

ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

19(4)' 2026

Москва, Издательство РГАУ-МСХА

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



ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

2026; Том 19, № 4

Учредитель и издатель:

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

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

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций

**Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-58566 от 14 июля 2014 г.**

Журнал включен в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ
для публикации трудов соискателей
ученых степеней кандидата и доктора наук
**Издание включено в систему РИНЦ,
CrossRef, AGRIS (Agricultural
Research Information System),
КиберЛенинка (Open Science)**

Полнотекстовые версии доступны на сайте
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>

Редактор **В.И. Марковская**
Компьютерный набор и верстка –
А.С. Лаврова
Перевод на английский язык –
В.Г. Рябчикова
Ответственный за выпуск –
Н.Я. Филатова

Адрес редакции: 127434, Москва,
Прянишникова ул., 14, строение 7-7А
Тел.: 8 (499) 976-36-67
Email: prirodamgup@mail.ru
Сайт: environment.elpub.ru

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

Подписано в печать 13.10.26 г.
Формат 60 84/8, Тираж 500 экз.

При использовании
материалов журнала в любой форме
ссылка на журнал обязательна.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2026

Главный научный редактор

Макаров С.С., д-р. с.-х. наук, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Заместитель главного научного редактора

Лебедев А.В., д-р. с.-х. наук, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Члены редакционного совета

Алексеев А.С., д-р. геогр. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет имени С.М. Кирова,
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Балабанов В.И., д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Безбородов Ю.Г., д-р. техн. наук, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Брянская Ю.В., д-р. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет» (г. Москва, Российская Федерация)

Волосухин В.А., д-р. техн. наук, профессор
Академия безопасности гидротехнических сооружений
(г. Новочеркасск, Российская Федерация)

Дубенок Н.Н., д-р. с.-х. наук, профессор, академик РАН
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Исмаилов Г.Х., д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Кентбаев Е.Ж., д-р. с.-х. наук, профессор, Академик КазНАЕН
НАО «Казахский национальный исследовательский университет»
(г. Алматы, Республика Казахстан)

Кирейчева Л.В., д-р. техн. наук, профессор
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)

Косиченко Ю.М., д. техн. наук, профессор
ФГБНУ РосНИИПМ (г. Новочеркасск, Российская Федерация)

Лисичкин С.Е., д-р. техн. наук, с.н.с.
Филиал АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» (Москва, Российская Федерация)

Лихачевич А.П., д-р. техн. наук, член-кор. Академии Наук Белоруссии
Республиканское научное дочернее унитарное предприятие «Институт мелиорации»
(г. Минск, Республика Беларусь)

Матвеев С.М., д-р. биол. наук, профессор
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова
(г. Воронеж, Российская Федерация)

Мирзаев Б.С., д-р. техн. наук, профессор
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(Ташкент, Узбекистан)

Михеев П.А., д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Ольгаренко Г.В., д-р. с.-х. наук, профессор, член-корреспондент РАН
ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения
и сельхозводоснабжения Радуга (г. Коломна, Российская Федерация)

Попов И.И., PhD, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Пчелкин В.В., д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Раткович Л.Д., д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Рубин О.Д., д-р. техн. наук, профессор
АО «Институт Гидропроект» (Москва, Российская Федерация)

Ханов Н.В., д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Хлюстов В.К., д-р. с.-х. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Худаев И.Ж., канд. техн. наук., доцент
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(г. Ташкент, Узбекистан)

Шевченко В.А., д-р. с.-х. наук, профессор, академик РАН
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)

ПОДПИСКА:

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

Цена подписная



ISSN 1997-6011

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

2026;19(4)

Founder and Publisher:

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

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

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

Certificate of registration

PI No FS 77-58566 dated July 14, 2014

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

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

Editor V.I. Markovskaya

Computer typesetting and makeup –
A.S. Lavrova

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

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

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

Signed for print 13.10.26
Format 60 84/8, Circulation 500

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

Scientific editor-in-chief

Makarov S. Sergey, DSci. (Agr), Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(Moscow, Russian Federation)

Deputy scientific editor-in-chief

Lebedev V. Alexander, DSci. (Agr), Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(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 Timiryazev Agricultural Academy
(Moscow, Russian Federation)

Yury G. Bezborodov, DSci. (Eng), Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(Moscow, Russian Federation)

Yuliya V. Bryanskaya, DSci. (Eng), Associate Professor
"National Research Moscow State University of Civil Engineering" (Moscow, Russian Federation)

Victor A. Volosukhin, DSci. (Eng), Professor
Academy of safety of hydraulic structures (Novocherkassk, Russian Federation)

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

Gabil Kh. Ismailiylov, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(Moscow, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

Bahadir S. Mirzaev, DSci. (Eng), Professor
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers (Tashkent, Uzbekistan)

Pavel A. Mikheev, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(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 Timiryazev Agricultural Academy
(Moscow, Russian Federation)

Victor V. Pchelkin, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(Moscow, Russian Federation)

Lev D. Ratkovich, Doctor of technical sciences, Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(Moscow, Russian Federation)

Oleg D. Rubin, DSci. (Eng), Professor
Institute Hydroproject – "NIIES" (Moscow, Russian Federation)

Nartmir V. Khanov, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(Moscow, Russian Federation)

Vitaly K. Khlyustov, DSci. (Agr), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
(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

Г.Б. Остапчук

Оптимизация плана мелиоративного обследования на основе комплекса данных дистанционного зондирования 6

Ю.П. Фоменко, И.А. Коваленко

Технико-экологическое обоснование решений по модернизации бетонных покрытий оросительных каналов в аридных регионах 15

Д.В. Яланский, И.А. Левшунов, Ю.А. Мажайский, М.И. Голубенко

Допустимые технологические параметры искусственного дождя с использованием БЩДУ Bauer «Rainstar T-61» при орошении дождеванием многолетних трав Bauer «Rainstar T-61» 23

Н.Н. Дубенок, А.В. Гемонов, Е.С. Калмыкова, А.В. Зубков

Влияние режима капельного орошения молодого вишневого сада на параметры формирующихся контуров увлажнения в условиях дерново-подзолистых почв Центрального Нечерноземья 32

С.Э. Бадмаева, Ю.В. Бадмаева

Гидролого-геологические условия функционирования осушительно-увлажнительной системы 41

А.А. Борисов, С.В. Зорина

Экологические аспекты использования автономных канализационных систем в условиях индивидуального малоэтажного жилья 46

М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов

Методика определения температуры внутреннего воздуха в культивационном сооружении после аварийного отключения системы отопления 55

Гидротехническое строительство

Е.В. Андреев, В.Я. Жарницкий, Н.В. Ханов

Обоснование экономической эффективности повышения эксплуатационной надежности грунтовых плотин от внедрения системы оперативной оценки геотехнического контроля грунтов 64

А.А. Ткачев, А.И. Мокотова, Е.А. Волкова, М.С. Медведев

Анализ данных автоматизированного пьезометрического мониторинга ограждающих дамб хвостохранилища фосфогипса при их наращивании 75

А.А. Кадысева, С.В. Максимова

Использование искусственного интеллекта при разработке и оценке проектных решений водозаборных комплексов 86

Гидравлика и инженерная гидрология

В.И. Сметанин, В.А. Шевченко, Хунас Каси

Влияние изменения речного стока на процессы опустынивания земель в низовье реки Волги 97

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

А.В. Евграфов, А.В. Куриленко, А.С. Гузалов, Д.А. Филимонов

Экспериментальное определение энергии активации опада сосны обыкновенной изотермическим методом 107

А.В. Мироненко, В.А. Славский, Д.А. Литовченко

Оценка динамики состояния лесных экосистем на повыдельной основе с использованием данных дистанционного зондирования земли 113

О.А. Ивченко, А.В. Тютин, М.А. Козаченко, О.Б. Сокольская, К.Е. Панкин

Предрасположенность лесов к пожарам в регионах Европейской части Российской Федерации за 2016-2023 годы 124

Е.М. Рунова, А.В. Денисенко

Сравнительный анализ различных технологий выращивания сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с закрытой корневой системой 135

Л.Ю. Острошенко, Н.Е. Голобородько

Анализ естественного восстановления лиственницы на площадях, пройденных лесными пожарами, на примере Падалинского лесничества Хабаровского края 143

Юбилей

Н.В. Ханов

К юбилею доктора технических наук, заслуженного деятеля науки КБР профессора К.Н. Анахаева 149

Contents

Land reclamation, water economy and agrophysics

G.B. Ostapchuk

Optimization of the reclamation survey plan based on a set of remote sensing data 6

Yu.P. Fomenko, I.A. Kovalenko,

Technical and environmental justification of solutions for the modernization of concrete coatings of irrigation channels in arid regions 15

D.V. Yalansky, I.A. Levshunov., Y.A. Mazhaysky, M.I. Golubenko

Acceptable technological parameters of artificial rain using the bauer "Rainstar t-61" air conditioner during sprinkler irrigation 23

N.N. Dubenok, A.V. Gemonov, E.S. Kalmykova, N.N. Zubkov

The effect of the drip irrigation regime of a young cherry orchard on the parameters of the emerging moisture contours in the conditions of sod-podzolic soils of the Central Non-Chernozem region 32

S.E. Badmaeva, Yu.V. Badmaeva

Hydrological and geological conditions of functioning of the drainage and humidification system 41

A.A. Borisov, S.V. Zorina

Environmental aspects of using autonomous sewage systems in the conditions of individual low-rise housing 46

M.V. Pavlov, D.F. Karpov

Methodology for determining the temperature of the indoor air in a cultivation facility after an emergency shutdown of the heating system 55

Hydraulic engineering construction

E.V. Andreev, V.Ya. Zharnitsky, N.V. Khanov

Substantiation of the economic efficiency of increasing the operational reliability of earth dams from the introduction of a system for operational assessment of geotechnical control of soils 64

Tkachev A.A., Mokotova A.I., Volkova E.A., Medvedev M.S.

Analysis of automated piezometric monitoring data for the containment dams of a phosphogypsum tailings storage facility during their raising 75

A.A. Kadyseva, S.V. Maksimova

The use of artificial intelligence in the development and assessment of design solutions for water intake complexes 86

Hydraulics and engineering hydrology

V.I. Smetanin, V.A. Shevchenko, Hunas Kasi

The impact of river flow changes on land desertification processes in the lower reaches of the Volga River 97

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

A.V. Evgrafov, A.V. Kurilenko, A.S. Guzalov, D.A. Filimonov

Experimental determination of the activation energy of Scotts pine litter by isothermal method 107

A.V. Mironenko, V.A. Slavskiy, D.A. Litovchenko

Assessment of the state of forest ecosystems on a routine basis using remote sensing data 113

O.A. Ivchenko, A.V. Tiutin, M.A. Kozachenko, O.B. Sokolskaya, K.E. Pankin

Predisposition of forests to fires in the regions of the European part of the Russian Federation for 2016-2023 124

E.M. Runova, A.A. Denisenko

Comparative analysis of different technologies for growing the common pine (*Pinus sylvestris* L.) with a closed root system 135

L.Yu. Ostroshenko, N.Ev. Goloborod'ko

Analysis of natural restoration of larch in areas subjected to forest fires using the example of the "Padalinskoe forestry" of the Khabarovsk region 143

Anniversary

N.V. Khanov

On the occasion of the anniversary of Honored Scientist of the Kabardino-Balkarian Republic K.N. Anakhaev, DSci. (Eng), Professor 149

Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Оригинальная статья

УДК 631.6:528.854

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-6-14>



ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНА МЕЛИОРАТИВНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Г.Б. Остапчук

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; Российская Федерация
ost@agrophys.ru; SPIN-код: 7905-9266

Аннотация. Цель исследований – разработка вопросов определения предполагаемого месторасположения устья закрытого коллектора в русле проводящего осушительного канала на основе комплекса данных дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) в условиях отсутствия проектно-исполнительной документации на строительство закрытой осушительной сети. Объектом исследований является часть осушенного закрытым дренажем поля участка мелиорации «Голино» Меньковского филиала ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт». Для достижения цели исследований была разработана классификация принципиальных схем расположения закрытой дренажной сети в плане, включающей в себя 8 типов. В основе указанной классификации лежат такие характеристики местности, как уклон, экспозиция склона, ширина участка осушенного поля и месторасположение проводящего осушительного канала. Для извлечения указанных характеристик был использован комплекс данных ДЗЗ: снимки с космических аппаратов «Ресурс-П», общедоступные цифровые модели рельефа FABDEM и SRTM (в сравнении), а также общедоступная крупномасштабная топографическая карта. Сравнением рельефа цифровых моделей с рельефом топографического плана установлено, что у модели FABDEM отсутствуют существенные искажения рельефа, имеющие место на модели SRTM в рассматриваемых условиях местности, а также применимость указанной модели для расчета уклона и экспозиции склона. Месторасположение проводящего осушительного канала установлено картированием по космическому снимку линейных сооружений с последующим уточнением их типов по данным крупномасштабной топографической карты. На основе перечисленных характеристик местности для участка осушенного поля определена принципиальная схема расположения закрытой дренажной сети в плане и соответственно ей установлен ключевой участок проводящего осушительного канала с предполагаемым месторасположением устья коллектора. Данными полевого обследования подтверждается наличие устья коллектора в указанном месте.

Ключевые слова: закрытый дренаж, обследование, устье закрытого коллектора, осушительный канал, космический снимок, Ресурс-П, ЦМР, SRTM, FABDEM

Формат цитирования: Остапчук Г.Б. Оптимизация плана мелиоративного обследования на основе комплекса данных дистанционного зондирования. Природообустройство. 2026;Т.19(4):6-14. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-6-14>

Scientific article

OPTIMIZATION OF THE RECLAMATION SURVEY PLAN BASED ON A SET OF REMOTE SENSING DATA

G.B. Ostapchuk

Agrophysical Research Institute 14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, Russian Federation
ost@agrophys.ru; SPIN-code: 7905-9266

Abstract. The research focuses on detection of the collector outlet that is located in the bed of drainage channel using Earth remote sensing dataset (ERS) on condition that a design map of drainage network

is not available. The object of the research is a part of the drained agricultural field named “Golino” located within territory of the “Menkovo” experimental station that is a branch of Agrophysical Research Institute. For this purpose, the classification of the basic schemes for drainage pipe network was elaborated, included of 8 types. This classification based on such landscape characteristics as slope, slope exposure, wideness of the drained field plot and location of the drainage channel. For identification of specified features the ERS dataset was employed, including: Resurs-P satellite images, SRTM and FABDEM digital terrain models (in comparison) and publicly available large-scale topo map. Comparison of the relief obtained from digital terrain models with that obtained from topo map shows that FABDEM model has no significant elevation bias, opposite to the SRTM model in the considered landscape conditions, as well as applicability of the FABDEM model for the calculating of slope and slope exposure. The location of the main drainage channel was established by mapping linear structures on satellite image with farther identification of their types using large-scale topo map. Based on the landscape characteristics for indicated area, the basic scheme for drainage pipe network on specified drained field plot was identified. As a result a key section of main drainage channel that allocates expected collector outlet was detected. The field survey confirmed the presence of collector outlet in the indicated location.

Keywords: agricultural drainage pipes, survey, collector outlet, drainage channel, satellite image, Resurs-P, DEM, SRTM, FABDEM

For citation: Ostapchuk G.B. Optimization of the reclamation survey plan based on a set of remote sensing data. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(4):6-14. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-6-14>

Введение. Проведение работ по реконструкции, капитальному ремонту и техническому обслуживанию закрытых мелиоративных систем предполагает наличие план-схемы гидротехнических сооружений на участок мелиорации [1, 2]. В условиях отсутствия такой план-схемы и безрезультатности ее восстановления дистанционными способами [3] возникает необходимость в проведении полевых поисковых работ по обнаружению устьевых и других сооружений закрытой мелиоративной системы для восстановления указанной схемы [1, 4]. Минимизация объема полевых работ по поиску устьев коллекторов может быть достигнута посредством сосредоточения указанных работ на ключевых участках проводящих осушительных каналов, а именно в местах предполагаемого месторасположения таких устьев.

Цель исследований: разработка вопросов определения предполагаемого месторасположения устьев коллекторов в русле проводящих осушительных каналов на основе комплекса данных ДЗЗ

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Выявить характеристики местности, обуславливающие принципиальные схемы расположения закрытой дренажной сети в плане, и классифицировать указанные схемы.

2. Оценить пригодность общедоступных цифровых моделей рельефа для определения морфометрических характеристик рельефа – уклона местности и экспозиции склона по сторонам света для рассматриваемых условий местности.

3. Картировать проводящие осушительные каналы по данным ДЗЗ и общедоступной электронной крупномасштабной топографической карте.

4. Составить для участка осушенного поля план-схему вероятного месторасположения устья коллектора в русле проводящего осушительного канала и сопоставить ее с данным полевого обследования.

Материалы и методы исследований.

Объектом исследования является часть осушенного закрытым дренажем поля № 5 участка мелиорации «Голино» (участок осушенного поля) Меньковского филиала ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; географические координаты центра участка 59°24'45»с.ш., 29°59'48» в.д.

Материалы исследования представлены: а) высокодетальными архивными снимками, полученными с космического аппарата «Ресурс-П» № 1 с датами съемки 17.05.2017 г. и 15.06.2017 г. (космические снимки) [5, 6]; б) цифровыми моделями рельефа (FABDEM V1-2) [7] и местности (SRTM V4) [8] (цифровые модели рельефа); в) электронной копией проектного плана на строительство участка мелиорации и г) результатами полевого обследования устьев коллекторов участка мелиорации «Голино».

Выбор указанных цифровых моделей обусловлен их общедоступным характером, причем модель SRTM является широко распространенной, имеющей высокую точность для открытой местности [9], а модель FABDEM качественно отличается от нее наличием поправок на высоту древостоя лесных массивов, строений

и сооружений для отображения рельефа под указанными объектами местности [10].

Разработка классификации принципиальных схем расположения закрытой дренажной сети в плане осуществлена на основе анализа требований к проектированию мелиоративных систем [11] с выделением из их числа тех, которые обусловлены характеристиками местности, и последующей типизации таких характеристик для составления указанной классификации.

Определение экспозиции склона для участка осушенного поля выполнено по цифровым моделям рельефа посредством построения горизонталей в ГИС QGIS (функция «Создать изолинии») с последующим анализом полученного изображения рельефа. Расчет уклона местности выполнен картометрическим способом по указанным моделям. Оценка пригодности цифровых моделей рельефа осуществлена сопоставлением рассчитанных по ним морфометрических характеристик рельефа с аналогичными, полученными по выкопировке рельефа с проектного плана (топографического плана).

Картирование проводящих осушительных каналов осуществлено в два этапа: 1) обнаружением и картированием на космическом снимке линейных сооружений, расположенных вблизи границ участка осушенного поля; 2) вычленением из их числа сооружений, не относящихся к проводящим осушительным каналам, на основе данных единой электронной картографической основы (ЕЭКО, топографическая карта) в ГИС АКЦИОМА; дополнительно по указанной карте определено местоположение водоприемника.

План-схема месторасположения ключевого участка проводящего осушительного канала с предполагаемым месторасположением устья коллектора составлена на основе анализа совокупности установленных по данным ДЗЗ сведений о характеристиках местности участка осушенного поля, выбора отвечающего таким характеристикам варианта принципиальной схемы расположения закрытой дренажной сети в плане и определения на основе такой схемы ключевого участка проводящего осушительного канала.

Анализ данных ДЗЗ, картометрические работы и составление план-схем выполнены в ГИС QGIS.

Результаты и их обсуждение. Разработка принципиальных схем расположения закрытой дренажной сети в плане. К требованиям строительного проектирования [11], оказывающим влияние на пространственную конфигурацию закрытой осушительной сети, можно отнести: 1) расположение регулирующей закрытой

дренажной сети (дрен) поперек склона или при уклоне менее 0,005 вдоль него; 2) предельную протяженность дрен от 50 до 250 м; 3) двух- или одностороннее подсоединение дрен к коллектору с преимуществом двухстороннего подсоединения и 4) проектирование трассы коллектора по наиболее низким отметкам местности при его минимальной протяженности.

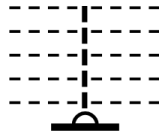
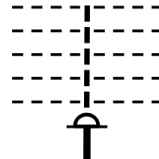
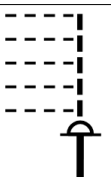
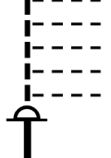
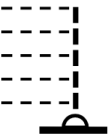
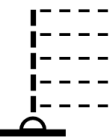
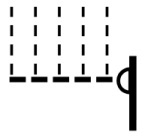
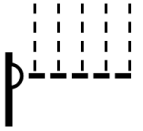
Представленные требования позволяют установить характеристики местности, в отношении которых эти требования применимы. К таким характеристикам, влияющим на схему расположения закрытой дренажной сети в плане, следует отнести величину уклона местности, обуславливающую выбор одной из двух возможных схем расположения закрытой регулирующей сети в плане, и ширину поля (перпендикулярную направлению склона сторону поля), обуславливающую возможность двух- или одностороннего подсоединения дрен к коллектору с учетом их предельной длины.

Ключевой характеристикой местности, предопределяющей фактическую пространственную конфигурацию закрытой осушительной сети как результата ее строительства, является месторасположение проводящего осушительного канала, обслуживающего рассматриваемую закрытую осушительную сеть, в границах участка осушенного поля. При известной экспозиции склона вариации месторасположения такого канала могут быть сведены к 4 типам: вдоль нижней границы участка осушенного поля, вдоль боковых сторон участка с отступом от его верхней границы и в центре участка параллельно его боковым сторонам с отступом от верхней границы. Группировка характеристик местности и построенная на ее основе классификация принципиальных схем расположения закрытой осушительной сети в плане представлены в таблице 1.

Как видим, при известном местоположении проводящего осушительного канала, ширины поля, уклона и экспозиции склона возможны 8 типов принципиальных схем расположения закрытой дренажной сети в плане. Для схем, в которых проводящий осушительный канал проходит вдоль нижней границы поля (схемы № 5 и № 6), уточнение направления руслового стока в канале и, соответственно, выбор одной из указанных схем могут быть осуществлены по местоположению водоприемника относительно краев осушенного поля и направлению его течения. Схемы № 1, № 2, № 7 и № 8 позволяют обслуживать участки поля шириной более 250 м: в отношении схем № 1 и № 2 – благодаря применению более экономичной двухсторонней

Таблица 1. Классификация принципиальных схем расположения закрытой дренажной сети в плане

Table 1. Classification of schematic diagrams of the location of a closed drainage network in the plan

№№	Характеристики местности								Схема	Описание схемы
	расположение канала в границах осушенного поля				ширина поля		уклон			
					менее 250 м	более 500 м	менее 0,005	более 0,005		
1				•	•	•		•		поперечная с 2-сторонним подсоединением дрен к коллектору и устройством устья на линейном участке канала
2	•				•	•		•		поперечная с 2-сторонним подсоединением дрен к коллектору и устройством устья в истоке канала
3	•	•			•			•		поперечная с правосторонним подсоединением дрен к коллектору и устройством устья в истоке канала
4	•		•		•			•		поперечная с левосторонним подсоединением дрен к коллектору и устройством устья в истоке канала
5				•	•			•		поперечная с правосторонним подсоединением дрен к коллектору и устройством устья на линейном участке канала
6				•	•			•		поперечная с левосторонним подсоединением дрен к коллектору и устройством устья на линейной участке канала
7		•			•	•	•			продольная с устройством устья справа в истоке канала или на его линейном участке
8			•		•	•	•			продольная с устройством устья слева в истоке канала или на его линейном участке

Условные обозначения:  – устье коллектора.

Примечание. Схемы составлены для южной экспозиции склона; углы сопряжения дрен с коллектором и коллектора с проводящим осушительным каналом обобщены.

Legend:  – collector outlet.

Note. Diagrams are drawn for the southern exposure of the slope; the angles of interface of drains with the collector and the collector with the conductive drainage channel are generalized.

схемы подсоединения дрен к коллектору, а в отношении схем № 7 и № 8 – за счет отсутствия ограничения в протяженности коллектора при условии устройства смотровых колодцев на его трассе в случае превышения длины коллектора более 1 км.

Оценка пригодности цифровых моделей рельефа для расчета морфометрических характеристик рельефа. Изображение рельефа цифровых моделей, построенное способом горизонталей, и выкопировка рельефа с топографического плана для участка осушенного поля представлены на рисунке 1.

Как следует из топографического плана (рис. 1а), участок осушенного поля имеет северо-западную экспозицию склона; аналогичную экспозицию указанный участок имеет на модели FABDEM (рис. 1в); отличную от них – западную – на модели SRTM (рис. 1б). Анализ рельефа модели SRTM показывает, что несоответствие на ней экспозиции склона топографическому плану вызвано резким увеличением высотных отметок: с середины участка осушенного поля к его нижней границе, смежной с лесным массивом. Такое расхождение высотных отметок можно объяснить влиянием высоты древостоя лесного массива на высотные отметки для части участка осушенного поля [12].

Следует отметить, что сравнение модели FABDEM с топографическим планом выявляет большую степень генерализации рельефа указанной модели. Это приводит к частичной

или полной утрате на модели таких элементов рельефа, как ложбины.

Значения величины уклона местности для участка осушенного поля, рассчитанные по цифровым моделям рельефа и топографическому плану, представлены в таблице 2.

Как видим, величина уклона местности, рассчитанная по топографическому плану (рис. 1а), составляет 0,011; близкое к этому значению указанная величина имеет на модели FABDEM – 0,009; значительно расходится с ней на модели SRTM, имея значение –0,015 (обратный уклон). Такое расхождение высотных отметок, имеющее место на модели SRTM в отличие от топографического плана, исключает возможность получения достоверных сведений об уклоне местности для топографических условий участка осушенного поля.

Таким образом, расчет уклона и экспозиции склона в целях представленных исследований выполнены по цифровой модели рельефа FABDEM как модели, наиболее полно в существующих условиях местности (смежества участка осушенного поля с лесным массивом) соответствующей рельефу топографического плана.

Измеренная ширина поля участка осушенного поля стороны «ВС» (рис. 1а) составила 168,5 м.

Картирование проводящих осушительных каналов. Результаты картирования проводящих осушительных каналов представлены на рисунке 2.

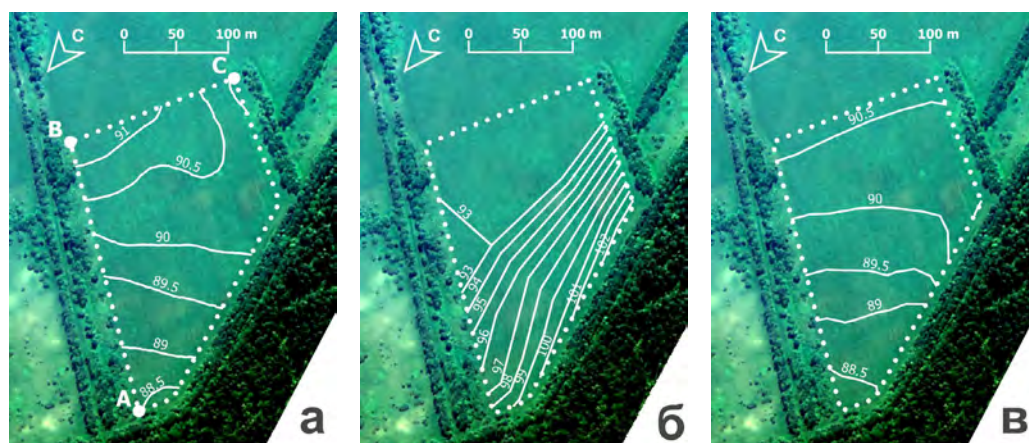


Рис. 1. Рельеф, построенный по цифровым моделям рельефа, и выкопировка рельефа с топографического плана:

- а) выкопировка рельефа с топографического плана; б) рельеф модели SRTM; в) рельеф модели FABDEM
Условные обозначения. Пунктирная линия – граница участка осушенного поля (без включения осушительных каналов).

Примечание. На рисунках а и в шаг горизонталей составляет 0,5 м, на рисунке б – 1,0 м

Fig. 1. Relief built according to digital relief models and copying the relief from the topographic plan

Legend: dotted line – the border of the drained field area (without the inclusion of drainage channels).

Note: in Figures а and с, the spacing of the contours is 0.5 m, in Figure б it is 1.0 m.

- а) a copy of the relief from the topographic plan; б) the relief of the SRTM model; в) the relief of the FABDEM model

Таблица 2. Расчет уклона местности для участка осушенного поля по цифровым моделям рельефа и топографическому плану

Table 2. Calculation of the terrain slope for a drained field section using digital relief models and a topographic plan

Модель рельефа	Расчет уклона местности			
	высотные отметки, м		протяженность стороны АВ, м	уклон
	в точке А	в точке В		
SRTM	97,00	93,00	265,9	–0,015
FABDEM	88,35	90,80		0,009
Топографический план	88,5	91,4		0,011

Примечание. Обозначение точек – согласно рисунку 1а.

Note. Point designations are in accordance with Figure 1a.

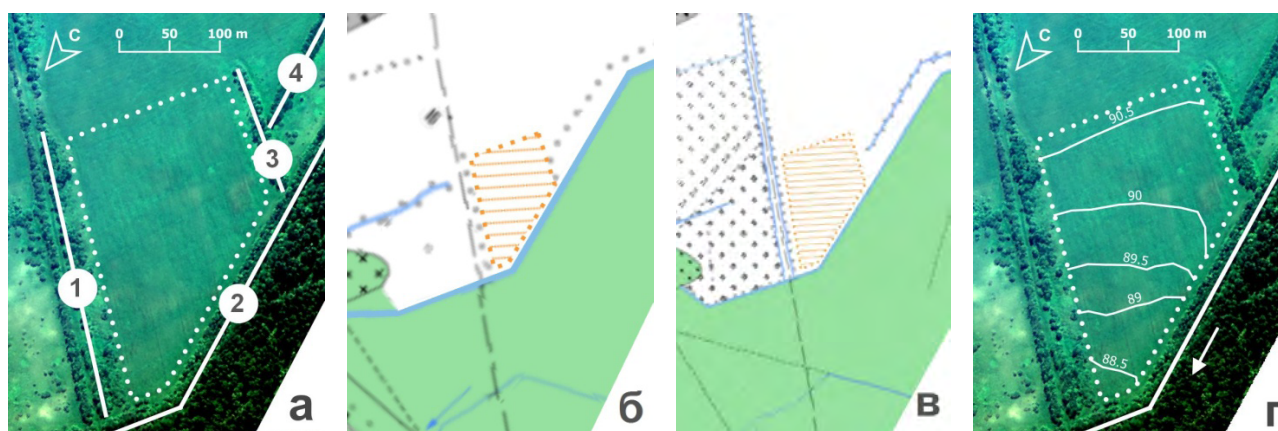


Рис. 2. Картирование проводящего осушительного канала на участке осушенного поля:

- а) план-схема картированных линейных сооружений;
- б) схема участка осушенного поля на ЕЭКО, уровень масштаба – 14;
- в) схема участка осушенного поля на ЕЭКО, уровень масштаба – 15;
- г) план-схема картированного проводящего осушительного канала

Условные обозначения для космических снимков:

Пунктирная линия – граница участка осушенного поля (без включения осушительных каналов); сплошные линии – картированные линейные сооружения и их номера

Fig. 2. Mapping of the conductive drainage channel in the area of the drained field

- a) a plan of mapped linear structures; b) a scheme of the drained field site at the EECO, scale level 14;
- c) a scheme of the drained field site at the EECO, scale level 15;
- d) a plan-scheme of the mapped conductive drainage channel.

