm)</i>	7,9	12,0	4,1	52%	3,4	95,3

улучшению их корневого питания, что в свою очередь приводит к повышению урожайности и качества сельскохозяйственной продукции [12].

Начиная с 2024 г., совместно с ВНИИ-РАЭ (г. Обнинск Калужской области) проводится эксперимент по применению данного препарата на лесных культурах. Весной 2024 г. впервые проведена обработка «Гумитоном» семян ели европейской. Обработка корневой системы производилась растворами с разной концентрацией для выявления наиболее подходящей для ели европейской. Заложены пробные площади для дальнейшего наблюдения и учета эффективности применения данного препарата.

Полученные по итогам осенней инвентаризации результаты отражены в таблице 3.

В таблице 3 отражен средний годичный прирост осевого побега в высоту в лесных культурах ели от высоты сеянца на этапе закладки лесных культур, см, %, соответственно. Средний годичный прирост осевого побега в высоту в лесных культурах ели, обработанных препаратом в пропорциях 1/20, 1/40 и 1/60, показал положительную динамику и составил 35%, 43% и 49% соответственно, что превышает показатели среднего годичного прироста осевого побега в высоту в лесных культурах ели, не обработанных препаратом, который составил 33%.

Таблица 3. Ежегодный прирост сеянцев ели при обработке Гумитоном

Table 3. Annual growth of spruce seedlings when treated with Humiton

Концентрация препарата при обработке корневой системы <i>Concentration of the preparation during root system treatment</i>	Средняя высота сеянцев при посадке, см. <i>Average height of seedlings when planting, cm.</i>	Средняя высота стволика, см, после первого вегетативного периода <i>Average trunk height, cm, after the first vegetative period</i>	Средний прирост осевого побега, за вегетативный период <i>Average growth of axial shoot, for the vegetative period</i>		Средний прирост бокового побега см, за вегетативный период <i>Average lateral shoot growth cm, for the vegetative period</i>
			см. / cm	%	
1/20	12,5	16,9	4,4	35	3,7
1/40	12,5	17,9	5,4	43	4,1
1/60	12,5	18,6	6,1	49	4,7
Без обработки <i>no treatment</i>	12,5	16,6	4,1	33	3,6

Выводы

Полученные данные позволяют сделать предварительное заключение о положительной динамике роста нестандартного посадочного материала в течение первого вегетационного периода. В частности, средний годовой прирост осевого побега в высоту составил 52% от высоты сеянца, в то время как средний прирост лесных культур, созданных стандартным посадочным материалом, составил 33% от высоты сеянцев на этапе закладки лесных культур, что в дальнейшем может привести к увеличению среднего годичного прироста осевого побега в высоту в лесных культурах.

Обработка корневой системы органоминеральным комплексом «Гумитон» положительно влияет на увеличение прироста сеянцев ели европейской в первый год после посадки

на площади после рубки лесных насаждений: средний годичный прирост осевого побега в высоту в лесных культурах ели, обработанных препаратом в пропорциях 1/20, 1/40 и 1/60, увеличился на 2%, 10% и 16% соответственно относительно необработанных экземпляров. Также наблюдаем положительную динамику прироста бокового побега у сеянцев, обработанных препаратом, на 3%, 14% и 30% соответственно.

Целесообразно продолжить наблюдение за заложенными лесными культурами, за состоянием и ходом роста в последующие годы.

В продолжение исследований весной 2025 г. заложены аналогичные пробные площади в целях обеспечения точности полученных результатов. Одновременно заложены пробные площади с хозяйственно ценной породой – дубом.

Список используемой литературы

1. Бачурина С.В. Влияние рубок обновления в сосняках на видовой состав и надземную фитомассу живого напочвенного покрова / С.В. Бачурина, С.В. Залесов, Е.П. Платонов // Аграрный вестник Урала. Урал. гос. аграрн. ун-т., 2016. № 1 (143). С. 54-58.

2. Экология естественного возобновления сосны под пологом леса / С.Н. Санников, Н.С. Санникова; Отв. ред. П.Л. Горчаковский. Монография. М.: Наука, 1985. 149 с. EDN: VTOSCZ

References

1. Bachurina S.V. The influence of renewal logging in pine forests on the species composition and aboveground phytomass of living ground cover / S.V. Bachurina, S.V. Zalesov, E.P. Platonov // Agrarian Bulletin of the Urals. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University, 2016. № 1 (143). P. 54-58.

2. Ecology of natural renewal of pine under the canopy of the forest / S.N. Sannikov, N.S. Sannikova; Ed. by P.L. Gorchakovskiy. Moscow: Nauka Publ., 1985. 149 p. EDN: VTOSCZ

3. Цветков В.Ф. Проблемы лесовозобновления на европейском севере России. Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления / В.Ф. Цветков // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 153-156.

4. Мерзленко М.Д. Теория и практика выращивания сосны и ели в культурах. Монография / М.Д. Мерзленко, Н.А. Бабич. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 220 с. EDN: TDLIHB

5. Российская Федерация. Приказы. Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления: приказ: [утверждены Приказом Министерства природных ресурсов и экологии от 29.12.2021 г.]. № 1024.

6. Незабудкин Г.К. Обследование и исследование лесных и плантационных культур. Йошкар-Ола: МарПи, 1971. 52 с.

7. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

8. Кабанова С.А. Опыт интенсивного выращивания одностебельных сеянцев сосны обыкновенной в Павлодарской области Республики Казахстан / С.А. Кабанова, М.А. Данченко, И.С. Кочегаров и др. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 6. С. 104-117. EDN: SNWZDI

9. Пентелькина Н.В. Стимулирующее действие циркона на рост сеянцев хвойных интродуцентов / Н.В. Пентелькина, Ю.С. Пентелькина // Лесной вестник. 2002. № 2. С. 24-28. EDN: HVSFDF

10. Патент на изобретение № 2709737 «Биологически активный органо-минеральный комплекс и способ его получения» (авторы – Санжарова Н.И., Петров К.В., Ратников А.Н., Свириденко Д.Г., Сулов А.А., Иванов И.А., Иванкин Н.Г.). Описание изобретения к патенту. Бюлл. № 35 19.12.19. 6 с.

11. Ратников А.Н. Влияние нового органоминерального препарата «Гумитон» на продуктивность и качество зерна озимой пшеницы / А.Н. Ратников, К.В. Петров, Н.Г. Иванкин, А.А. Сулов, Д.Г. Свириденко, В.В. Яценко // Таврический вестник аграрной науки, 2019, № 4(20). С. 86-95. EDN: PCKLXS

12. Ратников А.Н., Свириденко Д.Г., Арышева С.П., Семешкина П.С. Влияние нового органоминерального комплекса «Гумитон» на продуктивность и качество зерновых культур на различных типах почв // Аграрный вестник Урала. 2020. № 04 (195). С. 29-37. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-195-4-29-37 EDN: CZHQZB

Об авторах

Александр Юрьевич Ушаков, аспирант, ORCID: 0009-0009-8353-473X; ushakov-les@yandex.ru

Вера Александровна Савченкова, д-р с.-х. наук, доцент ВАК, ResearcherID: Y-3167-2019, orcid: 0000-0001-8593-7887; v9651658826@yandex.ru

Николай Геннадьевич Иванкин, научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-6498-8458; nikgen74@yandex.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Ушаков А.Ю., Савченкова В.А., Иванкин Н.Г. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of the 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 10.02.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 17.09.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 17.09.2025

3. Tsvetkov V.F. Problems of reforestation in the European north of Russia. Forest resources of the taiga zone of Russia: problems of forest management and reforestation / V.F. Tsvetkov // Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation. Petrozavodsk: KarSC RAS, 2009, P. 153-156.

4. Merzlenko M.D. Theory and practice of growing pine and spruce in crops. Monograph: / M.D. Merzlenko, N.A. Babich. Arkhangelsk: Publishing House of AGTU, 2002. 220 p. EDN: TDLIHB

5. Russian Federation. Orders. On approval of the Rules of reforestation, the form, composition, procedure for approving the reforestation project, the grounds for refusal to approve it, as well as the requirements for the format in electronic form of the reforestation project: order: [approved by Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology dated 12/29/2021]. No. 1024.

6. Nezabudkin G.K. Survey and research of forest and plantation crops. Yoshkar-Ola: MarPi, 1971. 52 p.

7. Dospekhov B.A. Methodology of field experience. Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 p.

8. Kabanova S.A. The experience of intensive cultivation of annual seedlings of Scots pine in the Pavlodar region of the Republic of Kazakhstan / S.A. Kabanova, M.A. Danchenko, I.S. Kochegarov et al. // News of higher educational institutions. Forest journal, 2019, No. 6, P. 104-117. EDN: SNWZDI

9. Pentelkina N.V. Stimulating effect of zircon on the growth of seedlings of coniferous introduced plants / N.V. Pentelkina Yu.S. Pentelkina // Forest bulletin. 2002. No. 2. P. 24-28. EDN: HVSFDF

10. Patent for invention No. 2709737 "Biologically active organo-mineral complex and method of its preparation (authors – Sanzharova N.I., Petrov K.V., Ratnikov A.N., Sviridenko D.G., Suslov A.A., Ivanov I.A., Ivankin N.G.). Description of the invention to the patent. Bull. No. 35 on 12/19/19. 6 p.

11. Ratnikov A.N. The effect of the new organomineral drug "Humiton" on the productivity and quality of winter wheat grain / A.N. Ratnikov, K.V. Petrov, N.G. Ivankin, A.A. Suslov, D.G. Sviridenko D.G., V.V. Yatsenko // Tavrichesky Vestnik agricultural science, 2019, № 4(20). P. 86-95. EDN: PCKLXS

12. Ratnikov A.N., Sviridenko D.G., Arysheva S.P., Semeshkina P.S. The influence of the new organomineral complex "Gumiton" on the productivity and quality of grain crops on various types of soils // Agrarian Bulletin of the Urals. 2020. No. 04 (195). P. 29-37. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-195-4-29-37 EDN: CZHQZB

Information about the authors

Alexander Yu. Ushakov, post graduate student, ORCID: 0009-0009-8353-473x; ushakov-les@yandex.ru

Vera A. Savchenkova, DSc (Agro), associate professor of the Higher Attestation Commission, Researcher ID: Y-3167-2019; ORCID: 0000-0001-8593-7887, v9651658826@yandex.ru

Nikolay G. Ivankin, Researcher, ORCID: 0000-0001-6498-8458; nikgen74@yandex.ru

Ushakov A.Y., Savchenkova V.A., Ivankin N.G. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.