Legend (on the satellite images): dotted line – the border of the drained field area (without the inclusion of drainage canals); solid lines – mapped linear structures and their numbers

Анализ космического снимка показывает, что вдоль нижней и боковых границ участка осушенного поля имеются линейные объекты местности, обозначенные №№ 1-4 на рисунке 2а и представляющие собой полосы древесно-кустарниковой растительности. При этом по нижней границе участка такая полоса (№ 2) обнаруживается по тону растительности, отличному от тона растительности смежного с ним участка леса.

Анализ крупномасштабных топографических карт позволяет установить тип указанных линейных объектов местности. Так, вдоль

нижней стороны участка таким объектом (№ 2) является осушительный канал, (рис. 2б); вдоль левой стороны – придорожный кювет, заросший древесно-кустарниковой растительностью (линейный объект № 1) (рис. 2в). Линейный объект № 3 вдоль правой стороны участка осушенного поля также следует отнести к осушительным каналам, так как смежный с ним аналогичный объект № 4 обозначен на крупномасштабной топографической карте условным знаком такого сооружения (рис. 2в). Линейный объект № 4 на топографической карте более мелкого масштаба (рис. 2б) обозначен как лесополоса,

что указывает на целесообразность совместного использования топографических карт разных масштабов.

Таким образом, с учетом северо-западной экспозиции склона к проводящему осушительному каналу, обслуживающему закрытую осушительную сеть на рассматриваемом участке осушенного поля, следует отнести осушительный канал (№ 2), расположенный вдоль нижней границы участка (рис. 2а), обеспечивающий отвод дренажного стока как с рассматриваемого участка поля, так и с участков выше по рельефу. Направление течения в проводящем осушительном канале уточнено по направлению течения водоприемника, обозначенному на топографической карте (рис. 2б), и месторасположению устья канала в его русле.

Необходимо отметить, что отсутствие на топографической карте сведений о месторасположении проводящего осушительного канала и невозможность его дешифрирования по космическому снимку, например, ввиду расположения канала в лесном массиве и(или) его малой протяженности или по другим причинам, является препятствием для определения ключевого участка с предполагаемым месторасположением устья

коллектора в русле проводящего осушительного канала. В таких случаях поисковые работы сначала необходимо направить на обнаружение месторасположения проводящего осушительного канала.

Составление план-схемы предполагаемого месторасположения устья коллектора и ее верификация. Полученные в результате анализа данных ДЗЗ и крупномасштабной топографической карты сведения о характеристиках местности для участка осушенного поля, а именно: а) месторасположении проводящего осушительного канала – вдоль его нижней границы; б) северо-западной экспозиции склона; в) о величине уклона местности 0,009; г) ширине осушенного поля 168,5 м (рис. 3а), – позволяют на основе разработанной классификации установить вариант принципиальной схемы расположения закрытой дренажной сети в плане для указанного участка.

Как следует из данных таблицы 1, перечисленным характеристикам местности отвечает схема № 6 – поперечная схема с левосторонним подсоединением дрен к коллектору и устройством устья на линейной участке канала. Соответственно пространственной конфигурации

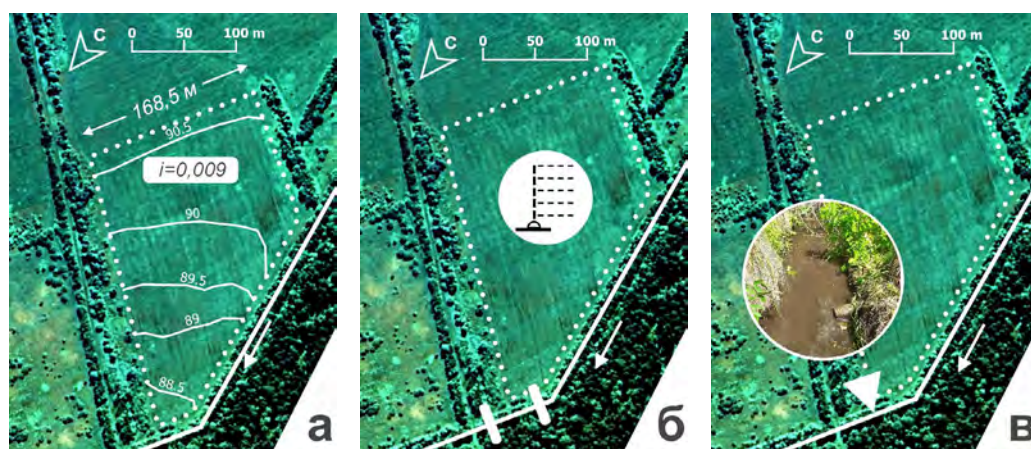


Рис. 3. План-схема предполагаемого месторасположения устья коллектора в русле проводящего осушительного канала и результаты полевого обследования:

- а) план-схема участка осушенного поля с характеристиками местности, установленными по данным ДЗЗ; б) план-схема месторасположения ключевого участка и пиктограмма принципиальной схемы;
- в) план-схема месторасположения устья коллектора и фотография обнаруженного устья.

Фото на рисунке в авторов: Остапчук Г.Б., Старцев А.С.

Условные обозначения. На рисунке б двумя полосами обозначены границы ключевого участка; вершиной треугольника на рисунке в – обнаруженное устье коллектора

Fig. 3. Plan-scheme of the proposed location of the collector outlet in the bed of the conductive drainage channel and the results of the field survey

- a) a plan-scheme of the drained field area with the characteristics of the area established according to remote sensing data; b) a plan of the location of the key section and a pictogram of the schematic diagram;
- c) a plan of the location of the collector outlet and a photograph of the discovered outlet

Legend: in Figure b, two stripes indicate the boundaries of the key section; the apex of the triangle in Figure c is the discovered collector outlet.

Photo in Figure c: Ostapchuk G.B., Startsev A.S

указанной схемы предполагаемое месторасположение устья коллектора находится на участке проводящего осушительного канала, примыкающего к левой боковой границе участка осушенного поля (рис. 3б).

Перспективы совершенствования работ по определению ключевых участков проводящих осушительных каналов. Расчет величины уклона местности и определение экспозиции склона по сторонам света на основе цифровых моделей рельефа, как показано в работе [13], могут быть автоматизированы в ГИС.

Формализация характеристик местности и типизация принципиальных схем расположения закрытой осушительной сети в плане, выполненные в работе, при наличии исходных данных о границах участка осушенного поля и местоположении проводящего осушительного канала могут быть использованы в качестве основы для автоматизации в ГИС процесса определения ключевого участка проводящего канала по цифровой модели рельефа.

Выводы

1. Разработанная классификация принципиальных схем расположения закрытой сети в плане позволяет на основе сведений о характеристиках местности обследуемого участка осушенного поля оптимизировать план мелиоративного обследования проводящих осушительных каналов в его границах в целях обнаружения устьев коллекторов в условиях отсутствия проектно-исполнительной документации. Перечень указанных характеристик местности включает в себя местоположение проводящего осушительного канала относительно границ осушенного

поля и направление его течения, уклон и экспозицию склона, а также ширину поля. Источником сведений об указанных характеристиках может выступать данных ДЗЗ, в который входят высокодетальный снимок с космического аппарата «Ресурс-П», цифровая модель рельефа FABDEM, а также электронная общедоступная крупномасштабная топографическая карта.

2. Сравнением рельефа цифровых моделей с рельефом топографического плана установлено, что у модели FABDEM отсутствуют существенные искажения рельефа, имеющие место на модели SRTM в рассматриваемых топографических условиях местности, а также применимость указанной модели для расчета уклона и экспозиции склона.

3. Месторасположение проводящего осушительного канала, обслуживающего закрытую дренажную сеть, расположенную на участке осушенного поля, установлено картированием по космическому снимку линейных сооружений, выявленных вблизи границ указанного участка, с последующим уточнением их типа по данным общедоступной крупномасштабной топографической карты.

4. На основе характеристик местности, полученных в результате анализа комплекса данных ДЗЗ, для участка осушенного поля была определена принципиальная схема расположения закрытой дренажной сети в плане и в соответствии с ней установлен ключевой участок проводящего осушительного канала с предполагаемым месторасположением устья коллектора. Данными полевого обследования подтверждается наличие устья коллектора в указанном месте.

Список использованных источников

1. Временные рекомендации по реконструкции осушительных систем в Нечерноземной зоне РСФСР. Л.: СевНИИГиМ, 1989. 70 с.
2. Рекомендации по восстановлению работоспособности закрытого дренажа осушительных систем. Под общей редакцией Н.Н. Дубенка, А.И. Иванова, В.И. Штыкова. СПб: ФГБНУ АФИ, 2025. 69 с.
3. Остапчук Г.Б., Петрушин А.Ф., Митрофанов Е.П., Старцев А.С. Картирование закрытого трубчатого дренажа по космическим снимкам сверхвысокого пространственного разрешения // *Агрофизика*. 2024. № 1. С. 41-48.
4. Гулюк Г.Г., Янко Ю.Г., Штыков В.И., Черняк М.Б., Петрушин А.Ф. Руководство по мелиорации полей. СПб: ФГБНУ АФИ, 2020. 217 с.
5. Геопортал Роскосмоса: сайт. Москва. URL: <https://www.gptl.ru/> (дата обращения: 09.12.2024). Режим доступа: по подписке.
6. Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми с космической системы «Ресурс-П». Версия 1. Москва, 2023. 150 с. URL:

References

1. Temporary recommendations for the reconstruction of drainage systems in the Non-chernozem of the RSFSR. L.: SevNIIGiM, 1989. 70 p.
2. Guidelines for restoring closed drainage systems to normal operation. Edited by N.N. Dubenk, A.I. Ivanov, and V.I. Shtykov. St. Petersburg: FGBNU AFI, 2025. 69 p.
3. Ostapchuk G.B., Petrushin A.F., Mitrofanov E.P., Startsev A.S. Mapping of agricultural subsurface drainage systems using high spatial resolution satellite images // *Agrophysics*. 2024. No. 1. P. 41-48.
4. Gulyuk G.G., Yanko Yu.G., Shtykov V.I., Chernyak M.B., Petrushin A.F. Field reclamation Guidelines. St. Petersburg: FGBNU AFI, 2020. 217 p.
5. Roscosmos Geoportal [Electronic resource]. URL: <https://www.gptl.ru/> (date of access: 09.12.2024). Access mode: by subscription.
6. User's Guide to Earth Remote Sensing Data Obtained from the Resurs-P Space System. Version 1. Moscow, 2023. 150 p. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/rukovodstvo.pol.zovatela.dannimi.dzz.polucaemimi.s.ks.resurs-p.pdf> (date of access: 19.08.2025).

<https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/rukovodstvo.pol.zovatela.dannimi.dzz.polucaemimi.s.ks.resurs-p.pdf> (дата обращения: 19.08.2025).

7. FABDEM V1-2 dataset. Bristol, 2023. URL: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4e-w3sn> (дата обращения: 19.09.2025).

8. SRTM 90 m DEM Version 4 Database, 2008. URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (дата обращения: 14.01.2026).

9. Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Knoch A. Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // *Remote Sensing*. 2020, 12(21), 3482.

10. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters* Vol. 17 № 2, 2022. 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.

11. Свод правил СП 100.13330.2016 «СНиП 2.06.03-85 Мелиоративные системы и сооружения» URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/13876/> (дата обращения: 08.10.2025).

12. Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Анализ качества цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли для рельефа овражно-балочного типа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021. № 5-1. С. 235-247. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_235. EDN: OGZTIL

13. Кузнецова А.С., Пушкарев А.А., Краснощеков К.В. [и др.]. Применение FABDEM и других современных цифровых моделей рельефа в системе аграрного мониторинга // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2023. № 4(32). С. 139-147. DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.012. EDN: UVYRVI

7. FABDEM V1-2 dataset. Bristol, 2023. URL: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4e-w3sn> (date of access: 19.09.2025).

8. SRTM 90 m DEM Version 4 Database, 2008. URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (date of access: 14.01.2026).

9. Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Knoch A. Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // *Remote Sensing*. 2020, 12(21), 3482.

10. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters* Vol. 17 № 2, 2022. 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.

11. Code of practice CP 100.13330.2016 “SNiP 2.06.03-85 Reclamation systems and structures” URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/13876/> (date of access: 08.10.2025).

12. Rybnikov P.A., Smirnov A.Yu. Quality analysis of digital terrain models by the remote sensing data: A case-study of the gully-ravine relief // *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021. No. 5-1. P. 235-247. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_235.

13. Kuznetsova A.S., Pushkarev A.A., Krasnoshchekov K.V., Yakubailik O.E., Erunova M.G. Application of FABDEM and other modern digital elevation models in the agricultural monitoring system // *Information and mathematical technologies in science and management*. 2023. No. 4(32). P. 139-147 DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.012.

Информация об авторе

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

Information about the Author

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

Поступила в редакцию / Received 24.02.2026

Поступила после рецензирования / Received 21.08.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 25.08.2026

Оригинальная статья

УДК 626/627:504.06

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-15-22>

ТЕХНИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ БЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ В АРИДНЫХ РЕГИОНАХ

Ю.П. Фоменко^{1✉}, И.А. Коваленко²

^{1,2}Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук; г. Волгоград, Российская Федерация

¹fomenko-y@vfanc.ru; ORCID:0009-0008-6050-6325

²kovalenko-i@vfanc.ru; ORCID: 0009-0001-3147-6613

Аннотация. Цель исследований – разработка экологически ориентированных технических решений для продления срока службы бетонных покрытий гидротехнических сооружений оросительных систем ЮФО на основе комплексной оценки их текущего состояния и модификации применяемых материалов. В условиях дефицита водных ресурсов и повышенной экологической уязвимости южных регионов России все большую актуальность приобретает снижение потерь воды из оросительных каналов. В статье представлены результаты исследований технического состояния бетонных конструкций гидротехнических сооружений, входящих в состав оросительных систем Южного федерального округа, на примере Генераловской оросительной системы Волгоградской области и оросительной сети «0-71» Камызякского района Астраханской области. Установлено, что объекты находятся в состоянии повышенного предельного физического износа, вызванного длительной эксплуатацией и агрессивными воздействиями, что приводит к критическим потерям оросительной воды на фильтрацию и способствует процессам вторичного засоления почвы. В работе предложено технико-экологическое решение, основанное на комплексной модернизации бетонных покрытий с применением современных гидроизоляционных полимерно-минеральных добавок для бетона, обеспечивающих повышенную гидроизоляцию и стойкость к эрозии. Основной акцент сделан на экологической эффективности: сокращение непродуктивных потерь оросительной воды, предотвращение вторичного засоления и заболачивания прилегающих земель, что позволяет минимизировать негативное воздействие на окружающую среду в условиях аридного климата. Полученные результаты могут быть использованы при разработке программ технического перевооружения и продления срока эксплуатации гидротехнических сооружений для повышения экологической устойчивости и климатической адаптивности мелиоративного комплекса в регионах с дефицитом воды.

Исследования выполнены в рамках государственного задания FNFE-2025-0006 «Разработка теоретических и практических основ эксплуатации мелиоративных систем с применением ресурсосберегающих технологий, моделей их функционирования и управления».

Ключевые слова: оросительные системы, засоление почв, диагностика, потери воды, экологическая эффективность, эрозия, гидротехнические сооружения

Формат цитирования: Фоменко Ю.П., Коваленко И.А. Техничко-экологическое обоснование решений по модернизации бетонных покрытий оросительных каналов в аридных регионах. Природообустройство. 2026;Т.19(4):15-22. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-15-22>

Scientific article

TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL JUSTIFICATION OF SOLUTIONS FOR THE MODERNIZATION OF CONCRETE COATINGS OF IRRIGATION CHANNELS IN ARID REGIONS

Yu.P. Fomenko^{1✉}, I.A. Kovalenko²,

^{1,2}Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences

¹fomenko-y@vfanc.ru; ORCID:0009-0008-6050-6325

²kovalenko-i@vfanc.ru; ORCID: 0009-0001-3147-6613

Abstract. The purpose of the research is to develop environmentally oriented technical solutions for extending the service life of concrete coverings of hydraulic structures of irrigation systems in the Southern Federal

District based on a comprehensive assessment of their current condition and modification of the materials used. In the conditions of water resource scarcity and increased environmental vulnerability in the southern regions of Russia, reducing water losses from irrigation channels is becoming increasingly important. This article presents the results of a study of the technical condition of concrete structures of hydraulic structures that are part of the irrigation systems of the Southern Federal District, using the example of the Generalov Irrigation System in the Volgograd Region and the 0-71 Irrigation Network in the Kamzyzysky District of the Astrakhan Region. It has been established that the facilities are in a state of increased or extreme physical wear and tear caused by prolonged use and aggressive environmental factors, which leads to critical losses of irrigation water due to filtration and contributes to the processes of secondary soil salinization. The paper proposes a technical and environmental solution based on the comprehensive modernization of concrete pavements using modern waterproofing polymer-mineral additives for concrete, which provide enhanced waterproofing and resistance to erosion. The main focus is on environmental efficiency, including reducing unproductive losses of irrigation water, preventing secondary salinization and waterlogging of adjacent lands, and minimizing the negative impact on the environment in arid climates. The results obtained can be used in the development of technical re-equipment programs and the extension of the service life of hydraulic structures to improve the environmental sustainability and climate adaptability of the reclamation complex in regions with water shortages.

The research was carried out within the framework of the state assignment FNFE-2025-0006 “Development of theoretical and practical foundations for the operation of reclamation systems using resource-saving technologies, models of their functioning and management”.

Keywords: irrigation systems, soil salinization, diagnostics, water losses, environmental efficiency, erosion, hydraulic structures

Citation format: Fomenko Yu.P., Kovalenko I.A. Technical and ecological justification of solutions for modernizing concrete coatings of irrigation channels in arid regions. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):15-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-15-22>

Введение. Дефицит оросительной воды – ключевой фактор экологического и социально-экономического стресса в аридных регионах. В условиях нарастающего антропогенного давления и климатических изменений эффективность водопользования становится приоритетной задачей экологической политики. От технического состояния оросительных систем зависит рациональное использование водных ресурсов региона: они обеспечивают устойчивое водоснабжение и стабильность развития агропромышленного комплекса [1-3].

Основу водораспределительной сети составляют оросительные системы юга России, в состав которых входят каналы, дюкеры, шлюзы, насосные станции и другие сооружения, большинство из которых было построено в середине прошлого века. Физический износ этой инфраструктуры трансформирует техническую проблему в острую экологическую, приводя к значительным потерям водных ресурсов, деградации прилегающих земель и снижению устойчивости агроэкосистем [3-5]. Большую обеспокоенность в этой связи вызывают состояние бетонных и железобетонных конструкций, которые являются основой значительной части элементов оросительных систем, и интенсивная деградация бетона, проявляющаяся в виде трещин, сколов, коррозии арматуры,

разрушения защитного слоя, выделения высолов и др. (рис. 1, 2).

Таким образом, низкая техническая надежность гидротехнических сооружений не только приводит к потерям поливной воды, но и значительно повышает экологические риски ввиду опасности затопления прилегающих территорий, засоления почв, деградации земель и т.д. Следовательно, работы, связанные с объективной оценкой текущего состояния бетонных конструкций



Рис. 1. Фрагмент бетонных конструкций оросительного канала Генераловской оросительной сети
Fig. 1. Fragment of concrete structures of the irrigation canal of the Generalov irrigation network



Рис. 2. Фрагмент бетонных конструкций оросительного канала «О-71»
Камызякской оросительной сети

Fig. 2. Fragment of concrete structures of the O-71 irrigation canal of the Kamizyak irrigation network

гидротехнических сооружений и разработкой эффективных мер, направленных на повышение их эксплуатационной надежности и долговечности с учетом экологических ограничений, являются особенно актуальными [2, 8-10].

Цель исследований: разработка экологически ориентированных технических решений для продления срока службы бетонных покрытий гидротехнических сооружений оросительных систем ЮФО на основе комплексной оценки их текущего состояния и модификации применяемых материалов.

Исходя из поставленной цели задачами исследования являлись: проведение эколого-технической диагностики состояния бетонных конструкций на типовых участках назначенных оросительных систем; определение основных видов, причин и степени повреждения бетона; разработка и апробирование состава модифицированных бетонных смесей, направленных на максимальное снижение фильтрации и повышение стойкости к агрессивным воздействиям.

Объектом исследований явились бетонные конструкции Генераловской оросительной системы Волгоградской области и оросительной сети «О-71» Камызякского района Астраханской области.

Проблема износа бетонных конструкций перестала быть сугубо инженерной – она стала проблемой экологической безопасности, рационального природопользования и адаптации к климатическим особенностям всего региона.

Материалы и методы исследований. Проведены исследования состояния бетона канальной сети Генераловской оросительной системы Волгоградской области и канальной сети оросительной системы «О-71» Камызякского района Астраханской области (рис. 3, 4). В первую очередь был выполнен визуальный осмотр объектов исследований на основании приказа Федеральной службы по экологическому, технологическому

и атомному надзору от 27 июня 2016 г. № 240. В соответствии с ГОСТ 17624-2012 и методическими рекомендациями МДС 62-2,01 ГУП «НИИЖБ» был проведен ультразвуковой анализ прибором «Пульсар-1.2». Для контроля прочности бетона на основании ГОСТ 22690-2015 применялся прибор ИПС-МГ4.03 и производился расчет показателей. Георадарную съемку для выявления внутренних дефектов бетонных конструкций канальной сети проводили георадаром «ОКО-3» с антеннами 150/400 МГц и 1200 МГц.

Результаты полученных измерений были обработаны при помощи встроенного алгоритма прибора и преобразованы в количественные показатели прочности бетона. Значения представлены в единицах сопротивления R , выраженных в мегапаскалях (МПа). Это соответствует нормативным требованиям и отраслевым стандартам строительной отрасли и обеспечивает возможность прямого сопоставления экспериментально полученных данных с проектными классами бетона, установленными при проектировании гидротехнических сооружений, что позволяет объективно оценить текущее состояние конструкций и их соответствие нормативным требованиям. В таблице 2 представлены результаты расчетов значений прочности в контрольных точках R_i и рассчитано среднеарифметическое значение этого показателя, а также определена степень разброса значений (дисперсия D) и найден коэффициент вариации V .

Исследования и замеры проводились согласно экспериментальной схеме (рис. 5).

Для улучшения технических параметров бетонных покрытий в результате применения различных добавок были проведены лабораторные исследования на базе ФНЦ агроэкологии РАН. Подготовка образцов с модифицирующими добавками была выполнена в соответствии с ГОСТ 28570-2019. Каждый образец представлял

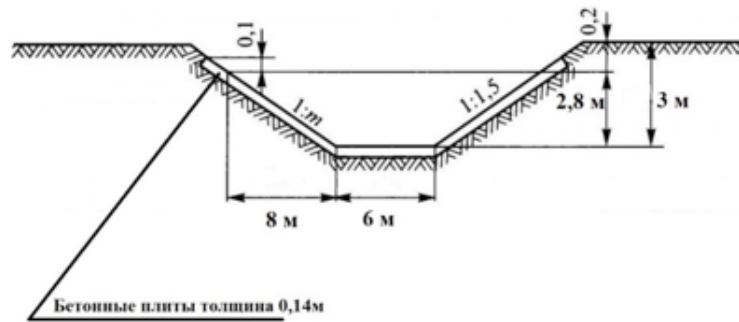


**Рис. 3. Поперечное сечение и геометрические параметры оросительного канала
Генераловской оросительной системы**

Fig. 3. Cross-section and geometric parameters of the irrigation canal of the Generalov irrigation system

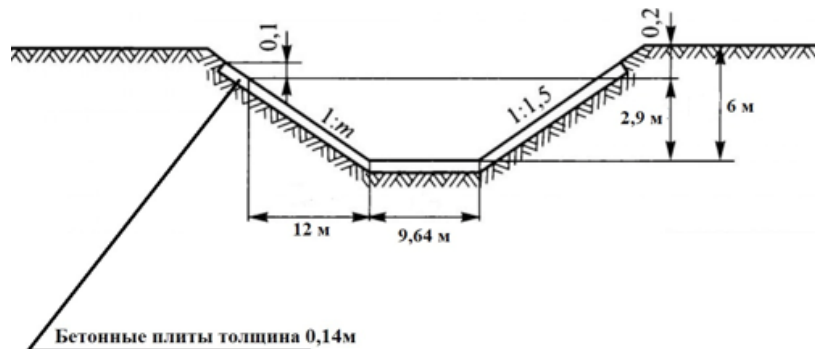


Рис. 4. Поперечное сечение и геометрические параметры оросительного канала «0-71» Камызякского района

Fig. 4. Cross-section and geometric parameters of the irrigation canal "0-71" in the Kamzyaksky District

собой куб со стороной 10 см. Для каждой серии, в том числе контрольной без добавок, было изготовлено по 6 опытных образцов (табл. 1).

В качестве основы для добавок служили компоненты российского производства: цемент класса 42,5Н (М500), который характеризовался водопроницаемостью W4 (пониженная) и морозостойкостью F150 (высокая), соответствующий ГОСТ 31108-2022; песок I класса фракцией 2-2,5 Мк, соответствующий ГОСТ 8736-2014; щебень строительный фракцией 5-20 мм.

Смесь перемешивали в течение 2-3 мин ручным миксером до получения необходимой концентрации бетонной смеси. Затем бетонная смесь была залита в специально подготовленных металлическую форму. Высыхание бетонных образцов осуществлялось в течение 24 ч в лабораторных условиях при температуре $(23 \pm 4)^\circ\text{C}$.

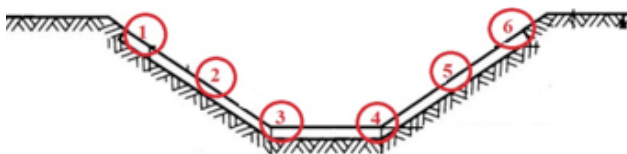


Рис. 5. Схема размещения контрольных точек измерения прочности бетона

Fig. 5. Layout of concrete strength measurement control points

Таблица 1. Виды модифицирующих добавок в опытных образцах

Table 1. Types of modifying additives in the test samples

Номер образца	Модифицирующая добавка
1	Пластиковая стружка
2	Полипропиленовое волокно
3	Стекло
4	Металлическая стружка
5	Контроль
6	Базальтовая фибра
7	Базальтовая фибра и стекло
8	Пластиковая стружка
9	Полипропиленовое волокно и эпоксидная смола
10	Эпоксидная смола
11	Пластиковая и металлическая стружка
12	Пластиковая стружка, эпоксидная смола
13	Металлическая стружка, эпоксидная смола
14	Пластиковая стружка, фибра
15	Металлическая стружка и фибра
16	Стекло и полипропиленовые волокна
17	Стекло и металлическая стружка
18	Пластиковая стружка и базальтовая фибра
19	Металлическая стружка и базальтовая фибра

После высыхания образцов бетонных кубов производилась распалубка. После этого все образцы обильно увлажняли в течение 3-х суток при помощи ручного распылителя. Далее образцы были выдержаны в течение 27 суток в лабораторных условиях при температуре $(23 \pm 4)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха до $(29 \pm 5)\%$. После полного высыхания и схватывания опытных образцов они направлялись для контрольного определения марки, плотности и класса бетона с использованием метода ударного импульса при помощи СКБ стройприбора «ИПС-МГ4.03».

Определение и расчет показателей прочности исследуемых образцов производили в строгом соответствии с требованиями действующих нормативных документов: ГОСТ 10180, 10060-2012, регламентирующих методы испытаний строительных материалов, включая государственные отраслевые стандарты и своды правил.

В ходе исследований были получены результаты минимальных ($R_{\min}$) и максимальных значений прочности ($R_{\max}$) исследуемых образцов, определены показатель единичного размаха прочности W_m и стандартное отклонение δn (табл. 3).

Результаты и их обсуждение. Данные, представленные в таблице 2, позволяют провести

сравнительный анализ экологических рисков, ассоциированных с различной степенью деградации бетонных покрытий. Генераловская оросительная сеть характеризуется широким разбросом значений прочности: от 13,9 до 60,2 МПа, что свидетельствует о высокой степени неоднородности состояния бетонной облицовки оросительного канала, о чем говорит и высокий показатель коэффициента вариации – 59,6%. Анализ бетонного покрытия Камызякского оросительного канала демонстрирует не такой значительный разброс значений прочности бетонного покрытия (от 21,2–41,9 МПа), что говорит о его меньшем физическом износе и более однородном состоянии конструкции, что подтверждает и более низкий (в 2,3 раза) коэффициент вариации – 25,9%.

Распределение показателей прочности бетонного покрытия оросительного канала Генераловской оросительной сети в представленных на рисунке 6 интервалах прочности происходит преимущественно в диапазонах с низким (10–20 МПа) и средним (30–40 МПа) запасом прочности; фиксируется и локальный участок со значением 60,2 МПа, но этот показатель является фрагментарным и может свидетельствовать только о неоднородности прочности конструкции в целом, а не о ее стабильном состоянии.

Таблица 2. Результаты измерения прочности бетонной облицовки оросительных каналов
Table 2. Results of measuring the strength of concrete lining of irrigation channels

Оросительный канал	Показатели прочности бетона								
	R1, МПа	R2, МПа	R3, МПа	R4, МПа	R5, МПа	R6, МПа	Rcp, МПа	D, МПа	V, %
Генераловская сеть	31,8	60,2	46,7	13,9	14,1	21,6	31,4	348,2	59,6
Камызякская сеть	39,0	37,7	38,2	41,9	24,1	21,2	33,7	76	25,9

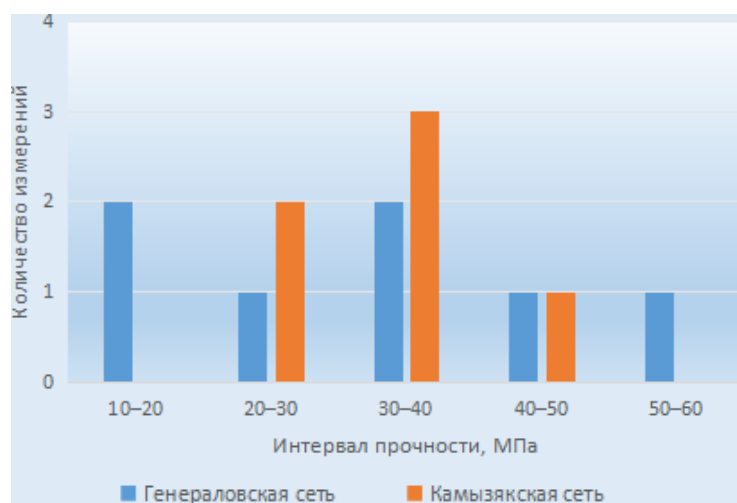


Рис. 6. Распределение значений прочности бетона оросительных каналов, исследуемых ГТС по интервалам

Fig. 6. Distribution of concrete strength values of irrigation channels of the studied hydraulic structures by intervals

Таблица 3. Данные анализа прочности образцов бетона с различными модифицирующими добавками

Table 3. Analysis of the strength of concrete samples with various modifying additives

Номер образца	Rmax, МПа	Rmin, МПа	Wm, МПа	δn
1	31,5	30,2	1,3	0,52
2	32,1	30,3	1,8	0,72
3	30,5	25,0	5,5	2,2
4	31,5	29,5	2	0,8
5	32,1	30,3	1,8	0,72
6	31,5	30,3	1,2	0,48
7	30,5	25,5	1	0,4
8	30,5	25,5	0,5	0,2
9	32,5	30,5	2	0,8
10	25,5	20,5	5	2
11	30,5	30,0	0,5	0,2
12	35,5	32,0	3,5	1,4
13	35,0	25,5	9,5	3,8
14	25,5	21,0	4,5	1,8
15	35,5	35,0	0,5	0,2
16	32,5	30,5	2	0,8
17	35,5	25,0	10,5	4,2
18	32,2	31,0	1,2	0,48
19	36,0	32,0	4	4,6

Для Камызякской оросительной сети показатели прочности сосредоточились преимущественно в среднем диапазоне (30-40 МПа), то есть наблюдается более равномерный износ, что свидетельствует, в том числе, о ее более высокой эксплуатационной надежности и ремонтпригодности.

В результате анализа данных таблицы 3 были определены оптимальные критерии отбора исследуемых образцов: высокий показатель минимальной прочности ($R_{min} \geq 25,5$ МПа, что соответствует классу бетона В20 и более – ГОСТ 26633-2015), так как он гарантирует прочность даже в самом слабом участке; наименьший разброс показателей (брали в пределах $W_m \leq 1,2$ МПа), что свидетельствует о высокой структурной однородности исследуемого материала.

Исходя из назначенных критериев лучшими по качественным характеристикам были признаны 5 образцов: образец № 15 – с самым высоким показателем минимальной прочности 35,0 МПа и высоким уровнем однородности материала 0,5 МПа; образец № 11, где показатель минимальной прочности – 30,0 МПа, показатель уровня однородности – 0,5 МПа; образец № 8-25,5 МПа и 0,5 МПа соответственно; образец № 7, также продемонстрировавший хороший баланс прочности и однородности, – 25,5 МПа и 1,0 МПа; последний из выбранных образцов № 6, который характеризуется

высокой прочностью и умеренными показателями однородности материала – 30,3 МПа и 1,2 МПа.

Данные критерии напрямую связаны с долговечностью и аварийной безопасностью будущего покрытия. Можно сказать, что это фундаментальное условие для предотвращения катастрофических разрушений, которые могут вызвать масштабные размывы и неконтролируемые сбросы воды, наносящие значительный экологический ущерб. Следовательно, лучшие варианты добавок для модификации бетонных смесей, применяемых для облицовки оросительных каналов гидротехнических сооружений с точки зрения синергии прочности, долговечности и потенциальной экологической эффективности, включают в себя комбинацию: металлическую стружку и фибру, пластиковую и металлическую стружку, только пластиковую стружку, базальтовую фибру и стекло, только базальтовую фибру. Необходимо отметить, что все отобранные образцы обеспечивают не просто «прочность», а предсказуемо высокий барьер для фильтрации на всем сроке службы, что и составляет основу их экологической ценности.

Ключевым экологическим аспектом является оптимизация состава, за исключением перерасхода материала. Экспериментально подтверждено влияние объема исследуемого материала на итоговые значения прочности, что необходимо учитывать при практическом применении. Введение различных добавок и их дозировка существенно влияли на характеристики бетона. Например, при использовании мелкодисперсной фракции полимерных модификаторов в малых дозах прочность повышалась примерно на 15%, но дальнейший рост концентрации добавки приводил к отрицательному эффекту [11, 12].

Применение стекловолокна повышало прочность образца примерно на 30%, возрастала также его стойкость к щелочному воздействию. При достижении оптимальных концентраций введение металлических включений демонстрировало прирост прочности около 20%, но применение стружки крупных фракций снижало этот результат до отрицательных значений.

Таким образом, высокий эффект прочности достигается при использовании комбинации различных модификаторов. Проведенные исследования также подтверждают, что это связано не с увеличением количества добавок, а с научно обоснованным подбором их типов, фракций и комбинаций. В свою очередь, это подтверждает тезис о том, что экологичность технологии начинается с точного расчета и отсутствия излишеств и соответствует принципам ресурсоэффективности в рамках экономики замкнутого цикла.

Выводы

На основании проведенных исследований, направленных на снижение экологической нагрузки от деградирующей мелиоративной инфраструктуры, в соответствии с достигнутой целью и решенными задачами можно сделать следующие ключевые выводы:

- в результате оценки текущего состояния бетонных конструкций на типовых участках назначенных оросительных систем были определены основные виды (сколы, трещины, коррозия арматуры, высолы, растрескивание защитного слоя) и причины повреждения (отсутствие в достаточном объеме текущего и капитального ремонта, длительный срок эксплуатации, воздействие агрессивных факторов внешней среды), что характеризует объекты как источник значительного экологического риска;

- техническая диагностика бетонных конструкций оросительных каналов показала, что их эксплуатационные параметры являются различными: для Генераловской оросительной сети характерны высокий разброс показателя прочности (13,9-60,2 МПа), высокий коэффициент вариации (59,6%) и преобладание зон со средней (30-40 МПа) и низкой (10-20 МПа) прочностью; для Камызякской сети «0-71» характерны более равномерное распределение прочности (21,2-41,9 МПа), значительно более стабильный коэффициент вариации (25,9%) и концентрация значений в среднем диапазоне (30-40 МПа), что свидетельствует о лучшей сохранности и ремонтпригодности.

Список использованных источников

1. Приходько И.А., Бандурин М.А., Волосухин В.А., Руденко А.А. Критический анализ инженерной защиты Нижней Кубани в условиях возрастающего дефицита оросительной воды из-за климатических изменений // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 4. С. 317-332. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_49763361_97820260.pdf (дата обращения: 25.12.2025). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-317-332.
2. Мещеряков М.П., Болотин Д.А., Веденеева В.А. Интенсификация биологических методов очистки животноводческих стоков при их использовании в мелиоративном земледелии // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 4 (64). С. 472-481. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-46. EDN: DKQCSX
3. Мещеряков М.П. Повышение эффективности использования оросительной воды при различных способах полива с применением природных сорбирующих мелиорантов. / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет». 2022.
4. Тютюма Н.В., Мещеряков М.П. Система контроля подпочвенной влаги на мелиорируемых землях // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 3. С. 24-25.
5. Овчинников А.С., Бочарников В.С., Мещеряков М.П., Бочарникова О.В., Мещерякова Е.Г. Технологические приемы

В целом состояние данных гидротехнических сооружений ЮФО можно характеризовать как критическое и экологически опасное;

- в результате лабораторных испытаний 19 образцов бетона с различными модифицирующими добавками были определены 5 наиболее прочных по назначенным критериям ($R_{min} > 25,5$ МПа; $W_m \leq 1,2$ МПа), в состав которых входили: металлическая стружка и фибра; пластиковая и металлическая стружка; только пластиковая стружка; базальтовая фибра и стекло; только базальтовая фибра. Испытания образцов методом разрушающего контроля проводились на универсальной машине (МИМ 4-1000-2.1-12.1.1-2.1.1-1.2.);

- признано, что параметры дозировки модифицирующих добавок и размер образца являются критическими и могут существенно влиять на конечные результаты исследований, поэтому рекомендуется при внедрении в производственную практику отобранных образцов (№№ 6, 7, 8, 11, 15) масштабировать лабораторные результаты на реальные конструкции и учитывать местные климатические условия, химический состав воды и грунта для обеспечения необходимого класса прочности бетона (не ниже В20).

Проведенные исследования доказывают, что экологическая безопасность и техническая модернизация в водном хозяйстве – единая задача. Реализация предложенной стратегии позволит сохранить водные и земельные ресурсы Юга России и создать инфраструктуру, устойчивую к нарастающим климатическим вызовам.

References

1. Prikhodko I.A. Critical analysis of the engineering protection of the Lower Kuban in the conditions of the increasing irrigation water deficit due to climate change / I.A. Prikhodko, M.A. Bandurina, V.A. Volosukhin, A.A. Rudenko // Land Reclamation and Hydraulic Engineering [Electronic resource]. 2022. Vol. 12, No. 4. P. 317-332. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-317-332. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_49763361_97820260.pdf (accessed: 25.12.2025).
2. Meshcheryakov M.P., Bolotin D.A., Vedeneyeva V.A. Intensification of biological methods of purification of animal husbandry effluents when they are used in reclamation agriculture. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2021. No. 4 (64). P. 472-481. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-46. EDN: DKQCSX
3. Meshcheryakov M.P. Improving the efficiency of irrigation water use with various irrigation methods using natural sorbent meliorants / M.P. Meshcheryakov // Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Agrarian University". 2022.
4. Tyutyuma N.V. The system of control of subsurface moisture on reclaimed lands / N.V. Tyutyuma, M.P. Meshcheryakov // Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2014. No. 3. P. 24-25.
5. Ovchinnikov A.S. Technological methods of managing the water regime of the soil in the estuaries of the Lower Volga

управления водным режимом почвы на лиманах Нижнего Поволжья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4 (52). С. 15-22. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-1. EDN: VUUPUI

6. Ольгаренко Д.Г. Технический уровень и эффективность эксплуатации мелиоративных систем. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 4 (20). С. 287-295. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_24834871_73366067.pdf (дата обращения 17.12.2025) EDN: UXLZTL

7. Сенчуков Г.А., Осипенко Д.А. Общая характеристика и состояние гидротехнических сооружений ЮФО. Экологический вестник Северного Кавказа, 2023, Т. 19, № 3. С. 104-108. [Электронный ресурс]. URL: <http://ecokavkaz.ru/media/docs/2023/3/19-3-16.pdf> (дата обращения 17.12.2025) EDN: PLUNBV

8. Истомин А.П., Солодовников Д.А., Истомин С.А., Коваленко И.А. Применение методов неразрушающего контроля для обследования гидротехнических сооружений. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 1(73). С. 381-392. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-43. EDN: HXAPOY

9. Бандурин М.А., Волосухин В.А., Приходько И.А., Руденко А.А. Комплексный мониторинг технического состояния концевой водоспуска невинномысского канала, базирующийся на оценке параметров надежности // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13. № 2. С. 264-280. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-264-280. EDN: ZELKMQ

10. Ткачев А.А., Ольгаренко И.В. Современные проблемы в управлении водораспределением в магистральных каналах оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2021. Т. 11, № 2. С. 1-23. DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23 URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_45745899_50331857.pdf (дата обращения: 25.12.2025) EDN: NTRFMJ

11. Ground-penetrating radar (GPR) investigations of a large-scale buried ice-marginal landsystem, Skeidararsandur, SE Iceland / D. Harrison, N. Ross, A.J. Russell, S.J. Jones // Boreas. 2022. Vol. 51, No. 4. P. 824-846. DOI: 10.1111/bor.12587.

12. Tandon R.S. Geological, geotechnical, and GPR investigations along the Mansa Devi hill-bypass (MDHB) Road, Uttarakhanda, India / R.S. Tandon, V. Gupta, B. Venkateshwarlu // Landslides. 2020. DOI: 10.1007/s10346-020-01546-9.

Информация об авторах

Юлия Петровна Фоменко – канд с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», ORCID: 0009-0008-6050-6325, fomenko-y@vfanc.ru

Иван Александрович Коваленко – инженер-исследователь «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»; ORCID: 0009-0001-3147-6613; kovalenko-i@vfanc.ru

Вклад авторов

Ю.П. Фоменко – постановка цели и задач исследования, формулирование выводов.

И.А. Коваленко – сбор и систематизация научно-технической литературы, оформление полученных результатов.

Поступила в редакцию / Received 15.05.2026

Поступила после рецензирования / Received 18.08.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 18.08.2026

region / A.S. Ovchinnikov, V.S. Bocharnikov, M.P. Meshcheryakov, O.V. Bocharnikova, and E.G. Meshcheryakova // Izvestiya of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2018. No. 4 (52). P. 15-22. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-1. EDN: VUUPUI

6. Ol'garenko D.G. Technical level and efficiency of operation of reclamation systems. Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2015. No. 4 (20). P. 287-295. [Electronic resource]. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_24834871_73366067.pdf (accessed on 17.12.2025) EDN: UXLZTL

7. Senchukov G.A., Osipenko D.A. General Characteristics and Condition of Hydraulic Structures in the Southern Federal District. Ecological Bulletin of the North Caucasus, 2023, Vol. 19, No. 3, P. 104-108. Founders: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. ISSN: 2308-3875. [Electronic resource]. URL: <http://ecokavkaz.ru/media/docs/2023/3/19-3-16.pdf> (accessed on 17.12.2025) EDN: PLUNBV

8. Istomin A.P., Solodovnikov D.A., Istomin S.A., Kovalenko I.A. Application of non-destructive testing methods for the inspection of hydraulic structures. Izvestiya of the Lower Volga Agro-University Complex. Science and Higher Professional Education. 2024. No. 1(73). P. 381-392. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-43. EDN: HXAPOY

9. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prihodko I.A., Rudenko A.A. Comprehensive monitoring of the technical condition of the end spillway of the Nevinnomyssk channel based on the assessment of reliability parameters. Melioration and Hydraulic Engineering. 2023. Vol. 13. No. 2. P. 264-280. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-264-280. EDN: ZELKMQ

10. Tkachev A.A., Ol'garenko I.V. Modern Problems in Water Distribution Management in Main Channels of Irrigation Systems // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems [Electronic resource]. 2021. Vol. 11, No. 2. P. 1-23. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_45745899_50331857.pdf (accessed: 25.12.2025). DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. EDN: NTRFMJ

11. Ground-penetrating radar (GPR) investigations of a large-scale buried ice-marginal landsystem, Skeidararsandur, SE Iceland / D. Harrison, N. Ross, A.J. Russell, S.J. Jones // Boreas. 2022. Vol. 51, No. 4. P. 824-846. DOI: 10.1111/bor.12587.

12. Tandon R.S. Geological, geotechnical, and GPR investigations along the Mansa Devi hill-bypass (MDHB) Road, Uttarakhanda, India / R.S. Tandon, V. Gupta, B. Venkateshwarlu // Landslides. 2020. DOI: 10.1007/s10346-020-01546-9.

Information about the authors

Julia P. Fomenko, CSs (Agro), Leading Researcher, Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences; ORCID: 0009-0008-6050-6325, fomenko-y@vfanc.ru

Ivan A. Kovalenko, Research engineer, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences; ORCID: 0009-0001-3147-6613; kovalenko-i@vfanc.ru

Contribution of the authors

Y.P. Fomenko – setting the goal and objectives of the study, formulating conclusions.

I.A. Kovalenko – collection and systematization of scientific and technical literature, registration of the results obtained

Оригинальная статья

УДК 631.67:633.2/.3:631.674.1.033.3

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-23-31>



ДОПУСТИМЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИСКУССТВЕННОГО ДОЖДЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БШДУ BAUER «RAINSTAR T-61» ПРИ ОРОШЕНИИ ДОЖДЕВАНИЕМ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ BAUER «RAINSTAR T-61»

Д.В. Яланский^{1✉}, И.А. Левшунов², Ю.А. Мажайский³, М.И. Голубенко⁴

^{1,2}Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; г. Горки, Республика Беларусь

²ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова; Мещерский филиал, г. Рязань, Российская Федерация

³ООО «Мещерский научно-технический центр»; г. Рязань, Российская Федерация

¹dimka-045@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7808-8204

²cdtnkfyeirf@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-3384-8059

³director@mntc.pro, ORCID: 0000-0002-0743-8289

⁴golubenko-mihail@mail.ru, ORCID: 0009-0003-8543-4448

Аннотация. Цель исследований – оценка возможности непрерывной технологии орошения дождеванием при применении БШДУ Bauer «Rainstar T-61» и определение равномерного полива установленными дождевателями заводской конструкции без образования поверхностного стока. В статье приведены основные исследования на объекте «Тушково-1», расположенном в Могилевской области Беларуси. Был выбран способ деления поливной нормы по тактам влияния поливных норм и интенсивности дождя на объемы поверхностного стока. Разработана и внедрена конструкция дождевального аппарата, работающего по принципу реактивной крыльчатки. Новое техническое решение позволило адаптировать дождевальный аппарат к конкретным почвенно-мелиоративным условиям. При использовании непрерывной технологии орошения дождеванием БШДУ Bauer «Rainstar T-61» получены эрозионно-допустимые поливные нормы в вариантах 70 и 80% от НВ, равные 17,8 и 15,6 мм. При этом время их выдачи до появления поверхностного стока составило 68 и 60 мин соответственно. За годы наблюдений плотность сложения почвы изменилась в диапазоне от 1,40 до 1,50 г/см³, что в свою очередь привело к снижению впитывающей способности в диапазоне от 0,24 до 0,20 мм/мин. Разработано новое техническое решение дождевателя с учетом специфики геоморфологического и почвенного районирования данного объекта. Аппараты новой конструкции позволили достичь значительно лучшей скорости впитывания воды почвой – от 0,24 до 0,20 мм/мин. Сделаны выводы об эффективности и целесообразности применения установки дождевателей на поливном агрегате БШДУ Bauer «Rainstar T-61».

Ключевые слова: интенсивность дождя, технологические параметры дождя, дождевальный аппарат, впитывающая способность, реактивная крыльчатка

Формат цитирования: Яланский Д.В., Мажайский Ю.А., Голубенко М.И. Допустимые технологические параметры искусственного дождя с использованием БШДУ Bauer «Rainstar T-61» при орошении дождеванием многолетних трав. Природообустройство. 2026;Т.19(4):23-31. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-23-31>

Original article

ACCEPTABLE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ARTIFICIAL RAIN USING THE BAUER “RAINSTAR T-61” AIR CONDITIONER DURING SPRINKLER IRRIGATION

D.V. Yalansky^{1✉}, I.A. Levshunov², Y.A. Mazhaysky³, M.I. Golubenko⁴^{1,2} Belarusian State Agricultural Academy, Gorki, Republic of Belarus³ FSBSI “VNIIGIM named after A.N. Kostyakov, Meshchersky branch, Ryazan, Russian Federation⁴ Meshchersky Scientific and Technical Center, Ryazan, Russian Federation¹ dimka-045@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7808-8204² cdtmkfyeirf@yandex.ru ORCID: 0009-0003-3384-³ director@mmtc.pro, ORCID: 0000-0002-0743-8289⁴ golubenko-mihail@mail.ru, ORCID: 0009-0003-8543-4448

Abstract. The objective of this study was to evaluate the feasibility of continuous sprinkler irrigation using the Bauer Rainstar T-61 continuous irrigation system and to determine uniform watering using factory-installed sprinklers without generating surface runoff. This article presents the main research findings at the Tushkovo-1 site in the Mogilev region of Belarus. A method for dividing the irrigation rate into cycles was selected, as well as the impact of irrigation rates and rainfall intensity on surface runoff volumes. A sprinkler system operating on the principle of a reactive impeller was developed and implemented. This new technical solution allowed the sprinkler system to be adapted to specific soil and drainage conditions. When implementing continuous sprinkler irrigation technology with the Bauer Rainstar T-61 BSHU, erosion-permissible irrigation rates of 17.8 and 15.6 mm were achieved in the 70 and 80% of the maximum permissible water level (MPW) scenarios, with application times of 68 and 60 minutes, respectively, before surface runoff. Over the years of observation, soil bulk density changed from 1.40 to 1.50 g/cm³, which in turn led to a decrease in absorption capacity from 0.24 to 0.20 mm/min. A new sprinkler design was developed, taking into account the specific geomorphological and soil zoning of this site. The newly designed sprinklers significantly improved the water absorption rate by the soil, from 0.24 to 0.20 mm/min. Conclusions were drawn regarding the effectiveness and feasibility of installing sprinklers on the Bauer Rainstar T-61 BSHU irrigation unit.

Keywords: rainfall intensity, sprinkler technology, sprinkler system, absorption capacity, jet impeller

For of citation: Yalansky D.V., Mazhaisky Yu.A., Golubenko M.I. Acceptable technological parameters of artificial rain using the Bauer “Rainstar T-61” air conditioner during sprinkler irrigation. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):23-31. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-23-31>

Введение. На сегодняшний день около 60% мировых сельскохозяйственных угодий требуют орошения. Такая практика орошения распространена более чем в 100 странах мира. Несмотря на то, что орошаемые территории занимают свыше 300 млн га, составляя лишь 14% от общей площади пахотных земель, они обеспечивают до 40% глобального объема сельскохозяйственного производства [1].

Статистические данные на конец 2025 г. свидетельствуют о том, что в Республике Беларусь общая площадь мелиорированных земель достигла 3275,0 тыс. га. Из них 3249,2 тыс. га приходится на осушенные, 25,8 тыс. га – на орошаемые земли. В разрезе осушенных земель пахотные земли занимают 1509,4 тыс. га, а луговые – 1287,6 тыс. га. Орошаемые земли представлены 20,3 тыс. га пахотных и 4,8 тыс. га луговых угодий [2].

Значительная часть осушенных сенокосов в России, а это 323 тыс. га, демонстрирует высокую степень улучшения: 69%, или 222 тыс. га, было подвергнуто коренной модернизации. Аналогично среди 200 тыс. га осушенных пастбищ 61%, или 123 тыс. га, представляют собой культурные или улучшенные угодья. Территории, оборудованные осушительно-увлажнительными системами, занимают 19% от общего объема осушенных земель в регионе, что соответствует площади в 17,1 тыс. га. Значительная часть сельскохозяйственных земель – 27%, или 189 тыс. га, – отдана под орошаемые сенокосы и пастбища и обеспечивает кормовую базу.

Объем годовых осадков в Европейской части России составляет примерно 600-650 мм – с заметным снижением этого показателя по мере продвижения на восток. Основная часть влаги наблюдается в летний (40-50%) и осенний (20-25%)

периоды. Средний уровень испарения – около 200 мм, однако на восточных территориях может варьироваться от 713 до 300 мм [3, 4].

В ходе исследований, проведенных в Беларуси и в Нечерноземной зоне России, установлено, что орошение пастбищ с многолетними травами повышает урожайность кормовых единиц на 10-25 ц с 1 га. Такой прирост составляет 20-70% от исходного урожая. Это означает, что каждый кубометр поливной воды позволяет получить 1-2 кормовые единицы. Однако орошение экономически целесообразно лишь для пастбищ с урожайностью от 4 до 6 тыс. кормовых единиц на 1 га. В таких условиях наиболее эффективными считаются мобильные и полустационарные дождевальные установки.

Среди наиболее эффективных методов полива сенокосных и пастбищных угодий доминирующим является дождевание. Для орошения пастбищных травостоев могут применяться различные модели и типы дождевальных машин и установок. Их ключевыми преимуществами являются мобильность, высокая производительность и способность функционировать даже при скорости ветра до 6-7 м/с.

Высокая урожайность сенокосно-пастбищных угодий тесно связана с количеством вносимых минеральных удобрений. Исследования демонстрируют, что оптимальное минеральное питание, соответствующее норме $N_{200}P_{60}K_{120}$, на дерново-подзолистых почвах позволяет получить урожай зеленой массы в пределах 400-500 ц с 1 га. При этом оптимальные дозы могут быть скорректированы на основании агрохимического анализа почвенного покрова конкретного участка [5].

Опытный участок, на котором проводились лабораторно-экспериментальные исследования, расположен в средней части склона на местности и имеет уклон $i = 0,002$. Почвы опытного поля являлись дерново-подзолистыми, легкосуглинистыми, показав в свою очередь наилучшую отзывчивость при орошении дождеванием с применением БШДУ Bauer «Rainstar T-61».

Измерение интенсивности искусственного дождя выполнялось на специализированном лабораторном стенде с обязательным учетом конструктивных характеристик используемого аппарата. Проведение экспериментальных исследований как в естественных условиях, так и в контролируемой лабораторной среде, осуществлялось на фундаменте современных научных представлений и зарекомендовавших себя методик. Для подтверждения надежности собранных данных был выполнен статистический анализ с использованием корреляционного подхода.

Цель исследований: разработка технических средств дождевателя для непрерывной технологии орошения, способствующей равномерному поливу при использовании дождевальной машины Bauer «Rainstar T-61» для орошения сенокосов и пастбищ, обеспечивающего соответствие объема воды требуемому уровню влагозапасов участков поля на момент их полива; оценка возможности данной поливной техники.

Материалы и методы исследований. На момент закладки опыта агрохимическая характеристика почвы пахотного (0,2...0,25 м) слоя была отмечена удовлетворительной кислотностью ($pH = 6,39$) с высоким уровнем подвижных форм фосфора (267,6), а также обменного калия (280 мг на 1 кг почвы). В целом почвы опытного участка отвечали предъявляемым требованиям для выращивания и возделывания многолетних трав, в том числе сенокосно-пастбищной травосмеси. На опытном участке были внесены следующие виды минеральных удобрений: фосфорные (суперфосфат в дозе 60 кг/га д.в.); калийные (хлористый калий в дозе 120 кг/га д.в.) и азотные (карбамид в дозе 120 кг/га д.в.). Минеральные удобрения вносили осенью при одинаковом агрофоне на всех опытных вариантах.

Анализ поливного агрегата БШДУ Bauer «Rainstar T-61» позволил экспериментально установить степень влияния поливных норм и интенсивности дождя на объемы поверхностного стока в конкретных почвенно-мелиоративных условиях. С учетом разработки новой конструкции дождевателя средняя интенсивность искусственного дождя изменилась в диапазоне от 0,16...0,20 мм/мин, что предопределило ее согласование с впитывающей способностью за годы наблюдений 0,24...0,20 мм/мин. Экспериментально установлены допустимые технологические параметры искусственного дождя в вариантах 70 и 80% от НВ до появления стоков. При этом время полива до появления поверхностного стока составило 68 и 60 мин соответственно. Рационально с учетом условий приняты допустимые параметры дождя: интенсивность – от 0,25 до 0,35 мм/мин; диаметр капель – до 1,0 мм.

Результаты и их обсуждение. Экспериментальные и лабораторные наблюдения проводились в период с 2016 по 2018 гг. в рамках научной программы. Культура – травосмесь, состоящая из бобовых и злаковых компонентов. Опытты проводили на учебно-опытном оросительном комплексе (УООК) «Гушково-1» в Могилевской области Беларуси.

В начале 1980-х гг. прошлого века на территории учебно-опытного хозяйства УО БГСХА

был разработан впоследствии введенный в эксплуатацию в 1985 г. оросительный комплекс «Тушково-1». Проект был реализован при активном участии научных сотрудников академии. Основное назначение данного учебно-опытного оросительного комплекса заключалось (комплекс существует и на сегодняшний день) в обеспечении условий для учебной и производственной практики студентами БГСХА, а также в создании платформы для проведения научных исследований магистрантами, аспирантами, докторантами и сотрудниками УО БГСХА. Функционал комплекса также включает в себя мониторинг водного режима и регулирование влажности почв в соответствии с потребностями возделываемых сельскохозяйственных культур.

В 2005-2006 гг. ОАО ПМК-87 «Водстрой» была проведена комплексная реконструкция учебно-опытного оросительного комплекса «Тушково-1», что значительно повысило его эффективность и технологичность. Ключевым элементом модернизации стала установка новейших дождевальных систем от ведущих мировых производителей (Россия, США, Франция, Италия, Австрия), которые заменили устаревшее оборудование. Эти инновационные системы обеспечили существенную экономию ресурсов, внедрили автоматизированное дистанционное управление поливом с контролем влажности почвы и предоставили возможность гибко адаптировать схемы орошения (фронтальные, круговые, смешанные) к любым особенностям участка и рельефа (см.: Яланский Д.В., Игнатенко И.А., Леганьков А.В. Современная оросительная система «Тушково» и ее использование для научных целей // Сборник научных трудов. Горки, 2018. С. 74-77).

На рисунке 1 представлена схема оросительной системы «Тушково-1», расположенная вблизи населенного пункта Чарны Горьковского района Могилевской области.

Были частично реконструированы пруд, насосная станция и трубопроводы, а также создана система внутрипочвенного орошения и специальная стоковая площадка для углубленного изучения водного баланса орошаемых земель.

На сегодняшнем этапе развития технологий орошения наблюдается рост популярности мобильных барабанно-шланговых дождевальных установок (БШДУ). Суть работы таких машин связана с передвижением дождевателя в результате вращения барабана самой машины и последующей намотки шланга. Такие машины для дождевания обладают рядом достоинств, в числе которых – возможность полного отказа

от устройства трубопроводов под землей, а также доступность к их использованию на территориях с нестандартной конфигурацией. Дождевательные установки подобного рода в части забора воды способны работать в составе с гидрантами, а также осуществлять забор воды из открытых водных источников [6, 7].

Благодаря многолетней репутации ведущего европейского производителя и экспортера мобильных барабанно-шланговых дождевательных машин, очевидным стал выбор австрийской компании Bauer. Для наших лабораторно-полевых экспериментов была выбрана модель Bauer «Rainstar T-61», оснащенная дальнеструйным дождевальным аппаратом SR-140.

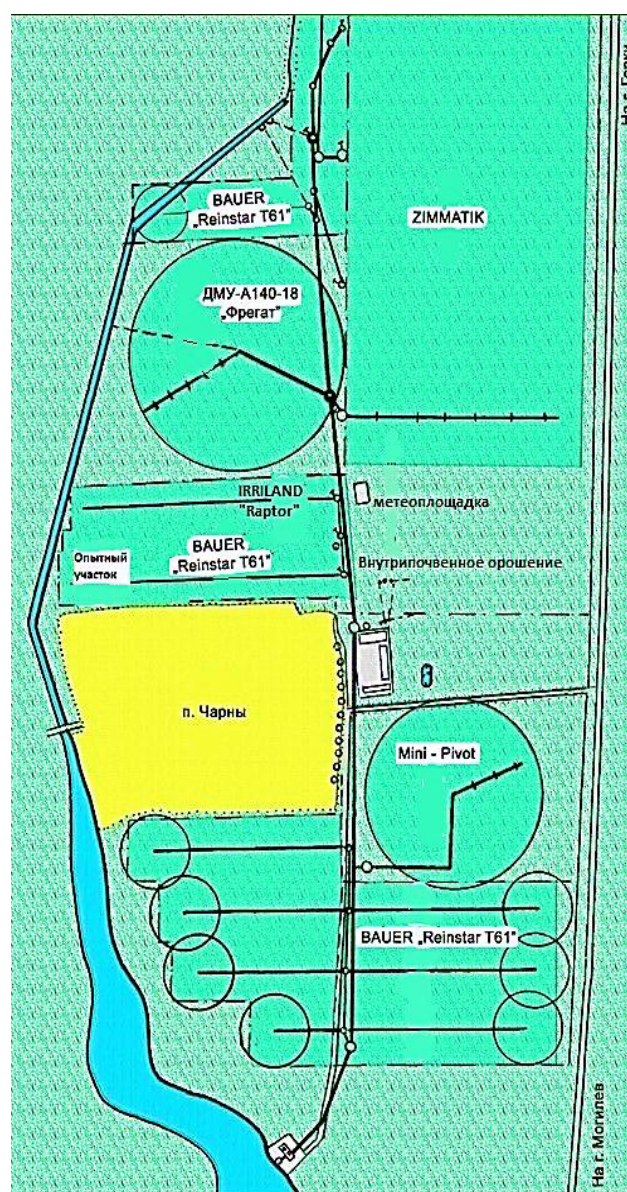


Рис. 1. Схема оросительной системы «Тушково-1»

Fig. 1. Scheme of the irrigation system "Tushkovo-1"

Таблица 1. Результаты опытов по непрерывному дождеванию и поливу по тактам
Table.1. Results of experiments on continuous sprinkler irrigation and cyclic irrigation

Варианты проведения полива	Фактическая норма полива, мм	Предполивная влажность, % от НВ	Время полива до появления стока, мин	Норма полива до появления стока, мм
Непрерывный	–	70% от НВ	68	17,8
	–	80% от НВ	60	15,6
Полив по тактам: 5 + 10 + 5 мм	20	70% от НВ	стока не было	
Полив по тактам: 5 + 10 + 15 мм	30		стока не было	
Полив по тактам: 5 + 10 + 5 мм	20	80% от НВ	стока не было	
Полив по тактам: 5 + 10 + 15 мм	30		стока не было	

Результаты первого года исследований позволили разработать эффективные приемы дождевального орошения для сенокосно-пастбищных угодий. Были определены оптимальные нормы и графики полива, гарантирующие отсутствие поверхностного стока и луж. Эксперимент включал в себя сравнение двух пороговых значений влажности почвы (70 и 80% НВ) и двух подходов к подаче воды: непрерывного и порционного.

Для обеспечения достоверности данных эксперименты проводились в трех повторностях, как это предусмотрено в методиках [8, 9]. Сравнение эффективности непрерывного дождевания и тактового полива представлено в таблице 1.

Результаты анализа таблицы 1 показывают, что допустимые нормы полива, превышение которых предшествует образованию поверхностного стока, равны 17,8 мм при уровне влажности 70% от НВ и 15,6 мм при уровне 80% от НВ. При этом время до начала поверхностного стока составляет 68 и 60 мин соответственно. В случае деления поливных норм на такты сток не зарегистрирован.

Для точного измерения поверхностного стока в рамках экспериментов по непрерывной технологии орошения были специально подготовлены площадки размером 2 × 5 м [10-12]. В качестве оросителей использовались дождевальные насадки диаметром 16 и 30 мм, являющиеся частью дождевального аппарата SR-140. Интенсивность подачи воды составляла 0,25 мм/мин для

меньшей насадки и 0,35 мм/мин – для большей. Объем стока определялся путем прямого измерения. Все результаты опыта представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Анализ полученных данных выявил тесную взаимосвязь величины стока и интенсивности дождя. Наблюдалось увеличение стока с 6 до 8 мм при норме полива 20 мм и повышение интенсивности дождя с 0,25 до 0,35 мм/мин. Данные результаты послужили основанием для обоснованного анализа плотности сложения почвенных горизонтов и ее инфильтрационной способности в условиях орошения на протяжении всего периода наблюдений.

Для оценки плотности сложения почвы в течение вегетационного периода сенокосно-пастбищной травосмеси применялся буровой метод [13, 14]. В период с мая по октябрь 2016-2018 гг. ежемесячно проводился трехкратный мониторинг плотности почвы по сезонам и горизонтам. Исследования выполнялись на опытном участке с предполивной влажностью, установленной на уровне 70% от наименьшей влагоемкости (НВ). Средние значения плотности сложения почвы в слоях 0-30, 0-40 и 0-100 см за указанный период представлены на рисунке 3.

Как следует из результатов исследований почвы (рис. 3), в мае 2016 г. начальная плотность сложения в верхнем 40-сантиметровом слое почвы при влажности 70% от НВ достигала

Таблица 2. Величина поверхностного стока в зависимости от поливных норм и интенсивности дождя

Table. 2. The amount of surface runoff depending on irrigation rates and rainfall intensity

Показатели	Значения			
Элемент склона	верхняя часть		основание склона	
Интенсивность дождя, мм/мин	0,25	0,35	0,25	0,35
Норма полива, мм	20	20	30	30
Продолжительность выдачи поливной нормы, мин	88	67	132	100
Объем поверхностного стока, мм	6	8	8	10
Средняя глубина промачивания, см	26	24	31	30

Примечание. $HCP_{0,5\%} = 2,7$, средняя ошибка опыта – 1,3.

Note: the least significant difference 0,5% = 2,7, the average error of the experiment is 1.3.

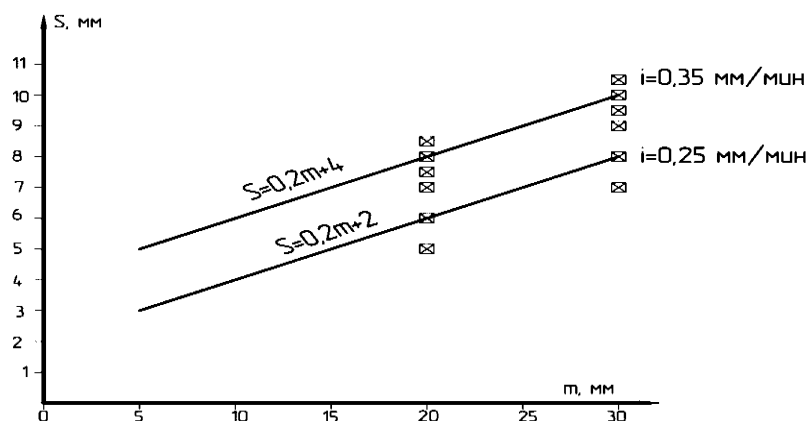


Рис. 2. Изменение объема поверхностного стока (S)

Fig. 2. Change in surface runoff volume (S)

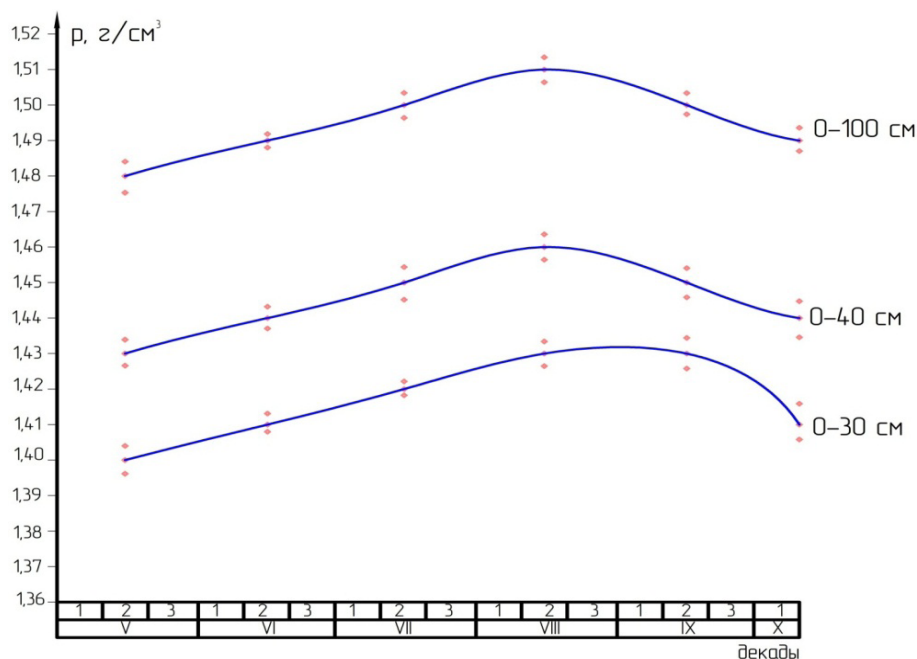


Рис. 3. Динамика плотности сложения почвы в слоях 0-30, 0-40 и 0-100 см в среднем за май-октябрь в 2016-2018 гг.

Fig. 3. Results of determining the steady-state rate of water absorption by soil at different levels of pre-irrigation moisture for 2016-2018

1,40 г/см³. К началу августа 2018 г. и к моменту завершения эксперимента данный показатель увеличился до 1,50 г/см³.

Таким образом, за период с 2016 по 2018 гг. плотность почвы претерпела изменения в пределах от 1,40 до 1,50 г/см³.

В ходе наблюдений для оценки водопроницаемости руководствовались рекомендациями [15]. Результаты ее определения приведены в таблице 3.

Результаты наблюдений выявили тенденцию уплотнения почвы в процессе ее изучения (рис. 3).

Таблица 3. Результаты определения установившейся скорости впитывания воды почвой при различных уровнях предполивной влажности за 2016-2018 гг.

Table. 3. Results of determining the steady-state rate of water absorption by soil at different levels of pre-irrigation moisture for 2016-2018

Показатели	Вариант опыта					
	нижний предел – 70% от НВ			нижний предел – 80% от НВ		
	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Установившаяся скорость впитывания воды, мм/мин	0,24	0,22	0,21	0,23	0,21	0,20

Указанное уплотнение в свою очередь привело к снижению установившейся скорости водопоглощения, которая по годам наблюдений уменьшилась с 0,24 (2016 г.) до 0,20 мм/мин (2018 г.) (табл. 3). В результате интенсивность дождя превысила скорость водопоглощения, что и привело к стоку. Для решения указанной проблемы было разработано техническое предложение, направленное на обеспечение дождя с мелкодисперсными каплями.

Успешное достижение поставленной цели стало результатом создания инновационной конструкции дождевального аппарата с гидротурбиной. Это новое техническое решение (патент № 2759221 РФ), что значительно улучшило эффективность процесса дождевания [16]. Принцип взаимодействия водного потока и реактивной крыльчатки в данном усовершенствованном аппарате, разработанном для

БШДУ типа Bauer «Rainstar T-61», представлен на рисунке 4.

В ходе лабораторных исследований было определено, что для достижения средней интенсивности искусственного дождя наиболее эффективным является соотношение напора к диаметру поливных канавок ($H/d_{отв.}$) в пределах 2000-8000. Данный диапазон был реализован при подаче воды под напором от 5,0 до 20 м к аппарату, оснащенному канавками диаметром 2,5 мм (0,0025 м). Детальные технические характеристики турбинного дождевального аппарата, полученные в результате этих испытаний, представлены в таблице 4.

В результате анализа данных, представленных в таблице 4, отмечена успешность работы разработки и конструкторского предложения в силу того, что полученная средняя интенсивность дождя (0,16-0,20 мм/мин) отвечает показателям водопоглощения почвы (0,24-0,20 мм/мин).

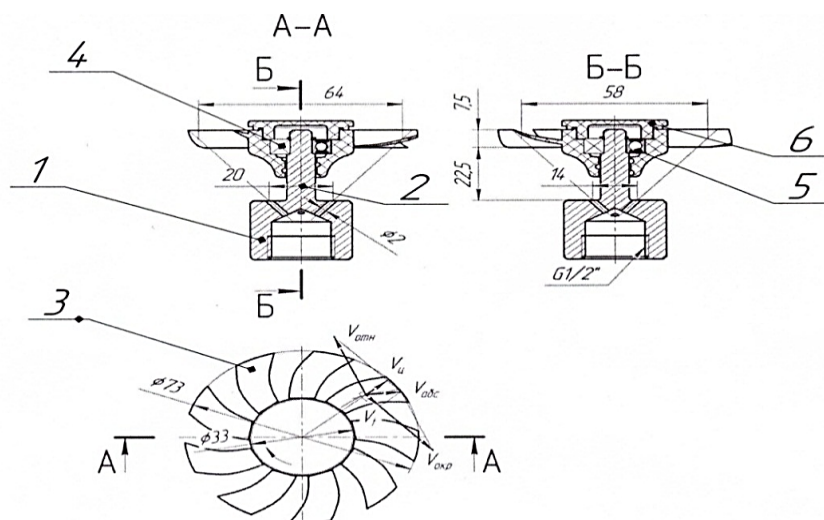


Рис. 4. Схема взаимодействия воды с реактивной крыльчаткой:

1 – пробка; 2 – ось; 3 – крыльчатка; 4 – подшипник; 5 – уплотнитель; 6 – крышка

Fig. 4. Diagram of the interaction of water with a reactive impeller

1 – plug, 2 – axle, 3 – impeller, 4 – bearing, 5 – seal, 6 – cover

Таблица 4. Технические характеристики дождевального аппарата турбинного типа для БШДУ типа Bauer «Rainstar T-61»

Table 4. Technical characteristics of the turbine-type sprinkler for the Bauer «Rainstar T-61» type

Характеристики	Размерность	Величины
Тип	–	реактивная крыльчатка с лепестками
Принцип действия дождевального аппарата	–	непрерывный
Диаметр отверстия, $d_{отв.}$	мм	2,0...4,0
Число отверстий	шт.	4
Зона работы дождевального аппарата при соотношении, $H/d_{отв.}$	–	2000...8000
Площадь орошения с конкретного участка в зависимости от соотношения $H/d_{отв.}$	м ²	5...200
Давление при работе в дождевальном аппарате	МПа	До 0,2
Средняя интенсивность искусственного дождя, $i_{ср}$	мм/мин	0,16...0,20
Диапазон изменения среднего диаметра капель, $d_{ср.}$	мм	2,0...2,2

Выводы

Экспериментальные данные показали, что критические объемы воды для непрерывного дождевания, не вызывающие эрозии, составили 17,8 мм (при 70% от НВ) и 15,6 мм (при 80% от НВ). Непрерывный полив при данных нормах приводил к поверхностному стоку через 68 и 60 мин. При этом прерывистый полив, когда норма разбивалась на части, полностью исключал поверхностный сток.

Для оптимизации непрерывного дождевания с использованием дождевальной машины

Bauer «Rainstar T-61» была разработана новая конструкция дождевального аппарата, основанная на принципе реактивной крыльчатки. Лабораторные испытания показали, что интенсивность искусственного дождя, генерируемая аппаратом (0,16-0,20 мм/мин), соответствует скорости впитывания воды почвой (0,24-0,20 мм/мин). Это указывает на хорошую адаптацию разработанного нами аппарата и применение к конкретному рельефу и почвы исследуемой территории.

Список использованных источников

1. Шевченко В.А., Кирейчева Л.В. Комплексная мелиорация – основа технологического обеспечения продовольственной безопасности и сохранения плодородия почв // Природообустройство. 2025. № 1. С. 6-12. DOI: 10/26897/1997-6011-2025-1-12. EDN: WULZRS
2. Сельское хозяйство Республики Беларусь: статистический буклет / Национ. статист. комитет Республики Беларусь. Минск: 2025. 35 с.
3. Новиков А.Е., Новиков А.А. Научное обоснование орошаемого земледелия // Орошаемое земледелие. 2023. № 3 (42). С. 5-7. EDN: MRMZHR
4. Мажайский Ю.А., Голубенко М.И., Яланский Д.В. Капельное орошение цветочных растений на склонах оврага // Мелиорация. 2025. № 3 (113). С. 16-20. EDN: GDFTPY
5. Новиков А.Е., Комарова О.П. Проблемы и направления исследований в орошаемом земледелии // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 5. С. 8-10. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-5-8-10. EDN: JQPSYT
6. Агейкин А.В. История создания и усовершенствования планговых дождевателей барабанного типа // Вестник мелиоративной науки. 2019. № 2. С. 16-28. EDN: SJKEVR
7. Рязанцев А.И., Агейкин А.В. Регулирующие расходно – напорные характеристики планговых дождевателей барабанного типа на продольном уклоне // Вестник мелиоративной науки. 2019. № 1. С. 48-54.
8. Ольгаренко Г.В., Рязанцев А.И., Терпигорев А.А. Совершенствование технологического процесса орошения и конструкции планго-барабанных дождевальных машин с плосковорачиваемым плангом // Экология и строительство. 2020. № 1. С. 32-1. DOI: 10.35688/2413-8452-2020-01-004. EDN: UUPRTC
9. Новиков А.Е., Сиуков С.С., Тихонова М.К., Семененко С.Я. Агромелиоративные способы борьбы с ирригационным стоком в условиях градуированных орошаемых земель (на примере землепользования опытной станции «Орошаемая») // Орошаемое земледелие. 2025, № 1 (48). С. 42-48. DOI: 10.35809/2618-8279-2025-1-7.
10. Костенко М.Ю., Мельничук Д.С., Тетерин В.С. Повышение равномерности распределения дождя за счет применения дождевальной установки с траекторией полива близкой к прямоугольной // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2021. № 4. С. 138-143.
11. Агейкин А.В., Чесноков Р.А., Тимошин Ю.Н., Шогенов Ю.Х. Математическая модель распределения искусственного дождя плангового дождевателя // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2024. Т. 16. № 3. С. 102-108.
12. Тищенко А.П., Сидоренко Д.П. Определение поливных норм на орошаемых землях Крыма

References

1. Shevchenko V.A., Kirejcheva L.V. Integrated land reclamation as the basis for technological food security and soil fertility preservation. Prirodoobustrojstvo. 2025. № 1. P. 6-12. DOI: 10/26897/1997-6011-2025-1-12. EDN: WULZRS
2. Agriculture of the Republic of Belarus: Statistical Booklet. Statistician. Committee of the Republic of Belarus. Minsk: 2025. 35 p.
3. Novikov A.E., Novikov A.A. Scientific support of irrigated agriculture. *Irrigated agriculture*. 2023. № 3 (42). P. 5-7. EDN: MRMZHR
4. Mazhayskij Yu.A., Golubenko M.I., Yalanskij D.V. Drip irrigation of flower plants on the slopes of a ravine // Land reclamation. 2025. № 3 (113). P. 12-16. EDN: GDFTPY
5. Novikov A.E., Komarova O.P. Problems and research directions in irrigated agriculture. *Land reclamation and water management*, 2021. № 5. P. 8-10. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-5-8-10. EDN: JQPSYT
6. Ageikin A.V. History of the creation and improvement of hose sprinklers of the drum type // Bulletin of reclamation science. 2019. № 2. P. 16-28. EDN: SJKEVR
7. Ryazantsev A.I., Ageikin A.V. Regulating flow and pressure characteristics of hose sprinklers of the drum type on a longitudinal slope // Bulletin of Reclamation Science. 2019. № 1. P. 48-54.
8. Olgarenko G.V., Ryazantsev A.I., Terpigorev A.A. Improvement of the technological process of irrigation and the design of hose-drum sprinkler machines with a flat-rolled hose. 2020. № 1. P. 32-1. DOI: 10.35688/2413-8452-2020-01-004. EDN: UUPRTC
9. Novikov A.E., Siukov S.S., Tikhonova M.K., Semenenko S.Y. Agro-reclamation methods of combating irrigation runoff in the conditions of graded irrigated lands (on the example of land use of the experimental station "Oroshayemaya") // *Irrigated agriculture*, № 1 (48). P. 42-48. DOI: 10.35809/2618-8279-2025-1-7.
10. Kostenko M.Y. Increasing the uniformity of rain distribution due to the use of a sprinkler system with a near-rectangular irrigation trajectory / M.Y. Kostenko, D.S. Melnichuk, V.S. Teterin // Bulletin of the Ryzan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2021. № 4. P. 138-143.
11. Ageikin A.V. Mathematical model of artificial rain distribution of a host sprinkler / A.V. Ageikin, R.A. Chesnokov, Yu.K. Shogenov // Bulletin of the Ryszan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2024. Т. 16. № 3. P. 102-108.
12. Tishchenko A.P., Sidorenko D.P. Determination of irrigation rates on irrigated land in Crimea. *Irrigated agriculture*. 2022. № 3 (36). P. 11-15. DOI: 10.35809/2618-8279-2022-3-10.
13. Savina O.V. Change of physical and agrochemical characteristics of soil during land works // Bulletin of the Ryzan

// Орошаемое земледелие. 2022. № 3 (36). С. 11-15. DOI: 10.35809/2618-8279-2022-3-10. EN: PWZGMO D

13. Савина О.В. Изменение физических и агрохимических характеристик почвы при проведении земельных работ // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2021. № 3. С. 68-75. EDN: JNUEPA

14. Ушаков Р.Н., Ручкина А.В., Елизаров А.О. К вопросу об информационном управлении плодородием почв // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2021. № 3. С. 85-92. EDN: TKEEGZ

15. Дубенок Н.Н., И.А. Левшунов, Гемоннов А.В. Водопроницаемость почвы и поверхностный сток при дождевании суданской травы в условиях восточной части Беларуси // Мелиорация. 2025. № 3(113). С. 39-44.

16. Пат. 2759221 Российская Федерация, МПК A01G25/00. Дождевательный аппарат турбинного типа /Д.В. Яланский Н.Н. Дубенок, Ю.А. Мажайский, Ф. Икроми, М.И. Голубенко. Опубликовано. 11.11.2021.

Информация об авторах

Дмитрий Владимирович Яланский, канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнических сооружений и водоснабжения, Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; ORCID: 0000-0002-7808-8204, dimka-045@mail.ru

Иван Александрович Левшунов, старший преподаватель кафедры мелиорации и водного хозяйства, Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, cdtnkfyeirf@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-3384-8059

Юрий Анатольевич Мажайский, д-р с.-х. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», Мещерский филиал, ORCID: 0000-0002-0743-8289; director@mntc.pro

Михаил Иванович Голубенко, заслуженный изобретатель Российской Федерации, Мещерский научно-технический центр, ORCID: 0009-0003-8543-4448; golubenko-mihail@mail.ru,

State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2021. № 3. P. 68-75. EDN: JNUEPA

14. Ushakov R.N. On the issue of information management of soil fertility/ R.N. Ushakov, A.V. Ruchkina, A.O. Elizarov // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2021. № 3. P. 85-92. EDN: TKEEGZ

15. Dubenok N.N. Water permeability of the soil and surface runoff during sprinkling of Sudanese grass in the conditions of the eastern part of Belarus / Levshunov I.A., Gemonov A.V. // Land reclamation. 2025. № 3(113). P. 39-44.

16. Pat. 2759221 Russian Federatio, МПК A01G 25/00/ Turbine type spring unt /D.V. Yalanskij N.N. Dubenok, Yu.A. Mazhayskij, F. Ikromi, M.I. Golubenko. Publ. 11.11.2021.

Information about the authors

Dmitry V. Yalansky, CSs (Tech), Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures and Water Supply, Belarusian State Agricultural Academy, dimka-045@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7808-8203

Ivan A. Levshunov, Senior Lecturer at the Department of Land Reclamation and Water Management, Belarusian State Agricultural Academy. cdtnkfyeirf@yandex.ru ORCID: 0009-0003-3384-

Yuri A. Mazhaysky, DSs (Agro), Professor, Chief Researcher, Federal Scientific Center of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Meshchersky Branch, director@mntc.pro, ORCID: 0000-0002-0743-8289

Mikhail I. Golubenko, Honored Inventor of the Russian Federation, Meshchersky Scientific and Technical Center, golubenko-mihail@mail.ru, ORCID: 0009-0003-8543-4448

Критерий авторства / Criteria of authorship

Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе результатов исследования / All authors of this study were directly involved in the planning, implementation and analysis of the results of the study.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests:

The authors claim no conflict of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.03.2026

Поступила после рецензирования / Received 05.09.2026

Принята к публикации / Accepted for publication 07.09.2026

Оригинальная статья

УДК 631.674.6 (470.0)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-32-40>

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ МОЛОДОГО ВИШНЕВОГО САДА НА ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРУЮЩИХСЯ КОНТУРОВ УВЛАЖНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ЦЕНТРАЛЬНОГО НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ

Н.Н. Дубенок¹, А.В. Гемонов², Е.С. Калмыкова³, А.В. Зубков⁴^{1, 2, 3, 4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация¹ndubenok@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-9059-9023²agemonov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-2561-8179³kalmukova.es@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0006-6951-030X⁴azubkov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-2410-152X

Аннотация. В статье представлены результаты трехлетних исследований влияния режима капельного орошения молодого вишневого сада на параметры формирующихся контуров увлажнения и развитие корневой системы в условиях дерново-подзолистых почв Центрального Нечерноземья. Целью исследований являлось установление зависимости геометрических характеристик контуров увлажнения и объема корневой системы от диапазона поддерживаемой влажности почвы (60-80, 70-90, 80-100% НВ) и обоснование оптимального режима орошения. В ходе исследований проведен анализ пространственного распределения влажности почвы в подкапельном пространстве, определены глубина и ширина контуров увлажнения, а также динамика объема корневой системы в 2023-2025 гг. Установлено, что с увеличением предполивного порога влажности возрастает глубина промачивания (до 50-60 см), расширяется горизонтальное распространение влаги и увеличивается объем почвы, поддерживаемый в диапазоне 70-90% НВ. Наибольший объем корневой системы зафиксирован при режиме 80-100% НВ (до 1294 см³ в 2025 г.), тогда как при отсутствии орошения показатели были минимальными. Статистическая обработка результатов методом дисперсионного анализа показала достоверность различий вариантов (НСР_{0,05} составила 25,6-31,1 см³ по годам). Полученные данные свидетельствуют о тесной взаимосвязи режима орошения с формированием корнеобитаемого объема и позволяют рекомендовать режим 70-90% НВ как обеспечивающий оптимальное соотношение глубины и ширины контура при рациональном использовании оросительной воды.

Ключевые слова: контур увлажнения, капельное орошение, молодой вишневый сад, объем корневой системы

Формат цитирования: Дубенок Н.Н., Гемонов А.В., Калмыкова Е.С., Зубков Н.Н. Влияние режима капельного орошения молодого вишневого сада на параметры формирующихся контуров увлажнения в условиях дерново-подзолистых почв Центрального Нечерноземья. Природообустройство. 2026;Т.19(4):32-40. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-32-40>

Scientific article

THE EFFECT OF THE DRIP IRRIGATION REGIME OF A YOUNG CHERRY ORCHARD ON THE PARAMETERS OF THE EMERGING MOISTURE CONTOURS IN THE CONDITIONS OF SOD-PODZOLIC SOILS OF THE CENTRAL NON-CHERNOZEM REGION

N.N. Dubenok¹, A.V. Gemonov², E.S. Kalmykova³, N.N. Zubkov⁴^{1, 2, 3, 4} 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; Moscow, Russian Federation¹ndubenok@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-9059-9023²agemonov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-2561-8179³kalmukova.es@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0006-6951-030X⁴azubkov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-2410-152X

Abstract. The article presents the results of three-year studies of the effect of drip irrigation of a young cherry orchard on the parameters of the emerging moisture contours and the development of the root

system in the conditions of sod-podzolic soils of the Central Non-Chernozem region. The aim of the work was to establish the dependence of the geometric characteristics of the humidification contours and the volume of the root system on the range of maintained soil moisture (60-80, 70-90 and 80-100% HB) and to substantiate the optimal irrigation regime. In the course of the research, the spatial distribution of soil moisture in the subshell space was analyzed, the depth and width of the moisture contours were determined, as well as the dynamics of the volume of the root system in 2023-2025. It has been found that with an increase in the pre-irrigation moisture threshold, the depth of soaking increases (up to 50-60 cm), the horizontal distribution of moisture expands, and the volume of soil maintained in the range of 70-90% HB increases. The largest volume of the root system was recorded at 80-100% RH (up to 1294 cm³ in 2025), while in the absence of irrigation, the indicators were minimal. Statistical processing of the results by the method of variance analysis showed the reliability of differences between the variants (HCR_{0,05} was 25.6-31.1 cm³ over the years). The data obtained indicate a close relationship between the irrigation regime and the formation of the root volume and allow us to recommend a regime of 70-90% HB as providing the optimal ratio of depth and width of the contour with the rational use of irrigation water.

Keywords: moisture contour, drip irrigation, young cherry orchard, volume of the root system

Citation format: Dubenok N.N., Gemonov A.V., Kalmykova E.S., Zubkov N.N. The effect of the drip irrigation regime of a young cherry orchard on the parameters of the emerging moisture contours in the conditions of sod-podzolic soils of the Central Non-Chernozem region. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(4):32-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-32-40>

Введение. В условиях Центрального Нечерноземья при возделывании молодых плодовых садов особое значение приобретает оптимизация водного режима почвы, поскольку дерново-подзолистые почвы характеризуются сравнительно невысокой влагоемкостью, неоднородностью профиля и повышенной чувствительностью к переувлажнению и иссушению. В этой связи капельное орошение рассматривается как наиболее перспективный способ орошения молодых садов, обеспечивающий локальное увлажнение корнеобитаемой зоны и рациональное использование оросительной воды [1-3].

При капельном орошении в почве формируются локальные зоны увлажнения – контуры (или луговицы) увлажнения. В работах отечественных исследователей показано, что контуры увлажнения характеризуются выраженной пространственной неравномерностью распределения влаги, а их форма и размеры зависят от расхода капельниц, продолжительности и кратности поливов, водно-физических свойств почвы и предполивной влажности почвы [4-7]. В связи с этим параметры контуров увлажнения рассматриваются как важнейший критерий обоснования режима капельного орошения.

Существенный вклад в развитие научных представлений о формировании контуров увлажнения при капельном поливе внесли исследования, направленные на экспериментальное картирование влажности почвы и построение изолиний влажности. Установлено, что повышение поливной нормы

и продолжительности полива, как правило, приводит к росту глубины промачивания, тогда как горизонтальные размеры контура в большей степени зависят от расхода водовыпуска и параметров почвы [8-11].

В работах Л.В. Кирейчевой предложены расчетные подходы к определению параметров контуров увлажнения, позволяющие обосновывать поливные нормы при капельном орошении садовых насаждений. Автором показано, что оптимальный режим капельного полива должен обеспечивать формирование контура увлажнения, охватывающего активную часть корневой системы, при сохранении благоприятного воздушного режима почвы [12].

Для условий Центрального Нечерноземья значительный интерес представляют исследования, выполненные на дерново-подзолистых почвах. В них показано, что при правильно подобранном режиме капельного орошения возможно поддержание заданной влажности корнеобитаемого слоя без ухудшения аэрации и без потерь влаги за пределы корнеобитаемой зоны [13]. Это подтверждает целесообразность анализа не только средней влажности почвы, но и пространственных параметров контура увлажнения.

В исследованиях Н.Н. Дубенка и соавт. режим капельного орошения обосновывается через поддержание влажности почвы на уровне не ниже 60-80% НВ. При этом формирование контуров увлажнения рассматривается как ключевой фактор, определяющий развитие корневой системы и рост растений. Авторами показано, что

повышение уровня влажности сопровождается увеличением размеров и однородности контуров увлажнения, однако требует строгого контроля для предотвращения переувлажнения почвы [14, 15].

Таким образом, анализ отечественных исследований показывает, что при капельном орошении молодых плодовых садов, в том числе вишни, параметры контуров увлажнения являются интегральным показателем эффективности выбранного режима полива. Для дерново-подзолистых почв Центрального Нечерноземья оптимальный режим капельного орошения должен обеспечивать формирование устойчивых контуров увлажнения, охватывающих корнеобитаемую зону, без избыточного промачивания нижележащих горизонтов, что требует дальнейших экспериментальных исследований применительно к молодым вишневым садам.

Цель исследований: установление влияния различных режимов капельного орошения молодого вишневого сада на параметры формирующихся контуров увлажнения и динамику развития корневой системы в условиях дерново-подзолистых почв Центрального Нечерноземья; обоснование оптимального диапазона поддерживаемой влажности почвы.

Материалы и методы исследований. Для построения контуров увлажнения в период с 2023 по 2025 гг. производились точечные измерения влажности по сетке в подкапельном пространстве на глубине 0-60 см и на расстоянии

от оси капельницы с шагом в 10 см. Данные представлялись в виде числовых матриц, которые интерпретировались в карты изопьез (в долях от НВ). Образцы почв на влажность отбирались почвенным буром, влажность определялась термостатно-весовым методом. Такой подход позволяет выделить внешнюю границу увлажнения по выбранному уровню, сравнить конфигурацию и «насыщенность» зоны при разных режимах, а также оценить риск избыточной фильтрации по поведению изолиний на глубине.

Объем корневой системы учитывался в конце каждого вегетационного периода путем отбора трех контрольных растений в каждой повторности по вариантам опыта. Статистическая обработка экспериментальных данных выполнялась при помощи однофакторного дисперсионного анализа с расчетом наименьшей существенной разницы на 5%-ном уровне значимости. Статистические расчеты производились в пакете анализа данных Microsoft Office Excel 2016. Повторность опыта – трехкратная.

Результаты и их обсуждение. По результатам проведенных полевых наблюдений с 2023 по 2025 гг. были получены контуры увлажнения для каждого варианта опыта с поддержанием влажности в корнеобитаемом слое 60-80, 70-90 и 80-100% НВ (рис. 1-3).

Анализ распределения влажности почвы в подкапельном пространстве показал, что формирование контуров увлажнения существенно

Таблица 1. Средние значения основных характеристик почвы опытного участка

Table 1. Average values of the main soil characteristics of the experimental plot

Горизонт	Плотность, г/см ³	Пористость, %	НВ, %	Содержание глинистых частиц, %
$BPC \frac{0-5}{5}$	1,18	51,90	31,9	22,89
$Anax_1 \frac{5-25}{25}$	1,15	51,82	30,8	20,19
$Anax_2 \frac{25-42}{17}$	1,24	44,44	29,5	23,06
$A_2 \frac{43-50}{7}$	1,42	44,27	30,0	29,63
$A_2B \frac{50-62}{12}$	1,51	43,62	28,9	33,49
$B \frac{63-91}{28}$	1,53	43,75	25,4	30,42
$BC \frac{91-115}{24}$	1,52	42,14	21,6	30,16
$C > 115$	1,58	40,67	19,4	33,45

зависело от установленного режима орошения. На примере варианта 60-80% НВ (2023 г.) установлено, что максимальные значения влажности фиксировались в зоне, прилегающей к оси капельницы (0-10 см), где на глубине 10 см влажность достигала 94,3% НВ (табл. 2). По мере удаления от оси капельницы и увеличения глубины отмечалось снижение влажности почвы.

Вертикальное распределение влаги носило выраженный градиентный характер: на глубине 10-20 см формировалась наиболее интенсивно увлажненная зона (80-90 и 90-100% НВ), тогда как на глубине 40-60 см влажность снижалась до 40-60% НВ. Горизонтально контур увлажнения распространялся в пределах 20-30 см от капельницы, при этом за пределами 30 см влажность приближалась к фоновым значениям.

Сравнение контуров увлажнения по трем режимам орошения (60-80, 70-90 и 80-100% НВ) показало выраженную зависимость их параметров от установленного диапазона поддерживаемой влажности почвы.

С повышением интенсивности режима орошения последовательно возрастают глубина промачивания, ширина контура и объем почвы с влажностью выше 70-80% НВ. При этом режим 70-90% НВ обеспечивает оптимальное соотношение глубины и ширины контура.

В 2024 г. при режиме капельного орошения 70-90% НВ формировался более равномерный контур увлажнения по сравнению с вариантом 60-80% НВ предыдущего года (табл. 3). Максимальные значения влажности фиксировались в зоне, прилегающей к оси капельницы, где на глубине 10 см влажность достигала 94,3% НВ. В слое 10-30 см сохранялась устойчивая зона с влажностью 80-90% НВ, что свидетельствует о формировании оптимально увлажненного корнеобитаемого горизонта.

Анализ представленных контуров показал, что характер распределения влаги сохраняет общую закономерность, выявленную ранее: с увеличением диапазона поддерживаемой

Таблица 2. Данные по распределению влажности почвы в подкапельном пространстве на варианте 60-80% НВ в 2023 г.

Table 2. Data on the distribution of soil moisture in the sub-drip space on the 60-80% HB option in 2023

Глубина контура, см	Шаг замера от оси капельницы, см						
	30	20	10	0	10	20	30
	Влажность почвы, %НВ						
10	67,4	76,2	85,0	93,5	84,2	73,6	70,4
20	62,8	65,1	82,6	85,8	83,3	69,4	66,1
30	59,9	64,8	78,3	81,6	78,1	61,7	58,9
40	58,6	63,1	67,3	74,4	72,6	60,3	54,2
50	56,4	60,7	61,8	64,0	62,5	57,6	53,7
60	42,8	47,4	52,6	58,7	56,2	54,3	49,9

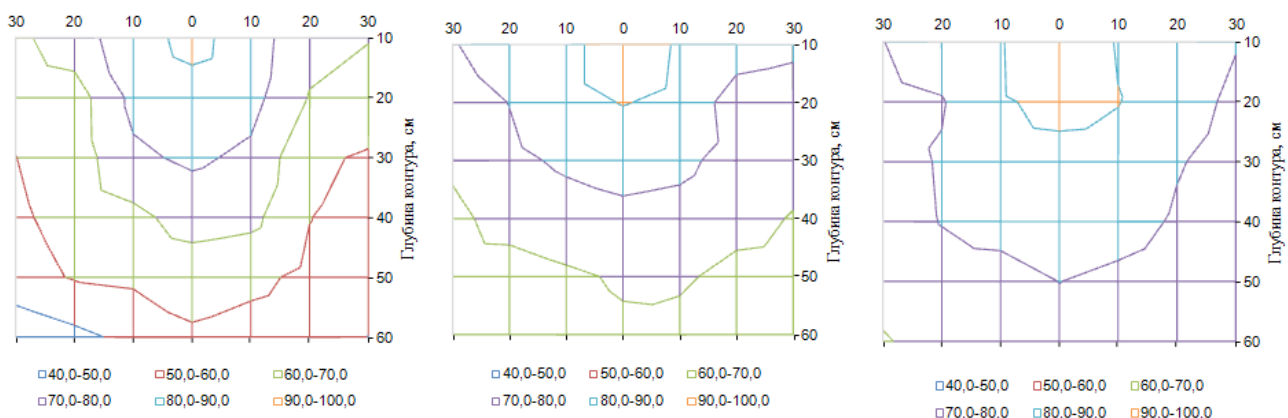


Рис. 1. Контурсы увлажнения варианта орошения 60-80, 70-90 и 80-100% НВ соответственно в 2023 г.

Fig. 1. The moisture contour of the irrigation option is 60-80% HB, 70-90% HB and, respectively, 80-100% HB in 2023

Таблица 3. Данные по распределению влажности почвы в подкапельном пространстве на варианте 70-90% НВ в 2024 г.

Table 3. Data on the distribution of soil moisture in the sub-drip space on the 70-90% HB option in 2024

Глубина контура, см	Шаг замера от оси капельницы, см						
	30	20	10	0	10	20	30
	Влажность почвы, % НВ						
10	77,8	84,1	88,3	94,3	87,8	77,4	67,7
20	72,3	69,0	88,4	90,9	88,6	68,8	61,2
30	64,8	66,9	80,8	84,2	82,9	73,4	58,9
40	59,2	65,0	75,2	77,2	76,3	68,6	54,1
50	53,6	59,8	66,8	68,2	67,3	65,0	49,3
60	46,9	48,1	57,9	65,2	56,7	53,8	47,4

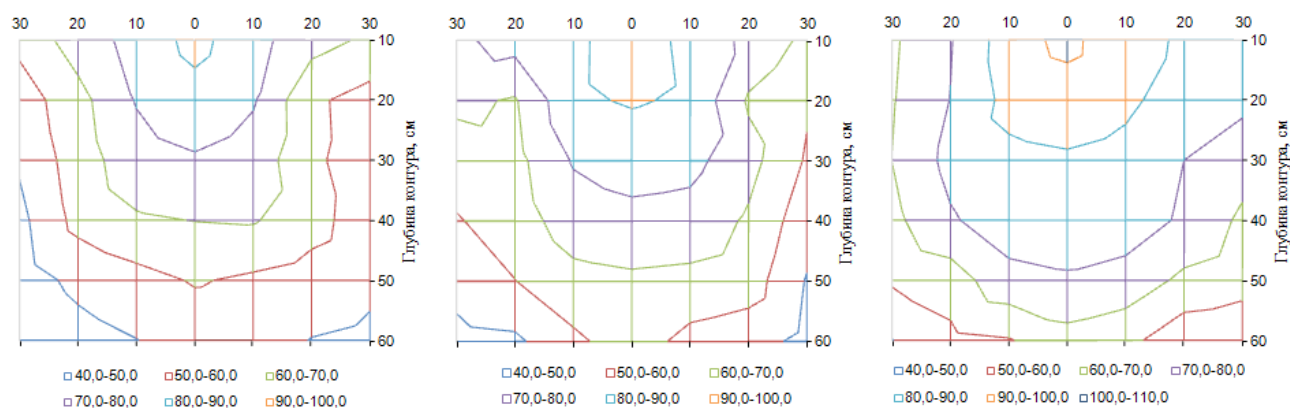


Рис. 2. Контуры увлажнения варианта орошения 60-80, 70-90 и 80-100% НВ соответственно в 2024 г.

Fig. 2. The moisture contour of the irrigation option is 60-80% HB, 70-90% HB and, respectively, 80-100% HB in 2024

Таблица 4. Данные по распределению влажности почвы в подкапельном пространстве на варианте 80-100% НВ в 2025 г.

Table 4. Data on the distribution of soil moisture in the sub-drip space on the 80-100% HB option in 2025

Глубина контура, см	Шаг замера от оси капельницы, см						
	30	20	10	0	10	20	30
	Влажность почвы, % НВ						
10	81,2	86,7	91,4	99,9	92,2	87,6	79,8
20	76,4	82,9	93,5	97,2	93,7	83,9	77,4
30	71,8	85,0	88,3	89,8	88,7	85,2	73,7
40	67,5	82,8	85,5	86,9	85,8	83,3	69,5
50	62,1	76,5	80,1	80,3	78,4	74,2	67,6
60	56,4	64,8	75,8	73,4	72,6	69,8	64,1

влажности почвы возрастают глубина и ширина контура увлажнения.

Наиболее мощный контур формируется при режиме 80-100% НВ. В этом варианте зона повышенной влажности (80-90% НВ и выше) охватывает практически весь корнеобитаемый слой до 50-60 см. Отмечаются максимальное горизонтальное распространение влаги (до 25-30 см от оси капельницы) и наибольший объем почвы, вовлеченный в процесс водообеспечения.

В 2025 г. при режиме капельного орошения 80-100% НВ максимальные значения влажности фиксировались в приосевой зоне капельницы: на глубине 10 см влажность достигала 99,9% НВ, в слое 10-20 см устойчиво сохранялись значения 91-97% НВ.

Таким образом, увеличение предполивного порога влажности приводит к последовательному росту глубины и площади контура увлажнения. Режим 70-90% НВ обеспечивает более сбалансированное распределение влаги

в пределах корнеобитаемого слоя, тогда как режим 80-100% НВ формирует наиболее мощный, но более водоемкий контур.

Степень увлажнения почвы и распределения влаги по почвенному контуру оказывает влияние на биометрические показатели развития корневой системы вишни (рис. 4). Полученные данные свидетельствуют о выраженной зависимости формирования корневой системы от уровня влагообеспеченности. Во все годы исследований максимальный объем корней формировался при наиболее высоком режиме увлажнения (80-100% НВ). Вариант 70-90% НВ также обеспечивал интенсивное развитие корневой системы и лишь незначительно уступал максимальному режиму. При снижении влажности до 60-80% НВ наблюдалось уменьшение объема корней, однако показатели существенно превышали контроль. Минимальные значения во все годы отмечены без орошения, что подтверждает лимитирующее влияние дефицита влаги на рост корневой системы.

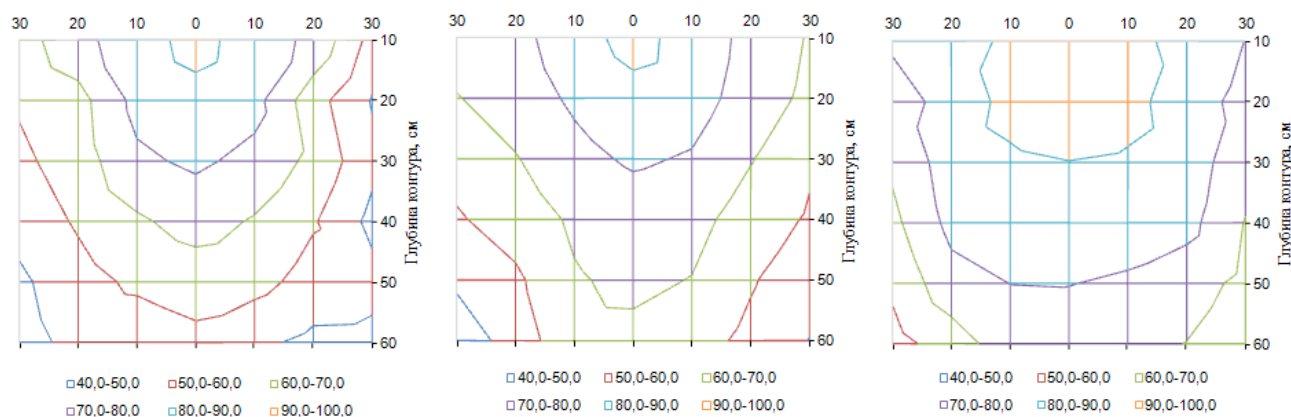


Рис. 3. Контурсы увлажнения варианта орошения 60-80, 70-90 и 80-100% НВ соответственно в 2025 г.

Fig. 3. The moisture contour of the irrigation option is 60-80% НВ, 70-90% НВ and, respectively, 80-100% НВ in 2025

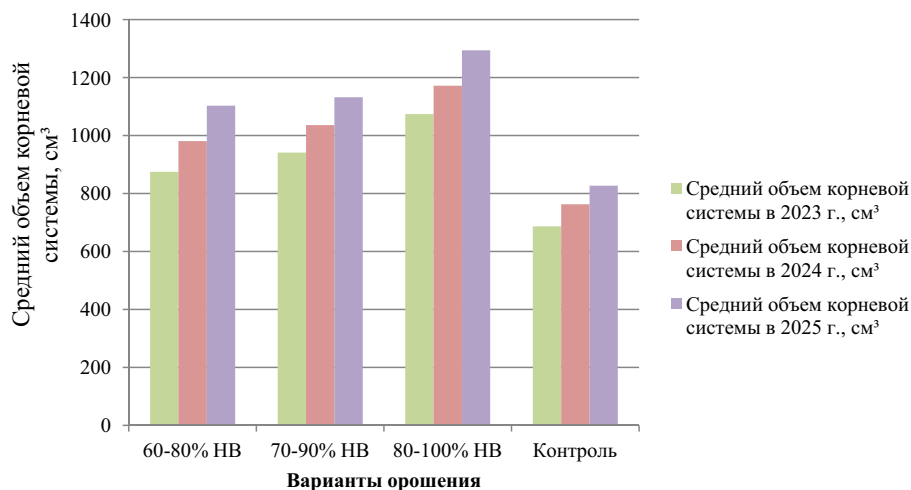


Рис. 4. Средний объем корневой системы вишни по вариантам опыта

Fig. 4. Average volume of the cherry root system according to the experimental variants

Статистический анализ подтвердил достоверность выявленных различий. Наименьшая существенная разница ($HSP_{0,05}$) составила: 25,6 см³ в 2023 г.; 27,9 см³ в 2024 г.; 31,1 см³ в 2025 г. Различия вариантов орошения превышали соответствующие значения $HSP_{0,05}$ во все годы исследований, что свидетельствует о статистически значимом влиянии режима капельного орошения на объем корневой системы вишни ($p \leq 0,05$).

Выводы

1. Установлено, что параметры формирующихся контуров увлажнения при капельном орошении существенно зависят от диапазона поддерживаемой влажности почвы. С увеличением предполивного порога от 60-80 до 80-100% НВ последовательно возрастали глубина промачивания (до 50-60 см), ширина горизонтального распространения влаги (до 25-30 см от оси капельницы) и объем почвы, поддерживаемый в диапазоне 70-90% НВ.

2. Объем корневой системы вишни во все годы исследований достоверно увеличивался по мере повышения уровня увлажнения почвы. Максимальные значения показателя отмечены при режиме 80-100% НВ (до 1294 см³ в 2025 г.), минимальные – на контроле без орошения.

3. Различия между вариантами орошения статистически достоверны ($HSP_{0,05}$ составила: 25,6 см³ в 2023 г.; 27,9 см³ в 2024 г.; 31,1 см³ в 2025 г.), что подтверждает значимое влияние режима капельного орошения на формирование корневой системы.

4. В условиях дерново-подзолистых почв Центрального Нечерноземья режим 70-90% НВ может рассматриваться как наиболее сбалансированный, обеспечивающий формирование достаточного объема увлажненной почвы

и интенсивное развитие корневой системы при более рациональном использовании оросительной воды по сравнению с режимом 80-100% НВ.

Таким образом, проведенные трехлетние исследования подтвердили определяющую роль режима капельного орошения в формировании параметров контуров увлажнения и развитии корневой системы молодого вишневого сада в условиях дерново-подзолистых почв Центрального Нечерноземья. Установлено, что геометрические характеристики контуров увлажнения (глубина промачивания, горизонтальное распространение влаги и объем почвы, поддерживаемый в диапазоне оптимальной влажности) напрямую зависят от уровня поддерживаемой влажности почвы.

С увеличением предполивного порога влажности от 60-80 до 80-100% НВ наблюдалось последовательное расширение контура увлажнения и вовлечение в процесс водообеспечения более глубоких горизонтов почвы. Это сопровождалось достоверным увеличением объема корневой системы вишни и формированием более мощного корнеобитаемого слоя. В то же время чрезмерное повышение влажности приводило к углублению зоны промачивания, что потенциально может снижать экономию поливной воды.

Полученные результаты свидетельствуют о тесной взаимосвязи водного режима почвы с морфогенезом корневой системы и подтверждают необходимость оптимизации параметров капельного орошения с учетом почвенно-климатических условий региона. В условиях Центрального Нечерноземья наиболее рациональным представляется режим 70-90% НВ, обеспечивающий сбалансированное формирование контура увлажнения и интенсивное развитие корневой системы при экономном использовании оросительной воды.

Список использованных источников

1. Дубенок Н.Н., Гемонов А.В. Формирование корневой системы саженцев сливы при капельном орошении и распределение влаги по почвенному профилю в условиях Нечерноземной зоны // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. № 4. С. 9-13. EDN: UYXMLO
2. Штанько А.С., Шкура В.Н. Геометрия локальных контуров капельного увлажнения почвы, формирующихся в южных черноземах // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 3. С. 123-140. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-123-140. EDN: PTMNJY
3. Dubenok N.N., Gemonov A.V., Lebedev A.V. The influence of drip irrigation on growth of plum seedlings in central non-black soil zone of European Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies, Volgograd, Krasnoyarsk, 18-20 июня 2020 г. Krasnoyarsk Science and

References

1. Dubenok N.N., Gemonov A.V. Formation of the root system of plum seedlings under drip irrigation and distribution of moisture along the soil profile in the conditions of the Non-Chernozem zone // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2018. № 4. P. 9-13. EDN: UYXMLO
2. Shtanko A.S., Shkura V.N. Geometry of local contours of drip soil moistening formed in southern chernozems // Land reclamation and hydraulic engineering. 2022. V. 12, No 3. P. 123-140. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-123-140. EDN: PTMNJY
3. Dubenok N.N. The influence of drip irrigation on growth of plum seedlings in central non-black soil zone of European Russia / N.N. Dubenok, A.V. Gemonov, A.V. Lebedev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering

Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 548. Volgograd, Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 82014. DOI: 10.1088/1755-1315/548/8/082014

4. Ахмедов А.Д., Галиуллина Е.Ю. Контуры увлажнения почвы при капельном орошении // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2012. № 3 (27). С. 183-188. EDN: PCXLGR

5. Сторчоус В.Н., Кременской В.И., Вислобокова Т.О. Архитектоника корневой системы яблони в зависимости от объема локального увлажнения // Научные труды Южного филиала Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Крымский агротехнологический университет». Серия «Сельскохозяйственные науки». 2014. № 161. С. 102-108. EDN: STCATB

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

7. Assouline S. The Effects of Microdrip and Conventional Drip Irrigation on Water Distribution and Uptake // Soil Science Society of America Journal. 2002. Vol. 66, № 5. Pp. 1630-1636. DOI: 10.2136/sssaj2002.1630

8. Васильев С.М., Шкура В.Н., Штанько А.С. Форма и параметры контуров капельного увлажнения почв на склоновых землях // Аграрный научный журнал. 2020. № 3. С. 70-75. DOI: 10.28983/asj.y2020i3pp70-75

9. Штанько А.С., Шкура В.Н. Внутриконтурное распределение влажности почвы при капельном орошении // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2017. № 4 (28). С. 62-78. EDN: ZRWIRF

10. Штанько А.С., Шкура В.Н. О трансформации контуров капельного увлажнения почвы в постполивной период // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 69-86. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-69-86. EDN: AYRQFY

11. Кирейчева Л.В., Асканбек А.А., Нурабаев Д.М. Расчет контуров увлажнения для обоснования поливной нормы при капельном орошении плодоносящего сада в условиях предгорной зоны Жамбылской области // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 1 (91). С. 100-104. DOI: 10.23670/irj.2020.91.1.019

12. Обумахов Д.Л. Линейные параметры контуров увлажнения при капельном поливе // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 100. С. 735-748. EDN: SJAZBL

13. Романовская А.Ю., Шумакова К.Б. Регулирование водного режима дерново-подзолистого почв в условиях плодового питомника и характер распределения влаги в почвенном профиле при различных режимах увлажнения // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2021. № 106. С. 130-162. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-106-130-162. EDN: PCSYTS

14. Дубенок Н.Н., Гемонов А.В. Параметры контуров увлажнения при капельном орошении саженцев сливы в плодном питомнике // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: Материалы Международной научно-практической интернет-конференции, г. Новочеркасск, 13-20 июля 2020 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2020. С. 21-25. EDN: DPTTNO

15. Dubenok N.N., Gemonov A.V., Lebedev A.V. Effects of drip irrigation regimes on growth, quality plum seedlings, and water use efficiency in European Russia // Journal of Physics:

and Biotechnologies, Volgograd, Krasnoyarsk, 18-20 июня 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 548. Volgograd, Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 82014. DOI: 10.1088/1755-1315/548/8/082014.

4. Akhmedov A.D., Galiullina E.Yu. Contours of soil moistening in drip irrigation // Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and higher professional education. 2012. № 3(27). P. 183-188. EDN: PCXLGR

5. Storchous V.N., Kremensky V.I., Vislobokova T.O. Architectonics of the root system of an apple tree depending on the volume of local moistening // Scientific works of the Southern branch of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine "Crimean Agrotechnological University". Series: Agricultural Sciences. 2014. № 161. P. 102-108. EDN: STCATB

6. Shtanko A.S., Shkura V.N. Determination of the irrigation rate for the formation of the primary local contour of drip-moistened soil. 2023. V. 13, No 1. P. 19-38. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-1-19-38. EDN: ZXMTKO

7. Assouline S. The Effects of Microdrip and Conventional Drip Irrigation on Water Distribution and Uptake // Soil Science Society of America Journal. 2002. Vol. 66. No. 5. P. 1630-1636 DOI: 10.2136/sssaj2002.1630.

8. Vasilyev S.M., Shkura V.N., Shtanko A.S. Form and parameters of contours of drip moistening of soils on slope lands // Agrarian Scientific Journal. 2020. No 3 P. 70-75. DOI: 10.28983/asj.y2020i3pp70-75.

9. Shtanko A.S., Shkura V.N. Intra-contour distribution of soil moisture in drip irrigation. 2017. № 4(28). P. 62-78. EDN: ZRWIRF

10. Shtanko A.S., Shkura V.N. On the transformation of the contours of drip soil moistening in the post-irrigation period. 2023. V. 13, No 3. P. 69-86. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-69-86. EDN: AYRQFY

11. Kireycheva L.V. Calculation of moisture contours for the justification of the irrigation rate in drip irrigation of a fruit-bearing garden in the conditions of the foothill zone of the Zhambyl region / L.V. Kireycheva, A.A. Askanbek, D.M. Nurabayev // International Research Journal. 2020. № 1 (91). P. 100-104. DOI: 10.23670/irj.2020.91.1.019

12. Obumakhov D.L. Linear parameters of moisture contours during drip irrigation / // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2014. № 100. P. 735-748. EDN: SJAZBL

13. Romanovskaya A.Yu. Regulation of the water regime of sod-podzolic soil in the conditions of a fruit nursery and the nature of moisture distribution in the soil profile under various moisture regimes / A.Yu. Romanovskaya K.B. Shumakova // Bulletin of the Soil Institute named after V.V. Dokuchaev. 2021. № 106. P. 130-162. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-106-130-162. EDN: PCSYTS

14. Dubenok N.N., Gemonov A.V. Parameters of moisture contours in drip irrigation of plum seedlings in a fruit nursery // Land reclamation as a driver of modernization of the agro-industrial complex in the context of climate change: Materials of the International Scientific and Practical Internet Conference, Novocherkassk, July 13-20, 2020. Novocherkassk: ООО «Лик», 2020. P. 21-25. EDN: DPTTNO

15. Dubenok N.N. Effects of drip irrigation regimes on growth, quality plum seedlings, and water use efficiency in European Russia / N.N. Dubenok, A.V. Gemonov, A.V. Lebedev // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 25 сентября – 04 2020 года.

Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 25 сентября 2020 г. Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. Vol. 1679. P. 52093. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052093

Информация об авторах

Николай Николаевич Дубенок, академик РАН, д-р с.-х. наук, профессор, заведующий кафедрой сельскохозяйственных мелиораций ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; WOS Research ID: AAC-7746-2020; Scopus Author ID: 57200111134; РИНЦ ID: 315062; ORCID: 0000-0002-9059-9023; ndubenok@rgau-msha.ru

Александр Владимирович Гемонов, д-р с.-х. наук, доцент кафедры сельскохозяйственных мелиораций ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; WOS Research ID: AAE-7030-2022; Scopus Author ID: 57214148770; РИНЦ ID: 877247; ORCID: 0000-0002-2561-8179; a.gemonov@rgau-msha.ru

Калмыкова Екатерина Сергеевна, аспирант кафедры сельскохозяйственных мелиораций ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; ORCID: 0009-0006-6951-030X; kalmukova.es@rgau-msha.ru

Зубков Александр Валерьевич, канд. экон. наук, доцент кафедры плодоводства, виноградарства и виноделия ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; WOS Research ID: AAE-3954-2022; Scopus Author ID: 5794682300; РИНЦ ID: 726066; ORCID: 0000-0003-2410-152X; a.zubkov@rgau-msha.ru

Вклад авторов в написание статьи:

Н.Н. Дубенок – руководство исследованием, формулирование основных направлений исследования, разработка методологии исследования

А.В. Гемонов – формулирование концепции экспериментальных исследований, проведение исследований

Е.С. Калмыкова – проведение исследований, подготовка рукописи и её графическое оформление

А.В. Зубков – проведение исследований

Поступила в редакцию / Received 15.05.2026

Поступила после рецензирования / Received 18.08.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 18.08.2026

Vol. 1679. Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 52093. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052093.

Information about the authors

Nikolay N. Dubenok, Academician of the Russian Academy of Sciences, Ds (Agro), Professor, Head of the Department of Agricultural Reclamation of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; WOS Research ID: AAC-7746-2020; Scopus Author ID: 57200111134; RSCI ID: 315062; ORCID: 0000-0002-9059-9023;

Alexander V. Gemonov, Ds (Agro), Associate professor of the Department of Agricultural Reclamation of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; WOS Research ID: AAE-7030-2022; Scopus Author ID: 57214148770; RSCI ID: 877247; ORCID: 0000-0002-2561-8179; a.gemonov@rgau-msha.ru

Ekaterina S. Kalmykova, postgraduate student of the Department of Agricultural Reclamation ORCID: 0009-0006-6951-030X; kalmukova.es@rgau-msha.ru;

Alexander V. Zubkov, CSs (Econ), Associate professor of the Department of Fruit Growing, Viticulture and Winemaking of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; WOS Research ID: AAE-3954-2022; Scopus Author ID: 5794682300; RSCI ID: 726066; ORCID: 0000-0003-2410-152X; a.zubkov@rgau-msha.ru

Contribution of the authors to the writing of the article:

N.N. Dubenok – research management, formulation of the main directions of research, development of research methodology

A.V. Gemonov – formulation of the concept of experimental research, conducting research

E.S. Kalmykova – conducting research, preparing a manuscript and its graphic design

A.V. Zubkov – conducting research

Оригинальная статья

УДК 626.87:556.3:556.3:631.62

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-41-45>

ГИДРОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОСУШИТЕЛЬНО-УВЛАЖНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

С.Э. Бадмаева^{1✉}, Ю.В. Бадмаева²^{1,2} Красноярский государственный аграрный университет; г. Красноярск, Российская Федерация¹ s.bad55@mail.ru; ORCID0009-0006-0272-6608² badmaeva3912@mail.ru; ORCID0009-0002-2489-6326

Аннотация. Озерновская осушительно-увлажнительная система двухстороннего регулирования водного режима запроектирована в Республике Хакасия на территории Ширинского муниципального образования в пойме р. Белый Июс. Техническая схема осушительно-увлажнительной системы была разработана на основании естественных условий объекта: безнапорное питание грунтовыми водами прируслового стока р. Белый Июс и близкое залегание гравийно-галечных отложений значительной мощности с большой дренирующей способностью. Гидролого-геологические условия территории характеризуется тем, что Черноозерновская мульда в силу синклинального залегания характеризуется формированием в ней высоконапорных пластово-трещинных вод. В пределах изучаемого объекта выделены три водоносных горизонта: четвертичных отложений, самохвальской свиты нижнего карбона, надалтайской и алтайской свит нижнего карбона. Воды четвертичных отложений – безнапорные, характеризуются отличной водообильностью, водупором является аргиллитовая глина. На массиве, в пониженных частях, уровень грунтовых вод практически совпадает с дневной поверхностью, и лишь в периферических частях участка по мере увеличения высоты первой надпойменной террасы глубина залегания уровня грунтовых вод увеличивается до 2-3 м. На основной площади массива грунтовые воды имеют гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав. В почвенно-мелиоративном отношении по уровню залегания грунтовых вод на массиве выделены три подрайона.

Ключевые слова: осушение, увлажнение, гидрогеологические условия, почвы, мелиоративное районирование, сооружения

Формат цитирования: Бадмаева С.Э., Бадмаева Ю.В. Гидролого-геологические условия функционирования осушительно-увлажнительной системы. Природообустройство. 2026;Т.19(4):41-45. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-41-45>

Original article

HYDROLOGICAL AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF FUNCTIONING OF THE DRAINAGE AND HUMIDIFICATION SYSTEM

S.E. Badmaeva,^{1✉} Yu.V. Badmaeva²^{1,2} Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation¹ s.bad55@mail.ru; ORCID0009-0006-0272-6608² badmaeva3912@mail.ru; ORCID0009-0002-2489-6326

Abstract. The Ozernovskaya drainage and humidification system of two-way regulation of the water regime was designed in the Republic of Khakassia on the territory of the Shirinsky municipality in the floodplain of the Bely Iyus River. The technical scheme of the drainage and humidification system was developed based on the natural conditions of the facility: unpressurized groundwater supply from the riverbed runoff of the Bely Iyus River and a close occurrence of gravel and pebble deposits of considerable capacity with high drainage capacity. The hydrogeological and geological conditions of the area are characterized by the fact that the Chernoozerskaya mull, due to its synclinal structure, is characterized by the formation of high-pressure strata-fractured waters. Within the studied area, three aquifers have been identified: those in the Quaternary deposits, the Samokhval Formation of the Lower Carboniferous, and the Naddaltai and Altai Formations of the Lower Carboniferous. The waters in the Quaternary deposits are unconfined and are characterized by excellent water yield; the aquitard is argillaceous clay. On the massif, in the lower parts, the groundwater level practically coincides with the daytime surface, and only in the peripheral parts of the area, as the height of the first above-floodplain terrace increases, does the depth of the groundwater level rise to 2-3 m. On the main area of the massif, the groundwater

has a hydrocarbonate calcium-magnesium composition. From a soil and reclamation perspective, three sub-areas have been identified on the massif based on the groundwater level.

Keywords: drainage, moistening, hydrogeological conditions, soils, land reclamation zoning, structures

Citation format: Badmaeva S.E., Yu.V. Badmaeva. Hydrological and geological conditions for the functioning of a drainage and irrigation system. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):41-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-41-45>

Введение. Вопросам функционирования осушительно-увлажнительных систем с различными гидрогеологическими условиями посвящены работы [1, 2]. Мелиоративные мероприятия на таких системах направлены на своевременное удаление из корнеобитаемого слоя избытков влаги и в то же время обеспечивать увлажнение в засушливые периоды вегетации растений. Близкое залегание грунтовых вод, формирование водного режима почв в сложных гидрогеологических условиях диктуют различные способы и методы осушения. Регулированию водного режима аллювиально-торфянистых почв в условиях Средней Сибири посвящены работы [3-6].

Мелиоративные системы двустороннего регулирования, эксплуатируемые в этих природно-климатических условиях, имеют особенности, связанные с морфологическим строением почвенного профиля, которые подразделяются по глубине залегания галечников следующим образом:

- скелетные (кровля галечников находится на глубине 0-20 см);
- неразвитые (галечники находятся на глубине 20-40 см);
- укороченные (подстилаются галечником с глубины 40-80 см);

почвы полного профиля (глубина залегания галечников превышает 80 см [7]).

При бесснежной зиме и низкой температуре воздуха почвы замерзают на большую глубину и относятся к длительно сезонно промерзающим почвам [8]. Климат резко континентальный с холодной продолжительной зимой и жарким коротким летом. Континентальность климата сказывается на больших различиях как между дневными и ночными температурами, так и между температурами зимы и лета. Суточные колебания температур составляют 1-20°C. Максимальная амплитуда колебания температуры в течение года достигает 82,3°C. Максимальная среднесуточная температура июля составляет +17,4°C, минимальная в январе –19,3°C. Устойчивые морозы заканчиваются в третьей декаде марта. Устойчивое промерзание почвы происходит в третьей декаде октября. Глубина промерзания почв: средняя – 198 см, максимальная – 225.

Цель исследований: изучение гидрогеологических условий формирования

заболоченного массива; проведение почвенно-мелиоративного районирования для дальнейшей эксплуатации системы в современных условиях.

Материалы и методы исследований.

Исследования проводились на Озерновской осушительно-увлажнительной системе, в пределах юго-западной части Чебаково-Балахтинской впадины, в долине р. Белый Июс в Республике Хакасия, в соответствии с методами почвенных и геолого-гидрологических изысканий [9, 10]. Обследование массива выполнялось с применением беспилотного летательного аппарата Геоскан-201. Использовались картографические материалы, фондовые и архивные данные, для наблюдения за уровнем грунтовых вод применялись наблюдательные скважины.

Результаты и их обсуждение. Для вовлечения заболоченного массива в землепользование были проанализированы гидролого-геологические условия местности. В гидрогеологическом отношении рассматриваемая территория располагается в юго-западной части Чебаково-Балахтинского артезианского бассейна в наиболее опущенной его части Черноозерновской мульды, которая является артезианским бассейном местного значения. В строении мульды принимают участие терригенно-туфогенные отложения нижнего карбона, перекрытые в пределах исследуемого участка четвертичными аллювиальными отложениями. Черноозерновская мульда в силу синклинального залегания характеризуется формированием в ней высоконапорных пластово-трещинных вод. Напорность водоносных горизонтов связана неравномерной трещиноватостью пород и наличием местных водоупоров, представленных чаще всего аргиллитами и туфопесчаниками.

В пределах изучаемой площади выделяются следующие водоносные горизонты и комплексы:

1. Водоносный горизонт четвертичных отложений (Q).

2. Водоносный горизонт самохвальской свиты нижнего карбона (C₁ vsm).

3. Водоносный комплекс надалтайской и алтайской свит нижнего карбона (C₁ tal + tad).

Водоносный комплекс четвертичных отложений связан с аллювиальными отложениями долины реки Белый Июс, а в краевой части

комплекса – с аллювиально-делювиальными и делювиально-пролювиальными отложениями. Водовмещающими породами являются гравийно-галечные отложения – в основном с песчаными, а также с суглинистыми заполнителями. Мощность водоносной толщи ориентировочно оценивается в 50 м (по данным наблюдательных скважин, это максимальная мощность). Воды четвертичных отложений – безнапорные. Нижним относительным водоупором является аргиллитоподобная глина – кора выветривания аргиллитов самохвальской свиты нижнего карбона, мощность которой составляет не более 2,0 м.

В кровле водоносной толщи залегают мало-мощные (0,3-0,5, редко 1,5-2,0 м) суглинки и торф болотного генезиса, которые лишь в случае близкого стояния уровня грунтовых вод могут обеспечить незначительный местный напор (не более 0,5 м). Глубина залегания уровня грунтовых вод на большей части исследуемого массива составляет не более 0,51,0 м. В прибрежной части озера Черного наблюдается практическое совпадение уровней грунтовых вод с дневной поверхностью. Максимальные уровни отмечены в октябре.

В периферических частях участка по мере увеличения высоты первой надпойменной террасы глубина залегания уровня грунтовых вод увеличивается до 2-3 м. Питание грунтовых вод осуществляется за счет фильтрации речных вод, инфильтрации атмосферных осадков, а также за счет потоков вод из коренных пород, преимущественно в периферической части водоносного комплекса.

Водоносный комплекс четвертичных гравийно-галечных отложений отличается хорошей водообильностью. Дебиты скважин изменяются от 48 до 518 м³/сут. Удельные дебиты варьируют в широких пределах от 24-60 до 330-2600 м³/сут. Коэффициенты фильтрации составляют 29-230 м/сут.

На основной площади массива грунтовые воды имеют гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав. По мере приближения к склонам коренных вод катионный состав вод становится кальциево-натриевым, а непосредственно в краевой части комплекса – натриево-кальциевым. В прибрежной части озера Черного состав вод идентичен составу озерных вод и определяется как гидрокарбонатный натриево-магниевый.

В районе делювиально-пролювиальных и аллювиально-делювиальных отложений к востоку от озера Черного имеют место гидрокарбонатно-сульфатно-натриевые воды. Такой состав грунтовых вод обусловлен, по-видимому, подпитыванием их водами коренных пород.

Водоприемником осушаемого болота является река Черная, левобережный приток р. Белый Июс. Река Белый Июс – правый приток реки Чулым, берущий начало из озера, расположенного на хребте Кузнецкого Алатау на высоте 1560 м над уровнем моря. Длина реки – 224 км, площадь водосбора – 5370 км². До водного поста Ефремино бассейн реки расположен в горной местности, далее – в равнинной. В верхней части русло умеренно извилистое, в средней и нижней части извилистость резко повышается.

В районе осушаемого участка поймы р. Белый Июс – двухсторонняя, имеет ширину 4-5 км. Поверхность поймы изрезана старицами, озерами, промоинами, протоками, проросла кустарником и луговым разнотравьем; пониженные участки заболочены. Наибольшая глубина достигает 4 м.

Река Черная – левобережный приток р. Белый Июс, вытекает из болота вблизи озера Черное. На всем протяжении р. Черная протекает по относительно равнинной местности. Левобережная часть бассейна более высокая, представляет собой равнину с рядом холмов. В верхнем течении правобережная часть долины заболочена. В районе осушаемого участка русло извилистое, имеет ширину 3-5 м и максимальную глубину 0,5-0,8 м; местами заросло водной растительностью. Берега низкие, высотой 0,3-0,5 м; поросли разнотравьем и кустарником.

Озеро Черное – пресное, площадь зеркала составляет 26,7 км², длина – 6 км, ширина – 4,5 км, наибольшая глубина – 4,5 м, средняя глубина – 2,6 м. Осушаемый массив расположен юго-западнее озера.

Основные гидрографические характеристики водотоков приведены в таблице.

Река Белый Июс относится к типу рек со смешанным питанием, с преобладанием снегового. Разнообразие физико-географических условий обуславливает сложный характер уровня режима. Весеннее половодье происходит несколькими волнами за счет таяния снега с разных по высоте частей бассейна и выпадения осадков на спаде половодья. Первый подъем уровня начинается одновременно с процессом интенсивного разрушения ледяного покрова в апреле, второй, более продолжительный, начинается в результате интенсивного таяния снега в высокогорных районах, где располагаются основные запасы снега. Этот подъем начинается в середине мая, в конце или начале июня достигает своего наивысшего значения. Высота подъема составляет 2,0-2,5 м над меженью. Межень устанавливается в июле и продолжается до начала весенних

Таблица. Основные гидрографические характеристики водотоков
Table. Main hydrographic characteristics of watercourses

Река – пункт	Площадь водосбора F, км ²	Длина реки L, км
р. Белый Июс – пос. Малая Ссыя	3520	100
р. Белый Июс – с. Балахчин	3840	122
р. Черная – с. Батанаково	29,6	4,65
р. Черная – дамба	46,0	7,90
Ручей без названия	7,07	6,00
Склон	14,5	2,50

ледовых явлений. В период с июля по сентябрь наблюдаются дождевые паводки, уровни их значительно ниже уровня весенних, и лишь в отдельные годы – наоборот. Продолжительность паводков составляет 3-4 дня. Вскрытие реки происходит во второй половине апреля – начале мая. Весенний ледоход продолжается 4-9 дней.

Река Черная. Наивысшие уровни наблюдаются в конце апреля – начале мая. Подъем уровня весеннего половодья составляет 0,5-1,0 м, в многоводные годы – до 1,5 м над меженью. Во второй половине мая начинается медленный спад уровней, который продолжается до ледостава. Ледостав наступает во второй половине октября. В зимний период на реке наблюдаются наледи, на отдельных участках река перемерзает.

Озеро Черное. Поступление воды в оз. Черное идет за счет талых вод и атмосферных осадков. Родниковое питание является незначительным. Подъем уровня на озере начинается в апреле, наивысшие уровни наблюдаются в конце мая – начале июня, низшие уровни наблюдаются в период зимней межени. Ледостав устанавливается в начале ноября, толщина льда на озере достигает 0,8-1,2 м, очищается ото льда в конце апреля – начале мая. Подъем уровней на озере летом от выпавших дождей составляет 0,1-0,2 м.

В почвенно-мелиоративном отношении по уровню залегания грунтовых вод на массиве выделены три подрайона. Первый подрайон объединяет почвы постоянного увлажнения с глубиной залегания уровня грунтовых вод до 0,5 м, и площадь составляет 1375 га. В этот подрайон включены торфяные маломощные, торфянисто и торфянисто-глеевые, а также лугово-болотные почвы. Торф характеризуется зольностью от 16 до 41%, объемная масса составляет 0,84-1,14 г/см³, естественная влажность колеблется от 52,8 до 68%. Мелиоративные приемы по осушению данного массива заключаются в ускоренном отводе поверхностных вод открытыми каналами.

Второй подрайон площадью 742 га объединяет длительно избыточно увлажненные почвы с глубиной залегания грунтовых вод от 0,5

до 1,0 м. В этот подрайон входят торфянисто-глеевые почвы полного профиля и лугово-болотные почвы неразвитого, укороченного и полного профилей, а также местами скелетные почвы. На этом участке основной задачей мелиоративного приема является поддержание оптимального уровня грунтовых вод для роста и развития культурных растений, что можно достичь шлюзованием.

Третий подрайон – это территория кратковременного избыточного увлажнения с уровнем глубины залегания грунтовых вод глубже 1,0 м на площади 146 га. В засушливые годы здесь необходимо дополнительное увлажнение.

Осушение массива предусматривается редкой сетью каналов, расстояние между транспортирующими собирателями составляет 1500 м. Кроме того, дополнительно через 1000 м между транспортирующими собирателями запроектированы осушители, которые используются и как увлажнительные каналы. Каналы рассчитаны на пропуск максимального расхода 3 м³/сек. (необходимого расхода на увлажнение). Водоприемником осушительной системы является р. Черная.

Увлажнение земель предусматривается двумя способами: методом шлюзования и методом поверхностного затопления по чекам. Восточная часть массива увлажняется способом шлюзования, а западная часть – поверхностным способом.

Выводы

Осушаемый массив по почвенным и гидрогеологическим условиям является сложным объектом. Преобладающими почвами на массиве являются длительно сезонно промерзающие лугово-болотные и в разной степени оглеения торфяные почвы. Лугово-болотные почвы полного профиля являются переходными от незаболоченных территорий к заболоченным и приурочены главным образом к окраинам осушаемого участка. В геологическом отношении в пределах исследуемой территории и на прилегающей площади

распространены терригенно-карбонатные отложения нижнего карбона и аллювиальные, аллювиально-делювиальные, делювиально-пролювиальные, аллювиально-делювиальные четвертичные отложения.

Повсеместно на всем массиве распространены гравийно-галечниковые отложения, которые с поверхности перекрыты легкими и средними суглинками, реже тяжелыми, иногда супесями мощностью от 0,2-0,5 до 1,5-3,0 м. Вблизи от русла

реки Белый Июс гравийно-галечниковые отложения залегают непосредственно с поверхности. Глубина залегания уровня грунтовых вод на большей части территории составляет не более 0,5-1,0 м. Грунтовые воды – в основном пресные с минерализацией 1,0-1,3 г/л.

Для вовлечения заболоченного массива в сельскохозяйственное производство необходимо провести почвенно-мелиоративное районирование с учетом всех вышеизложенных факторов.

Список использованных источников

1. Васильев С.М., Кожанов А.Л. Моделирование процесса проектирования элементов осушительной части мелиоративной системы двойного регулирования водного режима // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. 2019. № 1(01). С. 113-128. URL: http://www.rosniipm-sm1.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec16-field12.pdf (дата обращения: 28.01.2026).
2. Митрахович А.И., Казмирук И.Ч. Применение осушительно-увлажнительных систем на слабодопроницаемых минеральных почвах // Мелиорация. 2025. № 4. С. 23-28.
3. Бадмаева С.Э. Регулирование водного режима аллювиально – торфянисто – глеевых почв // Мелиорация и водное хозяйство. 2025. № 5. С. 13-17.
4. Бадмаева Ю.В. Мелиоративные мероприятия по оптимизации свойств агроландшафтов // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 3. С. 20-24.
5. Бадмаева Ю.В., Мурадян Г.А. Экологические ограничения мелиоративных режимов в агроландшафтах // Естественные и технические науки. 2023. № 5. С. 390-391.
6. Снежко В.Л., Бенин Д.М., Шишкин А.В., Бойко А.В., Скрипкин А.В. Современные изменения мелиоративного состояния орошаемых земель Алтайского края // Природобустройство. 2022. № 4. С. 13-21. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-13-21. EDN: VUCEVN
7. Танзыбаев М.Г. Почвы Хакасии. Новосибирск: Наука, 1993. 256 с.
8. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М., 1972. 360 с.
9. Корабельников Н.А., Устименко Ю.А., Пасмарнова С.П. Полевые методы гидрогеологических и инженерно-геологических исследований: учебное пособие. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2022. 181 с.
10. Шеина Е.В., Болотова А.Г., Домбовецкий А.В. Гидрология почв агроландшафтов: количественное описание, методы исследования, обеспеченность почвенных запасов влаги // Почвоведение. 2021. № 7. С. 1076-1084. EDN: RSNNXM

Информация об авторах

Софья Эрдыниева Бадмаева, д-р биол. наук, заведующая кафедрой кадастра застроенных территорий и геоинформационные технологии, профессор; ORCID0009-0006-0272-6608, РИНЦ AuthorID: 266492; s.bad55@mail.ru

Юлия Владимировна Бадмаева, канд. хим. наук, доцент; ORCID0009-0002-2489-6326, РИНЦ AuthorID: 830416; badmaeva3912@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов

С.Э. Бадмаева – общее научное руководство исследованием
Ю.В. Бадмаева – работа с литературными источниками, оформлении библиографического списка, формулировка выводов,
Поступила в редакцию / Received 10.02.2026

Поступила после рецензирования / Received 18.08.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 28.08.2026

References

1. Vasiliev S.M., Kozhanov A.L. Modeling of the design process of the elements of the drainage part of the reclamation system of dual regulation of the water regime // Ecology and water management [Electronic resource]. 2019. № 1(01). P. 113-128. URL: http://www.rosniipm-sm1.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec16-field12.pdf (date of reference: 01/28/2026).
2. Mitrakhovich A.I., Kazmiruk I.Ch. Application of drainage and humidification systems on low-permeability mineral soils // Melioration. 2025. No. 4. P. 23-28.
3. Badmaeva S.E. Regulation of the water regime of alluvial – peat – gley soils // Land reclamation and water management. 2025. No. 5. From 13-17.
4. Badmaeva Yu.V. Land reclamation measures to optimize the properties of agricultural landscapes // Land reclamation and water management. 2023. No. 3. P. 20-24.
5. Badmaeva Yu.V., Muradyan G.A. Ecological restrictions of land reclamation regimes in agrolandscapes // Natural and technical sciences. 2023. No. 5. P. 390-391.
6. Snezhko V.L., Benin D.M., Shishkin A.V., Boyko A.V., Skripkin A.V. Modern changes in the reclamation status of irrigated lands of the Altai Territory // Prirodoobustroistvo. 2022. No. 4. P. 13-21. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-13-21. EDN: VUCEVN
7. Tanzybaev M.G. Soils of Khakassia. Novosibirsk: Nauka Publ., 1993. 256 p.
8. Dimo V.N. Thermal regime of soils of the USSR. Moscow, 1972. 360 p.
9. Korabelnikov N.A., Ustimenko Yu.A., Pasmarnova S.P. Field methods of hydrogeological and engineering-geological research: a textbook. Voronezh State University. Voronezh: VSU Publishing House, 2022. 181 p.
10. Sheina E.V., Bolotova A.G., Dombovetsky A.V. Soil hydrology of agrolandscapes: quantitative description, research methods, availability of soil moisture reserves // Soil science. 2021. No. 7. P. 1076-1084. EDN: RSNNXM

About the Authors

Sofya Er. Badmaeva, D.Ss. (Biology), professor; ORCID0009-0006-0272-6608, RSCI Authorid: 266492; s.bad55@mail.ru

Yulia Vl. Badmaeva, CSs (Agro), associate professor; ORCID0009-0002-2489-6326, RSCI Authorid: 830416; badmaeva3912@mail.ru

Contribution of the authors

S.E. Badmaeva – general scientific supervision of the study
Y.V. Badmaeva – work with literary sources, design of a bibliographic list, formulation of conclusions,

Оригинальная статья

УДК 628.32/35:504.064:696.13

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-46-54>

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ИНДИВИДУАЛЬНОГО МАЛОЭТАЖНОГО ЖИЛЬЯ

А.А. Борисов¹, С.В. Зорина²

¹ Камский филиал ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Российская Федерация

² ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Отдел проектирования экологической безопасности по Пермскому и Западно-Сибирскому регионам и Республике Коми; Российская Федерация

¹ borissoff@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5847-0214

² oxota.05@mail.ru; ORCID: 0009-0005-4647-1275

Аннотация. Массовая застройка индивидуальным жильем водосборных и прибрежных территорий приводит к формированию многочисленных потенциальных источников поступления неочищенных бытовых сточных вод, что в случае утечек может негативно сказаться на состоянии почв и загрязнении водоемов. В статье рассматриваются экологические аспекты и требования по водоотведению сточных вод автономными системами биологической очистки малоэтажного дома. Приводятся данные о свойствах сточных вод жилых домов, об эффективности работы автономных очистных систем, о влиянии неочищенных сточных вод на водоем. Высказаны рекомендации по вопросам регламента строительства и эксплуатации автономных систем канализации. Обработка информации выполнялась методом системного анализа нормативных документов, химического и микробиологического состава сточных вод, сведений об эксплуатации автономных очистных канализационных систем, последствий для окружающей среды сбросов сточных вод. Автономные канализационные системы с биологической очисткой могут представлять опасность для окружающей среды ввиду своей нестабильной работы и отсутствия контроля за качеством и количеством сбрасываемых сточных вод. В целях недопущения загрязнений территорий с малоэтажной застройкой и для их вовлечения в экологический менеджмент необходима разработка нормативных актов, определяющих способы контроля за состоянием автономных канализаций, состав сбрасываемых сточных вод, а также мониторинг территорий при их массовом размещении.

Ключевые слова: сточные воды, индивидуальное жилищное строительство, водоотведение, канализация, системы очистки

Формат цитирования: Борисов А.А., Зорина С.В. Экологические аспекты использования автономных канализационных систем в условиях индивидуального малоэтажного жилья. Природообустройство. 2026;Т.19(4):46-54. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-46-54>

Scientific article

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF USING AUTONOMOUS SEWAGE SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF INDIVIDUAL LOW-RISE HOUSING

A.A. Borisov¹✉, S.V. Zorina²

Kama Branch of the Federal State Budgetary Institution "Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources", Russian Federation

² LLC "LUKOIL-Engineering", Environmental Safety Design Department for the Perm and West Siberian regions and the Komi Republic

¹ borissoff@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5847-0214

² oxota.05@mail.ru; ORCID: 0009-0005-4647-1275

Abstract. Mass development of individual housing in catchment and coastal areas leads to the formation of numerous potential sources of untreated domestic wastewater, which, in the event of leaks, can have a negative impact on soil conditions and water bodies. The article examines the environmental aspects and requirements for wastewater disposal using autonomous biological treatment systems in low-rise buildings. The article provides data on the properties of wastewater from residential buildings, the efficiency of autonomous treatment systems, and the impact of untreated wastewater on water bodies. Recommendations are made regarding the regulations for the construction and operation

of autonomous sewage systems. Methods. The information was processed using the method of systematic analysis of regulatory documents, the chemical and microbiological composition of wastewater, data on the operation of autonomous wastewater treatment systems, and the environmental consequences of wastewater discharges. Results. Autonomous sewage systems with biological treatment can pose a threat to the environment due to their unstable operation and the lack of control over the quality and quantity of discharged wastewater. To prevent pollution of areas with low-rise development and to involve them in environmental management, it is necessary to develop regulatory acts defining methods for monitoring the condition of autonomous sewage systems, the composition of discharged wastewater, and the monitoring of areas when such systems are deployed en masse.

Keywords: wastewater, individual housing construction, wastewater disposal, sewage system, treatment systems

Citation format: Borisov A.A., Zorina S.V. Environmental aspects of using autonomous sewage systems in the conditionst of individual low-rise housing. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(4):46-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-46-54>

Введение. В последние несколько лет отмечается устойчивая тенденция роста объемов индивидуального жилого строительства (ИЖС). Наиболее активно застройка происходит в пригородах и в небольших населенных пунктах [1, 2]. В малоэтажных индивидуальных домах при отсутствии возможности подключения к централизованной канализации широко применяются автономные биологические системы очистки сточных вод с септиком. Опыт эксплуатации данных систем показывает, что они характеризуются нестабильным режимом работы, сопровождающимся сбросом неочищенных сточных вод. В сочетании с отсутствием четких требований по контролю состояния автономных канализационных систем малоэтажного дома и необязательным экспертным сопровождением данного вида строительства на участках массовой малоэтажной застройки могут формироваться неблагоприятные условия для окружающей среды в результате поступления соединений азота и фосфора, патогенных микроорганизмов.

Для многоквартирного дома допускается использование автономной канализационной системы, которая может функционировать либо с очисткой сточных вод, либо с их накоплением для последующего вывоза [3]. Как правило, приоритет при выборе отдается системам с очисткой, поскольку накопление при проживании одной семьи потребует вывоз 27-76 м³ сточных вод в год [4].

Проектирование, исполнение и эксплуатация автономных канализационных систем выполняются на основании стандартов и правил [3-6]. Данные документы носят рекомендательный характер, а с учетом необязательной проектной экспертизы ИЖС это приводит к нарушениям требований по охране окружающей среды, к ошибкам в проектировании и строительстве канализационных систем, в последующем

обслуживании [7, 8]. Поскольку правила эксплуатации автономных очистных канализационных систем и методы оценки их технического состояния отсутствуют, их функционирование происходит без контроля за эффективностью очистки сточных вод.

Цель исследований: изучение экологических аспектов и требований по водоотведению сточных вод автономными системами биологической очистки малоэтажного дома; выработка рекомендаций по вопросам регламента строительства и эксплуатации автономных систем канализации.

Материалы и методы исследований. При сборе информации использовались документы, регулирующие обращение со сточными водами, отечественные и зарубежные научные публикации, собственные результаты исследований. Обработка информации производилась методом системного анализа с использованием сравнительных критериев технологий и конструкций систем канализации индивидуального жилого дома, эффективности их использования и безопасности для окружающей среды. Сравнивались аспекты отечественного и зарубежного опыта в решении проблем сброса сточных вод при малоэтажном строительстве.

Результаты и их обсуждение. По своему составу бытовые сточные воды жилых домов представляют собой смесь различных компонентов, отражающих особенности процессов жизнедеятельности жителей. По сравнению с другими сточными водами характерным для них является содержание соединений азота, фосфора, микроорганизмов, широкого спектра органических и гетероструктурных соединений [9]. Азот представлен в основном в виде минеральной (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻) и органической составляющей (аминокислоты, белок тканей и т.д.). Основная доля соединений фосфора содержится в виде коллоидной

и растворенной форм фосфатов, ортофосфатов, полифосфатов, ортофосфорной кислоты и ее анионов [10].

Наряду с микроорганизмами биома человека хозяйственно-бытовые сточные воды содержат различные патогенные бактерии, возбудители кишечных инфекций, яйца гельминтов [9].

Широкое применение бытовой химии определяет присутствие в сточных водах поверхностно-активных веществ (ПАВ), полициклических соединений, эфиров, фталатов, спиртов, других органических соединений и их производных [11, 12].

Автономные системы очистки состоят из септика и очистных сооружений с отведением очищенных сточных вод в грунт или в поверхностный водоем [3, 6]. В септике осуществляется механическая очистка сточных вод через отстаивание, в результате чего образуются осадок и всплывающие фракции. Также в септике происходит частичная биологическая очистка благодаря анаэробным процессам и разложению органических веществ.

Проектирование автономных систем основывается на предполагаемом количестве сточных вод и количестве загрязняющих веществ, продуцируемых одним жителем [3, 4]. Поскольку хозяйственно-бытовые сточные воды отражают индивидуальные условия жизни и быта, их состав может быть различным (табл. 1) [13-15].

Расхождение принятого проектными решениями состава сточных вод с фактическим отрицательно сказывается на работе автономных систем – в частности, септика. Разложение биологического субстрата значительно замедляется при высоких концентрациях взвешенных веществ и соединений азота и полностью прекращается при наличии большого количества поверхностно-активных веществ (ПАВ) [9, 12, 16].

Многие исследователи отмечают общую нестабильную эффективность автономных систем с септиком, обусловленную сезонными изменениями температур, неравномерным расходом, непостоянным составом сточных вод, отсутствием

обслуживания, неподходящим типом почв и ошибками при монтаже [17-20].

В септике протекает процесс нитрификации азота, в ходе которого происходит окисление солей аммония в нитриты, а затем в соли азотной кислоты. Это сопровождается преобразованием фосфорных соединений за счет смены анаэробных и аэробных стадий деятельности микроорганизмов: соединения фосфора анаэробными микроорганизмами переводятся в раствор и в полифосфаты (ортофосфаты), полифосфаты и ортофосфаты аэробными микроорганизмами сорбируются в активный ил [10].

Как показали многомесячные наблюдения, работа септика при различных расходах является нестабильной и сопровождается нарушением процесса нитрификации, когда органический азот микробиологическими процессами переводится в водорастворимые соединения без последующего окисления в нитраты, а из воды только часть соединений фосфора переводится в активный ил (табл. 2). Таким образом, первоочередным признаком нарушений работы септика является высокое содержание ионов аммония при малом количестве окисленных форм азота и присутствии соединений фосфора в составе сбрасываемых сточных вод.

В индивидуальном жилищном строительстве автономные канализационные системы требуют регулярной проверки и контроля за работой септика. Эти обязанности лежат на владельце очистных сооружений, который должен самостоятельно оценивать состояние системы по запаху и прозрачности воды в септике [3]. Нормативные документы не обязывают регистрировать расход, устанавливать частоту проверок или проводить химический анализ сточных вод. Сертификация септиков даже промышленного изготовления является необязательной и может быть выполнена только относительно стандарта, применимого к пластиковым изделиям для канализации [22].

В автономных системах очистки сточные воды должны направляться на очистные сооружения фильтрации, которые могут быть как

Таблица 1. Сравнительный состав хозяйственно-бытовых сточных вод

Table 1. Comparative composition of domestic wastewater

Показатели, мг/дм ³	Состав сточных вод населенных пунктов		
	с. Поим	Поселки Крайнего Севера	г. Уральск
Взвешенные вещества (ВЗВ)	82,4-116,2	50-195	140-540
Химическое потребление кислорода (ХПК)	154-223	50-243	–
Биологическое потребление кислорода за 5 суток (БПК ₅)	60,2-101,1	42-153	506-588
Азот аммонийный	5,7-9,9	6,5-18,5	51,4-44
Фосфор фосфатов	2,4	2,1-5,7	5,24-27,9

Таблица 2. Эффективность очистки сточных вод септиком [21]

Table 2. Efficiency of septic tank wastewater treatment [21]

Среднее значение*	Обеспеченность, %						Эффективность очистки, %		
	приток в септик			сброс из септика					
	15	50	85	15	50	85	15	50	85
ВЗВ, мг/л	80	200	320	80	165	250	0	18	22
БПК, мг/л	362	520	670	170	280	350	53	46	48
ХПК, мг/л	350	1000	1650	300	550	800	14	45	52
Фосфаты по фосфору, мг/л	0	14	32	6,5	10,5	14	0	25	56
Аммиачный азот, мг/л	17	47	75	80	92	105	–	–	–
Нитратный азот, мг/л	0	0,1	0,19	0	0,02	0,04	0	80	79
ОКБ*, 10 ³ х КОЕ/100 мл	220	2000	16000	370	2300	14500	–	–	9
ТКБ**, 10 ³ х КОЕ/100 мл	2	30	660	10	160	2600	–	–	–

*Общие колиформные бактерии. * total coliform bacteria

**Термотолерантные колиформные бактерии. ** thermotolerant coliform bacteria

открытого, так и подземного типа [4, 6]. Действующие нормативные документы не содержат методики выбора типа сооружения, его размеров, расчета параметров. Они только указывают на необходимость проведения изысканий, на основании которых обосновывается пригодность условий для их использования [4]. Таким образом, несмотря на допустимость применения фильтрационных сооружений, требования к методам контроля за их состоянием и составом сбрасываемых сточных вод отсутствуют. Единственным регламентированным технологическим параметром при их проектировании и эксплуатации является гидравлическая нагрузка на оросительную сеть [3, 4].

В качестве примера комплексного подхода к вопросу интеграции автономных очистных сооружений в структуру индивидуального жилого дома может служить опыт США. Разработанные Агентством по охране окружающей среды руководства по созданию децентрализованных канализационных систем учитывают структурные особенности территории, количество источников сточных вод в здании, природные условия местности, базовые стоимости вариантов канализации и многие другие факторы [16, 23]. В основе

такого подхода лежат результаты исследований, которые показали, что автономные системы с фильтрационными сооружениями, спроектированные без учета условий эксплуатации и отвечающие только формальным критериям, не могут обеспечить достаточную степень очистки сточных вод от соединений фосфора, азота и колиформных бактерий (табл. 3).

В отечественной практике наряду с автономными системами, включающими в себя септик и фильтрационные сооружения, для очистки сточных вод жилого дома разрешается применять компактные автономные системы биологической очистки заводского производства [5, 24]. В отношении этих систем установлены требования к составу сточных вод, поступающих на установку, и к показателям очищенных вод – таким, как взвешенные вещества (ВЗВ), биохимическое потребление кислорода (БПК₅), химическое потребление кислорода (ХПК), аммонийный азот и фосфор фосфатов. Вместе с тем технические стандарты не содержат требований по регистрации расхода сточных вод, указаний по периодичности и методам проверки соответствия очищенных вод паспортным характеристикам установки.

Таблица 3. Состав сбрасываемых сточных вод с септика и с песчаного поля фильтрации [23]

Table 3. Composition of wastewater discharged from a septic tank and a sand filtration field [23]

Показатель	Содержание в сбросе сточных вод*	
	после септика	после фильтрации
БПК ₅ , мг/л	25-91 (53)	0-10 (3)
ВЗВ, мг/л	10-74 (25)	0-54 (19)
Фосфаты по фосфору, мг/л	27-55 (38)	11-34 (25)
Общий азот, мг/л	40-87 (57)	22-56 (42)
Азот аммонийный, мг/л	0-83 (46)	0,1-4,0 (0,2)
ОКБ, 10 ² х КОЕ/100 мл	7,5-8,5 (8,0)	2,6-7,0 (5,6)

*Минимальное-максимальное (среднее). * – minimum-maximum (average)

Структурной альтернативой автономным системам канализации при комплексной застройке территории ИЖС является централизованная система. Однако в этом случае требуются получение заключения о соответствии проектных решений санитарным нормам и правилам, разрешение на сброс очищенных сточных вод, разработка методов контроля за процессом очистки и программы мониторинга состояния окружающей среды, а также выполнение других процедур, предусмотренных законодательством [25-27].

Массовая застройка ИЖС вдоль берегов водных объектов, на водосборных площадях и в водоохранных зонах приводит к тому, что в результате бесконтрольной фильтрации неочищенных сточных вод через почвогрунты в водные объекты попадает большое количество азота, фосфора и микроорганизмов. Их попадание в водную систему приводит к эвтрофированию и нарушению процессов саморегуляции биоценозов с доминированием наиболее приспособленных видов (хлорококковые водоросли, цианобактерии). В этом случае биомасса бактерий и фитопланктона возрастает до 200-500 г/м³ при значении 0,1-0,4 г/м³ в олиготрофных водоемах [11]. Рост биомассы приводит к нарушению физико-химических процессов (повышается pH, снижается содержание растворенного кислорода), что сказывается на ухудшении качества вод водоема и имеет негативные последствия для использования водоема в качестве источника водоснабжения [28].

Обнаружение мест поступления неочищенных бытовых сточных вод в водные объекты при массовой застройке у береговой линии является сложной задачей прежде всего ввиду наличия множества потенциальных источников. Как показывает практика, индикаторы бытовых сточных вод – соединения азота и фосфора – интерпретируются как опосредованное влияние сельскохозяйственной деятельности в результате вымывания удобрений поверхностным и внутрипочвенным стоком [29]. Разграничить потоки сточных вод антропогенных ландшафтов сельскохозяйственных угодий от потоков селитебных территорий населенных пунктов можно при выполнении площадных гидрохимических съемок из скважин и шурфов с учетом динамики внесения минеральных удобрений [30].

При мониторинговых наблюдениях на водных объектах исключение влияния поверхностного стока достигается опробованием вод в период устойчивого снежного покрова. Локализация мест поступления загрязнений определяется за счет химического анализа опробования вод

по руслу. Примером такого подхода являются результаты исследования вод р. Биргильда, притока р. Миасс. Так, многолетние наблюдения за составом вод в устье р. Биргильда показали, что периодически в ее составе отмечается появление биогенных веществ и микроорганизмов в количестве, значительно превышающем предельные концентрации. С целью выявления участка поступления данных компонентов были организованы пункты отбора проб по всему руслу реки. Аномальное увеличение концентраций компонентов было четко зафиксировано в зимний период между пунктами № 4 и № 5 (рис.). На данном участке из всех расположенных населенных пунктов централизованной канализацией оборудован только пос. Полетаево (6,5 тыс. чел.). Очистка сточных вод выполняется на очистных сооружениях поселка, построенных в 2010 г. (ОСК-2), включающих в себя ступени механической очистки, биологической очистки, обеззараживание на УФ-лампах. В остальных населенных пунктах централизованная канализационная система отсутствует. Водоснабжение жителей выполняется централизованно или локально из подземных источников [31].

Таким образом, с одной стороны, последующее обоснованное направление работ по выявлению источника поступления загрязнения следует связывать с нарушением работы очистных сооружений пос. Полетаево, поскольку данный объект потенциального воздействия заактивирован и существуют критерии и методы его проверки.

С другой стороны, на берегах реки без централизованной канализации проживают около 2 тыс. чел. без учета проживающих из близлежащих СНТ. Данные поселения не имеют централизованной системы канализации, но здесь используются вода реки и подземные воды для водоснабжения, и бесконтрольный сброс сточных вод может не только привести к загрязнению окружающей среды, но и создать угрозу здоровью и жизни населения. Поэтому целесообразно выполнять работы по выявлению несанкционированных сбросов сточных вод, а также по выявлению утечек из автономных канализационных систем. Нормативные документы не содержат указаний по постановке и методам обнаружения утечек сточных вод с территории ИЖС, что затрудняет выполнение вышеперечисленных видов работ. Фактически постановка работ по оценке экологического состояния территории может быть организована только в случае выявления превышений норм химических показателей как в почвенном покрове, так и в поверхностных и подземных водах.

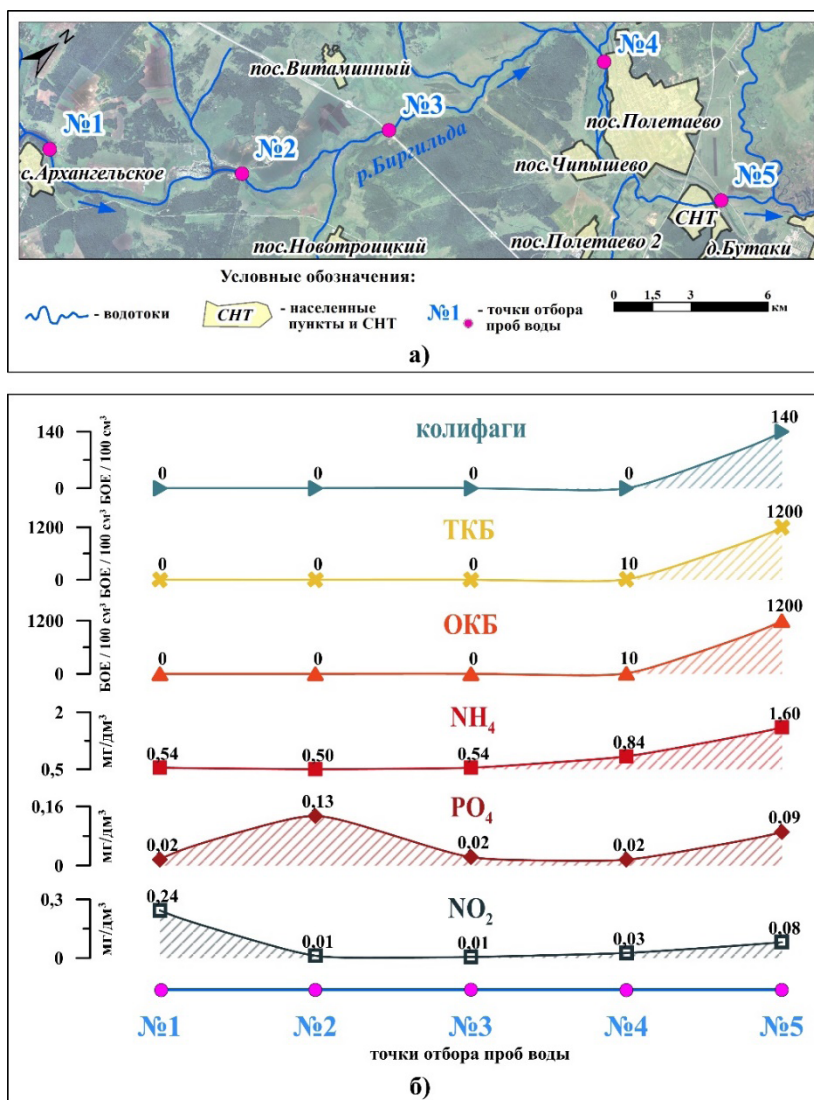


Рис. Результаты гидрохимических исследований по руслу р. Биргильда:

а) ситуационная схема; б) содержание компонентов в воде (март 2024 г.)

Fig. Results of hydrochemical studies along the Birgilda riverbed:

a) situational diagram; b) content of components in water (march 2024)

Выводы

Строительство индивидуального жилья на водосборных территориях может привести к появлению потенциального источника загрязнения водных объектов в виде неочищенных бытовых сточных вод. Высокий риск утечек и сбросов таких вод обусловлен особенностями автономных канализационных систем с биологической очисткой. В настоящее время не существует закрепленных требований к методам контроля за состоянием автономных канализационных систем, к фиксации утечек и анализу состава сбрасываемых очищенных сточных вод. Единственный способ выявления признаков нарушения работы канализационных систем возложен на собственника и заключается в визуальной и органолептической оценке воды в септике.

Применяемые методы обследования водных объектов не всегда позволяют точно определить место поступления сточных вод, ограничиваясь локализацией участка русла. Для выявления источника загрязнения на удалении от берега необходимо проведение площадных гидрохимических съемок в шпуре и скважинах, однако эти работы не предусмотрены нормативными документами и носят исследовательский характер, не являясь частью экологического контроля.

Застройка ИЖС прибрежных и водосборных территорий, прежде всего небольших водоемов, формирует риск ухудшения их состояния в результате нарушения механизмов самоочищения при бесконтрольном поступлении неочищенных сточных вод. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо внести дополнения в нормативные требования и регламенты

по автономным канализационным системам для ИЖС, закрепив необходимость контроля состава отводимых сточных вод как единственного способа оценки эффективности их работы. Следует обозначить обязательное наличие элемента в конструкции системы очистки, обеспечивающего возможность отбора проб сбрасываемых сточных вод, установить перечень определяемых

компонентов и их пороговых значений для очищенных сточных вод ИЖС. Требуется разработать инструкции по выбору и расчету автономных систем с указаниями методов и способов контроля за состоянием территории на участке сброса очищенных сточных вод. Целесообразно также учитывать мировой опыт и практику разработки подобных документов.

Список использованных источников

1. Пимкина Т.И. Оценка эффективности и результативности основных направлений государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» / Т.И. Пимкина // Управленческий учет. 2023. № 8. С. 291-301. DOI: 10.25806/uu82023291-301. EDN: GORCXG
2. Стерник С.Г., Гареев И.Ф. Структурные изменения на рынке жилой недвижимости в 2020 году: экспансия государственной поддержки и системный рост индивидуального жилищного строительства // Жилищные стратегии. 2021. Т. 8, № 2. С. 85-130. DOI: 10.18334/zhs.8.2.112369. EDN: JHLSGN
3. ГОСТ Р 70818-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Инженерные сети наружные. Системы канализации автономные с септиками и подземной фильтрацией сточных вод. Правила монтажа и контроль выполнения работ (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 14.07.2023 N543-ст). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1302181195> (дата обращения 07.12.2025).
4. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 25 декабря 2018 г. № 860/пр. Дата введения 26 июня 2019 г. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (дата обращения 07.12.2025).
5. ГОСТ Р 70707-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Установки компактные для очистки бытовых сточных вод. Общие технические условия (утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 04.04.2023 N184-ст). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200196432> (дата обращения 07.12.2025).
6. СП 31-106-2002. Проектирование и строительство инженерных систем одноквартирных жилых домов. Одобрен для применения постановлением Госстроя России № 7 от 14.02.02 г. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200029676> (дата обращения 07.12.2025).
7. Дроздова Е.А., Лосева С.Н. О некоторых способах совершения мошенничества в сфере строительства // Проблемы экономики и юридической практики. 2019. № 2. С. 218-220
8. Попов И.В. Ошибки при квалификации преступлений против природной среды / И.В. Попов // Уголовное право. 2017. № 1. С. 79-83. EDN: YHTKYF
9. Голубовская Э.К. Биологические основы очистки воды. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1978. 268 с.
10. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.: ил.
11. Hathaway Steven W., August, 1980. Sources of toxic compounds in household wastewater; Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, EPA Report No. EPA-600/2-80-128, 92 pp.
12. Huan, Manhong & Li, Yongmei & Gu, Guo-wei. (2010). Chemical composition of organic matter in domestic wastewater. Desalination. 262. 36-42. 10.1016/j.desal.2010.05.037.
13. Титов Е.А. Интенсификация очистки хозяйственно-бытовых сточных вод на компактных установках

References

1. Pimkina T.I. Assessment of the efficiency and effectiveness of the main directions of the state program of the Russian Federation "Providing affordable and comfortable housing and communal services of citizens of the Russian Federation" // Management accounting. 2023. № 8. P. 291-301. DOI: 10.25806/uu82023291-301. EDN: GORCXG
2. Sternik S.G., Gareev I.F. Structural changes in the residential real estate market in 2020: expansion of state support and systemic growth of individual housing construction // Housing strategies. 2021. T. 8, No 2. P. 85-130. DOI: 10.18334/zhs.8.2.112369. EDN: JHLSGN
3. GOST R70818-2023. National Standard of the Russian Federation. External engineering networks. Autonomous sewerage systems with septic tanks and underground filtration of wastewater. Installation rules and work control (approved and put into effect by Order of Rosstandart dated 14.07.2023 N543-st). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1302181195> (accessed 07.12.2025).
4. SP 32.13330.2018. Sewerage. External Networks and Structures. Approved by the Order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation dated December 25, 2018 No 860/pr. Date of introduction June 26, 2019. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (accessed 07.12.2025).
5. GOST R70707-2023. National Standard of the Russian Federation. Compact Units for Domestic Wastewater Treatment. General Technical Conditions (approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 04.04.2023 N184-st). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200196432> (accessed 07.12.2025).
6. SP 31-106-2002. Design and construction of engineering systems of single-family residential buildings. Approved for use by the Decree of the State Construction Committee of Russia No7 of 14.02.02. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200029676> (accessed 07.12.2025).
7. Drozdova E.A., Loseva S.N. On some ways of committing fraud in the field of construction // Problems of Economics and Legal Practice. 2019. № 2. P. 218-220
8. Popov I.V. Errors in the qualification of crimes against the natural environment / I.V. Popov // Criminal Law. 2017. № 1. P. 79-83. EDN: YHTKYF
9. Golubovskaya E.K. Biological Foundations of Water Purification. Textbook]. Moscow, Higher school Publ., 1978. 268 p.
10. Zhmur N.S. Technological and biochemical processes of wastewater treatment at facilities with aeration tanks. Moscow, AKVAROS Publ., 2003. 512 p.: ill.
11. Hathaway Steven W., August, 1980. Sources of toxic compounds in household wastewater; Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, EPA Report No. EPA-600/2-80-128, 92 pp.
12. Huan, Manhong & Li, Yongmei & Gu, Guo-wei. (2010). Chemical composition of organic matter in domestic wastewater. Desalination. 262. 36-42. 10.1016/j.desal.2010.05.037.
13. Titov E.A. Intensification of Domestic Wastewater Treatment on Compact Installations Using Attached Biocenoses and Flocculants: Specialty 05.23.04 "Water Supply, Sewerage,

с использованием прикрепленных биоценозов и флокулянтов: специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Титов Евгений Александрович. Пенза, 2006. 19 с. EDN: NKHYOV

14. Мочалов И.П., Родзиллер И.Д., Жук Е.Г. Очистка и обеззараживание сточных вод малых населенных мест: в условиях Крайнего Севера Л.: Стройиздат, 1991. 160 с.

15. Радцевич Д.С., Радцевич С.Н., Марков Н.Б. Биологическая очистка минерализованных хозяйственно-бытовых сточных вод // Яковлевские чтения: Сборник докладов XV Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева, Москва, 19 марта 2020 года. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. С. 118-129. EDN: TRQZTS

16. A Study of Flow Reduction and Treatment of Waste Water from Households, Water Pollution Control Research Series 11050FKE12/69 [Huang, Manhong & Li, Yongmei & Gu, Guo-wei. (2010). Chemical composition of organic matter in domestic wastewater. Desalination. 262. 36-42. 10.1016/j.desal.2010.05.037

17. Bian, Jinghao & Wei, Xiaocheng & Chen, Peizhen & Huang, Zhiping & Zhang, Chunxue & Yang, Bo & Wang, Qiang. (2024). Effectiveness and Risk Assessment of Septic Tank Treatment Systems in Rural Cold Regions of China. Processes. 12. 2385. 10.3390/pr12112385

18. Osigbemhe, Itofa-Oghena & Usman, Rufai & Ochi, Marycynthia & Oladejo, Samuel & Osalumese, Godspower & Osigbemhe, Ikpaobo-Oghena. (2025). INVESTIGATION OF ANAEROBIC PROCESSES IN SEPTIC TANK AS A WASTEWATER TREATMENT OPTION. FUDMA JOURNAL OF SCIENCES. 9. 52-55. 10.33003/fjs-2025-0905-3359

19. Mills, Freya & Foster, Tim & Moe, Christine & Amin, Nuhu & Liu, Pengbo & Rahman, Mahbubur & Evans, Barbara & Willetts, Juliet. (2024). Unsafe containment: Public health risks of septic tanks discharging to drains in Dhaka Bangladesh. PLOS Water. 3. 10.1371/journal.pwat.0000325

20. Philip H. & Maunoir S. & Rambaud A. & Philippi, Luiz. (1993). Septic Tank Sludges: Accumulation Rate and Biochemical Characteristics. Water Science and Technology. 28. 57-64. 10.2166/wst.1993.0205

21. Viraraghavan T., "Septic Tank Efficiency", ASCE Journal Environmental Engineering Division, Vol. 102, No. EE2, Apr. 1976, pp. 505-508.

22. ГОСТ 32972-2014. Колодцы полимерные канализационные. Технические условия (утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18.10.2014 N1645-ст). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200114243> (дата обращения 07.12.2025).

23. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1978. Management of Small Waste Flows. Small Scale Waste Management Project. EPA 600/2-78-173. National Technical Information Service PB286474.

24. ГОСТ 25298-82. Установки компактные для очистки бытовых сточных вод. Типы, основные параметры и размеры (утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 27.04.82 № 107). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901704796> (дата обращения 07.12.2025).

25. Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (ред. от 04.08.2023). Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 07.12.2025).

26. Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении» (ред. от 08.08.2024;

Construction Systems for Water Resources Protection": Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Penza, 2006. 19 p EDN: NKHYOV

14. Mochalov I.P., Rodziller I.D., Zhuk E.G. Purification and disinfection of wastewater from small settlements: in the conditions of the Far North. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1991. 160 p.

15. Radtsevich D.S., Radtsevich S.N., Markov N.B. Biological Treatment of Mineralized Domestic Wastewater // Yakovlev Readings: Collection of Reports of the XV International Scientific and Technical Conference Dedicated to the Memory of Academician of the Russian Academy of Sciences S.V. Yakovlev, Moscow, March 19, 2020. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2020. P. 118-129. EDN: TRQZTS

16. A Study of Flow Reduction and Treatment of Waste Water from Households, Water Pollution Control Research Series 11050FKE12/69 [Huang, Manhong & Li, Yongmei & Gu, Guo-wei. (2010). Chemical composition of organic matter in domestic wastewater. Desalination. 262. 36-42. 10.1016/j.desal.2010.05.037

17. Bian, Jinghao & Wei, Xiaocheng & Chen, Peizhen & Huang, Zhiping & Zhang, Chunxue & Yang, Bo & Wang, Qiang. (2024). Effectiveness and Risk Assessment of Septic Tank Treatment Systems in Rural Cold Regions of China. Processes. 12. 2385. 10.3390/pr12112385

18. Osigbemhe, Itofa-Oghena & Usman, Rufai & Ochi, Marycynthia & Oladejo, Samuel & Osalumese, Godspower & Osigbemhe, Ikpaobo-Oghena. (2025). INVESTIGATION OF ANAEROBIC PROCESSES IN SEPTIC TANK AS A WASTEWATER TREATMENT OPTION. FUDMA JOURNAL OF SCIENCES. 9. 52-55. 10.33003/fjs-2025-0905-3359

19. Mills, Freya & Foster, Tim & Moe, Christine & Amin, Nuhu & Liu, Pengbo & Rahman, Mahbubur & Evans, Barbara & Willetts, Juliet. (2024). Unsafe containment: Public health risks of septic tanks discharging to drains in Dhaka Bangladesh. PLOS Water. 3. 10.1371/journal.pwat.0000325

20. Philip H. & Maunoir S. & Rambaud A. & Philippi, Luiz. (1993). Septic Tank Sludges: Accumulation Rate and Biochemical Characteristics. Water Science and Technology. 28. 57-64. 10.2166/wst.1993.0205

21. Viraraghavan T., "Septic Tank Efficiency", ASCE Journal Environmental Engineering Division, Vol. 102, No. EE2

22. GOST 32972-2014. Polymer sewer wells. Technical conditions (approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 18.10.2014 N1645-st). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200114243> (accessed 07.12.2025).

23. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1978. Management of Small Waste Flows. Small Scale Waste Management Project. EPA 600/2-78-173. National Technical Information Service PB286474.

24. GOST 25298-82. Compact Units for Domestic Wastewater Treatment. Types, Basic Parameters and Dimensions (approved and put into effect by the Decree of the USSR State Committee for Construction dated 27.04.82 No 107). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901704796> (accessed 07.12.2025)

25. Federal law ot 10.01.2002, No 7-FZ "On Environmental Protection" (as amended on 04.08.2023). Available at: <http://www.consultant.ru> (accessed 07.12.2025).

26. Federal Law of 10.01.2002 No 416-FZ "On Water Supply and Wastewater Disposal" (as amended on 08.08.2024; with amendments and additions, effective in force on 01.09.2024). Available at: <http://www.consultant.ru> (accessed 07.12.2025).

27. SanPiN 2.1.5.980-00. 2.1.5. Water disposal of populated areas, sanitary protection of water bodies. Hygienic requirements for the protection of surface waters. Sanitary rules and standards (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 22.06.2000) (as amended

с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024). Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 07.12.2025).

27. СанПиН 2.1.5.980-00. 2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.06.2000) (с изм. от 04.02.2011, с изм. от 25.09.2014). Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 07.12.2025).

28. Гудков А.Г. Биологическая очистка городских сточных вод: Учебное пособие. Вологда: ВоГТУ, 2002. 127 с. ISBN 5-87851-174-6

29. Поздняков Ш.П., Шагидуллин Р.Р., Кондратьев С.А. [и др.] Инвентаризация источников внешней антропогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2020. № 4. С. 125-138. DOI: 10.17076/lim1139. EDN: KRLVFK

30. Кирпичникова Н.В., Лапина Е.Е., Кудряшова В.В. Многолетняя динамика содержания азота и фосфора в грунтовых водах водосбора Иваньковского водохранилища // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 536-545. DOI: 10.31857/S0321059620050107. EDN: XCWHMZ

31. Постановление 464 от 15.03.2023 Об утверждении генерального плана (внесение изменений) и правил землепользования и застройки (внесение изменений) Полтаевского сельского поселения Сосновского муниципального района Челябинской области, за исключением несогласованных вопросов. Режим доступа: <https://сосновский74.pf/document/dokumenty-territorialnogo-planirovaniya/lob-utverzhdenii-generalnogo-plana-vnesenie-izmeneniy-i-pravil-zemlepolzovaniya-i-zastroyki-vnesenie/> (дата обращения 07.12.2025).

Информация об авторах

Александр Александрович Борисов, канд. техн. наук, ведущий специалист, Камский филиал ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов»; ORCID: 0000-0001-5847-0214; borissoff@mail.ru

Светлана Владимировна Зорина, инженер 1-й категории, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Отдел проектирования экологической безопасности по Пермскому и Западно-Сибирскому региону и Республики Коми, ORCID: 0009-0005-4647-1275; oxota.05@mail.ru

Вклад авторов

А.А. Борисов – подготовка первоначального текста рукописи, формулировка выводов, визуализация данных.

С.В. Зорина – работа с литературными источниками, участие в анализе результатов и оформлении библиографического списка.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Поступила в редакцию / Received 11.02.2026

Поступила после рецензирования / Received 20.08.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 02.08.2026

on 04.02.2011, as amended on 25.09.2014). Available at: <http://www.consultant.ru> (accessed 07.12.2025).

28. Gudkov A.G. Biological Treatment of Urban Wastewater: Textbook. Gradda: VoSTU, 2002. 127 p. ISBN 5-87851-174-6

29. Pozdnyakov Sh.R., Shagidullin R.R., Kondratiev S.A. [i dr.] Inventory of sources of external anthropogenic load on the Kuibyshev reservoir // Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2020. № 4. P. 125-138. DOI: 10.17076/lim1139. EDN: KRLVFK

30. Kirpichnikova N.V., Lapina E.E., Kudryashova V.V. Long-term dynamics of nitrogen and phosphorus content in groundwater of the Ivankovskoye reservoir catchment // Water Resources. 2020. V. 47, No 5. P. 536-545. DOI: 10.31857/S0321059620050107. EDN: XCWHMZ

31. Resolution 464 of 15.03.2023 On Approval of the Master Plan (Amendments) and Rules for Land Use and Development (Amendments) of the Poletaevsky Rural Settlement of the Sosnovsky Municipal District of the Chelyabinsk Region, Except for Uncoordinated Issues. Available at: <https://sosnovsky74.rf/document/dokumenty-territorialnogo-planirovaniya/lob-utverzhdenii-generalnogo-plana-vnesenie-izmeneniy-i-pravil-zemlepolzovaniya-i-zastroyki-vnesenie/> (accessed 07.12.2025).

Information about the authors

Aleksandr A. Borisov, CSs (Tech), Leading Specialist, Kama Branch of the Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources; ORCID: 0000-0001-5847-0214; borissoff@mail.ru

Svetlana V. Zorina, Engineer of the 1st category, LUKOIL-Engineering LLC, Department of Environmental Safety Design for the Perm and West Siberian Region and the Komi Republic, ORCID: 0009-0005-4647-1275; oxota.05@mail.ru

Contribution of the authors

A.A. Borisov – preparation of the initial text of the manuscript, formulation of conclusions, data visualization.

S.V. Zorina – work with literary sources, participation in the analysis of the results and the design of the bibliographic list.

Оригинальная статья

УДК 631.544:628.9: 697.11

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-55-63>

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНУТРЕННЕГО ВОЗДУХА В КУЛЬТИВАЦИОННОМ СООРУЖЕНИИ ПОСЛЕ АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

М.В. Павлов¹, Д.Ф. Карпов²✉

^{1,2} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»; г. Вологда, Российская Федерация

¹ pavlovmv@vogu35.ru; ORCID: 0000-0002-8687-3296

² karpovdf@vogu35.ru; ORCID: 0000-0002-3522-9302

Аннотация. Круглогодичная эксплуатация культивационных сооружений защищенного грунта требует обеспечения надежного функционирования систем искусственного обогрева воздушной среды и почвы в холодный период года. Цель исследований – разработка методики прогнозирования температуры внутреннего воздуха и оценки динамики ее изменения в культивационном сооружении при аварийном отключении системы отопления. Методика основана на положениях теории теплоустойчивости ограждающих конструкций и теории регулярного теплового режима. Предложенный подход позволяет определять температуру внутреннего воздуха (в размерной и безразмерной формах), темп ее падения, а также количество теплоты, аккумулированной в объеме сооружения к моменту отключения отопления. Апробация методики выполнена для промышленной теплицы в городе Вологде. Расчеты показали, что при принятых климатических условиях температура внутреннего воздуха снижается до критического значения 8°C через 8 ч 8 мин после отключения отопления и достигает 0°C через 14 ч 10 мин. Установлено, что определяющим фактором сохранения допустимого теплового режима является теплоаккумулирующая способность почвы, существенно зависящая от ее влажности. С учетом низкой теплозащитной способности ограждений культивационных сооружений и климатических условий холодного периода года к системам отопления теплиц должны предъявляться повышенные требования надежности.

Ключевые слова: культивационное сооружение, температурный режим теплицы, теплоаккумулирующая способность почвы, аварийное отключение системы отопления, коэффициент аккумуляции теплоты, показатель темпа охлаждения

Формат цитирования: Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Методика определения температуры внутреннего воздуха в культивационном сооружении после аварийного отключения системы отопления. Природообустройство. 2026;Т.19(4):55-63. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-55-63>

Scientific article

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE TEMPERATURE OF THE INDOOR AIR IN A CULTIVATION FACILITY AFTER AN EMERGENCY SHUTDOWN OF THE HEATING SYSTEM

M.V. Pavlov¹, D.F. Karpov²✉

^{1,2} Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State University; Vologda, Russian Federation

¹ pavlovmv@vogu35.ru; ORCID: 0000-0002-8687-3296

² karpovdf@vogu35.ru; ORCID: 0000-0002-3522-9302

Abstract. Year-round operation of protected-ground cultivation facilities requires ensuring the reliable functioning of systems for artificial heating of the air and soil during the cold season. The aim of the study is to develop a methodology for predicting the indoor air temperature and assessing the dynamics of its change in a cultivation facility in the event of an emergency shutdown of the heating system. The methodology is based on the principles of the theory of thermal stability of enclosing structures and the theory of regular thermal regime. The proposed approach makes it possible to determine the indoor air temperature (in dimensional and dimensionless forms), the rate at which it drops, and the amount of heat accumulated in the structure's volume by the time the heating is turned off. The methodology was tested for an industrial greenhouse in the city of Vologda. The calculations showed that, under the assumed climatic conditions, the indoor air temperature drops to the critical value of 8°C 8 hours and 8 minutes after the heating is turned off, and

reaches 0°C after 14 hours and 10 minutes. It has been established that the determining factor in maintaining the permissible thermal regime is the heat-accumulating capacity of the soil, which significantly depends on its moisture content. Given the low heat-protective capacity of the enclosures of cultivation structures and t

Keywords: cultivation structure, greenhouse temperature regime, soil heat-accumulating capacity, emergency shutdown of the heating system, heat accumulation coefficient, cooling rate cooling rate indicator

Citation format: Pavlov M.V., Karpov D.F. Methodology for determining the indoor air temperature in a cultivation structure after an emergency shutdown of the heating system. *Prirodobustroystvo*. 2026;19(4):55-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-55-63>

Введение. С середины XX в. в СССР сформирована разветвленная система централизованного теплоснабжения, которая и в настоящее время остается основой теплоснабжения большинства населенных пунктов России. Несмотря на модернизационные мероприятия, уровень износа тепловых сетей остается высоким: в среднем он достигает 70%, ежегодно фиксируется около 70 повреждений на 100 км сетей, а более 80% трубопроводов требуют капитального ремонта или замены [1]. Темпы обновления (порядка 2÷2,5% в год) не обеспечивают значительного снижения совокупного износа тепловых сетей [2], что обуславливает риск аварийных отключений отопления в холодный период года.

Исследования изменения температуры внутреннего воздуха при аварийном прекращении теплоснабжения выполнены преимущественно для гражданских зданий [3]. За счет значительной теплоемкости ограждающих конструкций коэффициент аккумуляции теплоты β достигает 100÷600 ч, что обеспечивает существенный временной резерв для проведения восстановительных работ [4]. Вариант расчета β с учетом теплофизических характеристик разнородных ограждений предложен в работе [5]. Аналитические и численные подходы к прогнозированию изменения температуры помещений после прекращения теплоснабжения рассмотрены в работе [6]. Уточненная зависимость температуры внутреннего воздуха от времени с учетом изменения наружной температуры в процессе остывания предложена в работе [7].

Методика прогнозирования температуры внутреннего воздуха, апробированная на жилом здании, в котором определяющим фактором является теплоаккумулирующая способность наружных стен, подробно изложена в работе [8]. Методика для культивационных сооружений, основанная на решении нестационарного уравнения теплового баланса зимней теплицы, представлена в работе [9], в которой, однако, не учитывается влияние предварительно нагретой почвы на формирование теплового режима.

Существуют также различные модели прогнозирования микроклимата тепличных сооружений: математическая модель солнечных теплиц, валидированная экспериментально [10], нейросетевые алгоритмы для оценки температуры и влажности воздуха [11], а также CFD-моделирование тепловлажностных полей с учетом процессов испарения и вентиляции [12]. Наряду с этим в работе [13] предложен инженерный метод оптимизации системы отопления теплицы, основанный на моделировании процессов тепло- и массообмена и предназначенный для определения требуемой тепловой мощности газовых инфракрасных излучателей и параметров подогрева приточного воздуха с учетом условий микроклимата тепличного сооружения. Перечисленные в работах [10-13] подходы не учитывают влияние предварительно нагретой почвы на тепловой режим теплицы при внезапном прекращении теплоснабжения. Аварийные режимы отключения отопления также не рассматриваются в сравнительном анализе энергопотребления теплиц в разных климатических зонах [14].

Таким образом, анализ работ по теме исследований показывает, что существующие методы прогнозирования температурного режима помещений при аварийном отключении отопления ориентированы преимущественно на гражданские здания и лишь ограниченно учитывают особенности культивационных сооружений – такие, как низкая теплоемкость светопрозрачных ограждений, значительные тепловые потери через ограждающие конструкции и существенная роль почвы как аккумулятора теплоты. В частности, в использовании известных методов недостаточно полно отражено влияние теплоаккумулирующих свойств предварительно нагретой почвы на формирование теплового режима теплицы в переходный период после прекращения теплоснабжения. Это обуславливает необходимость разработки методики, позволяющей более достоверно прогнозировать изменение температуры внутреннего воздуха в культивационных сооружениях при аварийном отключении системы отопления с учетом, наряду с трансмиссионными

потерями, также инфильтрационной составляющей теплового баланса.

Цель исследований: разработка методики прогнозирования температуры внутреннего воздуха и оценки динамики ее изменения в культивационном сооружении при аварийном отключении системы отопления.

Материалы и методы исследований.

Методика прогнозирования температурного режима культивационного сооружения после аварийного отключения системы отопления разработана на основе аналитического описания нестационарных тепловых процессов в помещении. Исходной теоретической базой являются известные уравнения теории теплоустойчивости зданий и закономерности охлаждения элементов системы отопления, адаптированные к условиям культивационных сооружений с учетом теплоаккумулирующей способности почвы.

Математическое выражение для вычисления температуры внутреннего воздуха в помещении при аварийном прекращении работы системы отопления приведено в работе [15]:

$$t_{\text{вн.в}}^{\text{к}} = t_{\text{н.в}} + \frac{Q_0}{q_0 V} \left(t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} - t_{\text{н.в}} - \frac{Q_0}{q_0 V} \right) e^{-\tau/\beta}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где $t_{\text{н.в}}$ – средняя температура наружного воздуха за период аварийного отключения системы отопления, $^\circ\text{C}$; Q_0 – тепловой поток, поступающий в отапливаемое помещение, Вт. Без учета внутренних тепловых избытков (от человека, от технологического оборудования и т.п.) величина Q_0 численно равна тепловой мощности системы отопления в пределах рассматриваемого помещения; q_0 – удельная тепловая (в некоторых источниках литературы – отопительная) характеристика помещения, Вт/($\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$); удельная тепловая характеристика помещения принимается с учетом тепловых потерь через ограждающие конструкции и воздухообмена; при отсутствии организованной вентиляции воздухообмен в расчетах учитывается в виде инфильтрации наружного воздуха через неплотности ограждающих конструкций. В рамках разработанной методики инфильтрационная составляющая тепловых потерь включена в величину удельной тепловой характеристики помещения q_0 как аддитивная добавка к трансмиссионным потерям через ограждения. Такой подход позволяет сохранить аналитическую форму решения, не вводя в уравнение (1) дополнительное слагаемое, и соответствует сложившейся практике теплотехнических расчетов зданий при аварийных режимах [15]. При наличии организованной вентиляции ее влияние учитывается при определении требуемой тепловой мощности системы отопления и соответствующего значения удельной тепловой характеристики помещения; V – объем отапливаемого помещения, м^3 ; $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}}$ – температура внутреннего воздуха в момент аварийного отключения системы отопления (начальная температура внутреннего воздуха), $^\circ\text{C}$; τ – период аварийного отключения системы отопления, ч; β – коэффициент аккумуляции теплоты, ч.

Согласно теории теплоустойчивости при прерывистом режиме теплоснабжения коэффи-

циент аккумуляции теплоты β вычисляют по математическому выражению:

$$\beta = \frac{c\rho F\delta}{q_0 V} \cdot \frac{1}{3600}, \text{ ч}, \quad (2)$$

где c , ρ , F и δ – массовая теплоемкость соответственно, Дж/(кг·К), плотность, кг/м³, площадь поверхности, м², и толщина, м, ограждающей конструкции отапливаемого помещения.

При расчете наружной стены в математическом выражении (2) используется коэффициент « $\frac{1}{2}$ », учитывающий половину ограждающей конструкции. При этом коэффициент аккумуляции теплоты β , ч, вычисляют как произведение теплоемкости этой части стены на приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждений здания. Для культивационных сооружений представляет интерес рассмотрение в качестве ограждающей конструкции не наружной стены отапливаемого помещения, а слоя влажной почвы, предназначенной для выращивания растений, с предварительно заданными геометрическими, физическими и теплотехническими параметрами. Если толщина наружной стены культивационного сооружения $\delta_{\text{нс}} \rightarrow 0$ (например, толщина сотового поликарбоната для зимних теплиц составляет в среднем 8÷10 мм), то $\beta_{\text{нс}} \approx 0$. Коэффициент аккумуляции теплоты β , ч, для всех типов зданий является постоянной величиной и определяется не только расчетным способом по математическому выражению (2), но и экспериментальным путем с помощью кратковременного искусственного нарушения теплового режима в обследуемом здании.

В предлагаемой методике слой почвы рассматривается как теплоаккумулирующая масса с заданными геометрическими и теплофизическими параметрами. Толщина расчетного слоя почвы принимается исходя из условий предварительного теплового режима культивационного сооружения и продолжительности рассматриваемого периода после аварийного отключения отопления. Влияние распространения температурного возмущения по глубине почвы в явном виде в рамках методики не рассматривается, а учитывается интегрально через коэффициент аккумуляции теплоты, определяемый по математическому выражению (2). При необходимости исследования начального переходного периода с учетом изменения температуры по глубине грунта требуется решение нестационарной задачи теплопроводности.

После аварийного отключения отопления тепловой поток Q_0 в (1) снижается до нуля, а процесс охлаждения помещения с условно постоянной температурой $t_{\text{вн.в}}$ в рамках регулярного

теплового режима первого рода описывается математическим выражением:

$$Q_o \approx Q_o^h e^{-m\tau}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где Q_o^h – начальная тепловая мощность системы отопления помещения (до аварийного отключения), Вт; m – показатель темпа охлаждения системы отопления, $1/\text{ч}$.

Использование закономерностей регулярно теплового режима первого рода, характеризующихся экспоненциальным характером изменения тепловых параметров, обусловлено инженерным характером предлагаемой методики и необходимостью получения компактного аналитического описания процесса охлаждения культивационного сооружения после аварийного отключения системы отопления. Данный подход не является единственным возможным и не обеспечивает максимальной точности на начальном этапе переходного процесса, когда распределение температуры в ограждающих конструкциях и предварительно нагретой почве является существенно неравномерным.

Альтернативные подходы, основанные на численном решении нестационарных задач теплопроводности, конечно-разностных схемах или CFD-моделировании, позволяют более детально учитывать пространственное распределение температуры в ограждающих конструкциях, почве и воздушном объеме сооружения, однако требуют большего объема исходных данных и вычислительных ресурсов [16]. Предлагаемая методика предназначена для инженерной оценки изменения температуры внутреннего воздуха и определения временного резерва после аварийного отключения отопления и не предназначена для детального исследования пространственного распределения температуры в ограждающих конструкциях и почве.

Границы применимости экспоненциального подхода ограничены периодом регулярного теплового режима, наступающим после затухания начальных неоднородностей температурного поля. Для исследования начального переходного периода и получения более детальной картины формирования температурного режима необходимо применение детализированных нестационарных моделей теплопроводности, в том числе численных методов.

Допуская равномерное распределение температуры в рассматриваемом теле, параметр m в (3) вычисляют по математическому выражению:

$$m \approx \frac{\alpha_k F_o}{C_m + C_{ж}} \cdot 3600, 1/\text{ч}, \quad (4)$$

где α_k – средний коэффициент конвективного теплообмена (теплоотдачи), Вт / ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$); F_o – суммарная площадь поверхности нагрева системы отопления, открыто проложенной в пределах помещения, м^2 ; C_m и $C_{ж}$ – соответственно теплоемкости системы отопления (без учета теплоносителя) и теплоносителя в пределах помещения, Дж/К.

Используя уравнение для расчета тепловой нагрузки на отопление зданий, применяемое при проектировании систем централизованного теплоснабжения, преобразуем (1) с учетом (3):

$$t_{\text{вн.в}}^{\text{к}} = t_{\text{н.в}} + (t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} - t_{\text{н.в}}) [e^{-m\tau} + (1 - e^{-m\tau}) e^{-\tau/\beta}], \text{ } ^\circ\text{С}. \quad (5)$$

Математическое выражение (5) в безразмерной форме принимает вид:

$$\Theta = \frac{t_{\text{вн.в}}^{\text{к}} - t_{\text{н.в}}}{t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} - t_{\text{н.в}}} = e^{-m\tau} + (1 - e^{-m\tau}) e^{-\tau/\beta}. \quad (6)$$

Темп падения температуры внутреннего воздуха после аварийного отключения системы отопления в соответствии с (5) вычисляют по математическому выражению:

$$\Delta_t = \left| \frac{dt_{\text{вн.в}}^{\text{к}}}{d\tau} \right| = (t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} - t_{\text{н.в}}) \left[(1 - e^{-m\tau}) \frac{e^{-\tau/\beta}}{\beta} + (1 - e^{-\tau/\beta}) m e^{-m\tau} \right], \text{ } ^\circ\text{С}/\text{ч}. \quad (7)$$

Количество тепловой энергии, воспринятое помещением в течение расчетного интервала времени τ , ч, после аварийного прекращения работы системы отопления вычисляют по математическому выражению:

$$\Delta Q_o = Q_o^h \int_0^{\tau} \Theta d\tau = Q_o^h \left[\frac{1 - e^{-m\tau}}{m} + \beta (1 - e^{-\tau/\beta}) - \frac{1}{m + \frac{1}{\beta}} \left(1 - e^{-\left(m + \frac{1}{\beta}\right)\tau} \right) \right] \cdot 3600, \text{ Дж}. \quad (8)$$

Полученные математические выражения позволяют вычислять температуру внутреннего воздуха, темп ее падения, а также количество тепловой энергии, воспринимаемое помещением после аварийного отключения системы отопления. Сформированная система математических выражений (5)-(8) создает основу для предлагаемой методики прогнозирования температурного режима культивационного сооружения в переходный период после прекращения теплоснабжения.

Результаты и их обсуждение. Представлены результаты численного моделирования изменения температуры внутреннего воздуха в промышленной теплице круглогодичной эксплуатации города Вологды после аварийного отключения системы отопления с учетом тепловой аккумуляции почвы и характеристик ограждающих конструкций.

Решение системы математических выражений (5)-(8) позволяет оценить динамику падения температуры, темп охлаждения и количество аккумулированной тепловой энергии в объеме помещения, что обеспечивает количественную

интерпретацию формирования теплового режима теплицы.

Исходные данные для расчета:

1. Параметры помещения. Линейные размеры (габариты) теплицы: ширина $a = 7,45$ м; длина $b = 8,4$ м; высота в верхней точке $h = 3,8$ м. Объем помещения $V \approx 183,108$ м³.

2. Параметры почвы. Материал почвы – влажный торф (в основе). Толщина слоя почвы $\delta = 0,35$ м. Суммарная площадь поверхности почвы с учетом общего количества грядок и проходов между ними $F = 46,20$ м². Плотность и массовая теплоемкость влажного торфа равны: $\rho = 800$ кг/м³ и $c = 2750$ Дж/(кг·К) соответственно. Коэффициент аккумуляции теплоты по расчету $\beta = 27,084$ ч. В расчетах рассматривается предварительно нагретый слой почвы толщиной $\delta = 0,35$ м, для которого перед аварийным отключением принят установившийся тепловой режим. Расчетный коэффициент аккумуляции теплоты вычисляется по математическому выражению (2) на основе заданной толщины и теплофизических характеристик почвы. Распределение температуры по глубине почвы в рамках предлагаемой методики не рассматривается отдельно и учитывается интегрально через коэффициент аккумуляции теплоты.

3. Параметры ограждения. Ограждение теплицы толщиной $\delta_{\text{нс}} = 10$ мм выполнено из сотового поликарбоната. Суммарная площадь ограждений $F_{\text{огр}} \approx 140,29$ м². Сопротивление теплопередаче сотового поликарбоната $R_{\text{огр}} = 0,51$ м²·К/Вт. Добавочные тепловые потери на нагрев инфильтрующегося воздуха $\beta_{\text{инф}} = 0,2$. В рассматриваемом аварийном режиме организованный воздухообмен не учитывается, поскольку его работа прекращается одновременно с отключением системы отопления; остаточный воздухообмен учитывается в составе инфильтрационных тепловых потерь и включен в расчетное значение удельной тепловой характеристики q_0 в виде дополнительной составляющей к трансмиссионным потерям через ограждения. Таким образом, воздухообмен присутствует в расчете опосредованно, через q_0 , что соответствует принятому инженерному уровню детализации методики.

4. Параметры внутреннего воздуха. Начальная температура внутреннего воздуха согласно РД-АПК 1.10.09.01-14 «Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады» принята равной $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} = 22^\circ\text{C}$ (для огурцов в зимне-весенний оборот, до плодоношения).

5. Параметры наружного воздуха. Согласно требованиям СП 131.13330.2025 «Строительная климатология» для условий города Вологды в расчетах принята неизменная в течение всего периода аварийного отключения отопления температура наружного воздуха $t_{\text{н.в}} = -32^\circ\text{C}$.

6. Параметры системы отопления. Система отопления представляет собой стальные трубопроводы воздушного обогрева $d_{\text{н}} \times \delta = 51 \times 2,5$ мм. Общая протяженность трубопроводов в теплице $l_0 = 120$ м. Суммарная площадь поверхности нагрева составляет $F_0 = 19,20$ м. Объем теплоносителя (воды) в системе отопления помещения $V_{\text{ж}} \approx 0,199$ м³. Масса системы отопления помещения без учета теплоносителя $m_{\text{м}} \approx 358,8$ кг. Массовая теплоемкость металла (стали) $c_{\text{м}} = 500$ Дж/(кг·К). Плотность и массовая теплоемкость теплоносителя (воды) равны: $\rho_{\text{ж}} = 1000$ кг/м³ и $c_{\text{ж}} = 4190$ Дж/(кг·К) соответственно. Средняя температура поверхности системы отопления помещения при расчетных условиях принята равной $t_{\text{нов}} = 82,5^\circ\text{C}$. Средний коэффициент конвективного теплообмена (теплоотдачи) по расчету составил $\alpha_{\text{к}} \approx 17,0$ Вт/(м²·К). Тепловая мощность системы отопления теплицы до аварийного отключения $Q_0^{\text{н}} = 19700$ Вт. Удельная тепловая (отопительная) характеристика помещения $q_0 = 1,993$ Вт/(м³·°C). Показатель темпа охлаждения системы водяного отопления по расчету составил: $m \approx 1,1551/\text{ч}$.

На рисунке 1 представлены зависимости изменения температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}^{\text{к}}$, °C, и соответствующей безразмерной температуры Θ во времени после аварийного отключения системы отопления.

После аварийного отключения системы отопления температура внутреннего воздуха в теплице снижается до критического значения $t_{\text{кр}} = 8^\circ\text{C}$ ($\Theta_{\text{кр}} \approx 0,741$) через $\tau_{\text{кр}} \approx 8$ ч 8 мин, что соответствует предельно допустимой продолжительности охлаждения огурцов (не более 6 ч), а затем к моменту $\tau_0 \approx 14$ ч 10 мин достигает нулевого уровня $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ($\Theta_0 = 0,593$). При снижении температуры внутреннего воздуха до $t_{\text{вн.в}} = 15^\circ\text{C}$ наблюдается угнетение роста растений.

На рисунке 2 представлены зависимости изменения темпа падения температуры Δ_r , °C/ч, и количества тепловой энергии ΔQ_0 , МДж, полученной помещением за период аварийного отключения системы отопления.

При $\tau = 14$ ч темп падения температуры внутреннего воздуха и количество тепловой энергии, полученной помещением теплицы после аварийного отключения отопления, составляют,

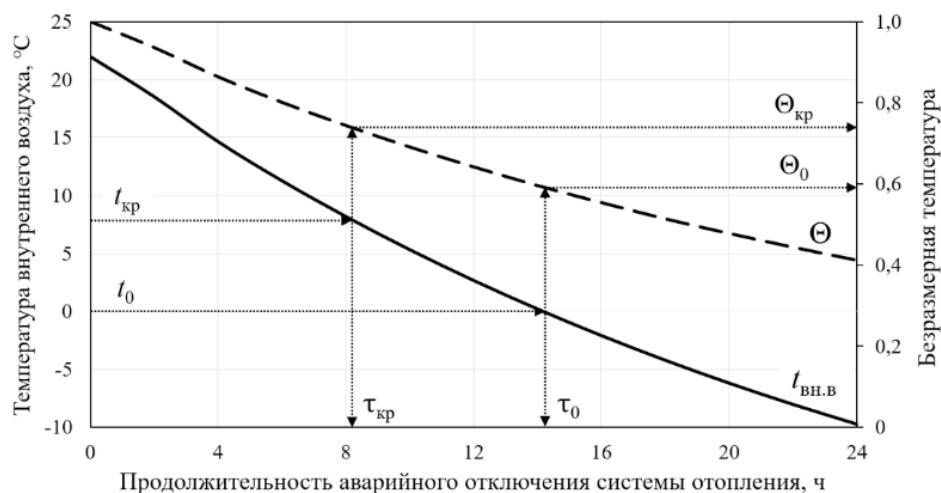


Рис. 1. Температура внутреннего воздуха в помещении:

сплошная линия – температура внутреннего воздуха; пунктирная линия – безразмерная температура

Fig. 1. Indoor air temperature in the facility:

solid line – indoor air temperature; dashed line – dimensionless temperature

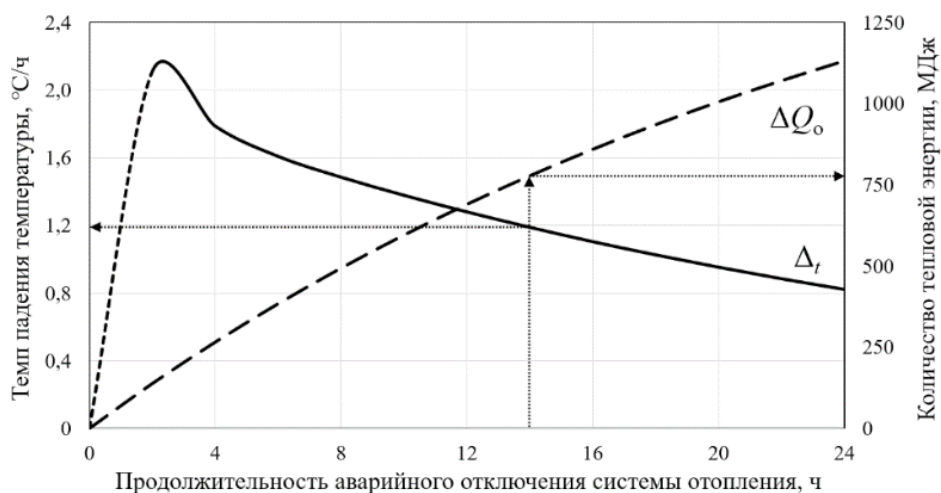


Рис. 2. Темп падения температуры (сплошная линия) и количество тепловой энергии (пунктирная линия с более длинными штрихами и большим расстоянием между ними)

Fig. 2. Temperature decreases rate (solid line) and heat energy amount (dashed line with longer dashes and wider spacing)

соответственно, $\Delta t = 1,189^\circ\text{C}/\text{ч}$ и $\Delta Q_0 = 777,3$ МДж. В начальный период охлаждения ($\tau \in [0; 2]$ ч) зависимость $\Delta t = \Delta t(\tau)$ носит выраженный нестационарный характер: от нулевого значения она резко возрастает до максимума (обозначено пунктирной линией с более короткими штрихами и меньшим расстоянием между ними

на рисунке 2). При $\tau_{\text{макс}} \approx 1$ ч 33 мин зафиксирован максимальный темп падения температуры $\Delta t_{\text{макс}} = 2,148^\circ\text{C}/\text{ч}$. Средняя величина темпа падения температуры $\Delta t_{\text{ср}} \approx 1,302^\circ\text{C}/\text{ч}$.

Таблица содержит расчетные значения $\tau_{\text{кр}}$, ч, при $t_{\text{кр}} = 8^\circ\text{C}$ и τ_0 , ч, при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ для различных температур наружного воздуха $t_{\text{н.в.}}, ^\circ\text{C}$.

Таблица. Продолжительность аварийного отключения системы отопления

Table. Duration of heating system shutdown

$t_{\text{н.в.}}, ^\circ\text{C} / t_{\text{out}}, ^\circ\text{C}$	-5	-10	-15	-20	-25	-30
$\tau_{\text{кр}}/\tau_{\text{cr}}$	19 ч 48 мин 19 h 48 min	15 ч 35 мин 15 h 35 min	12 ч 53 мин 12 h 53 min	10 ч 59 мин 10 h 59 min	9 ч 35 мин 9 h 35 min	8 ч 30 мин 8 h 30 min
τ_0/τ_0	45 ч 41 мин 45 h 41 min	31 ч 30 мин 31 h 30 min	24 ч 27 мин 24 h 27 min	20 ч 6 мин 20 h 6 min	17 ч 6 мин 17 h 6 min	14 ч 54 мин 14 h 54 min

Изменение температуры наружного воздуха $t_{н.в.}$, °C, приводит к изменению требуемой тепловой мощности системы отопления теплицы Q_o^n , Вт, поддерживающей температуру внутреннего воздуха $t_{вн.в.}$, °C, что отражается на значении показателя темпа охлаждения m , 1/ч, уменьшающегося с ростом $t_{н.в.}$. При этом коэффициент аккумуляции теплоты β , ч, определяется теплофизическими параметрами почвы и геометрическими характеристиками сооружения и остается практически неизменным.

Результаты расчетов показали, что решающее значение в сохранении теплового режима после аварийного отключения системы отопления имеет теплоаккумулирующая способность почвы. Высокая плотность и значительная массовая теплоемкость предварительно прогретого влажного грунта обуславливают замедленное снижение температуры внутреннего воздуха даже при малом термическом сопротивлении ограждений теплицы и интенсивном остывании системы отопления.

Для оценки влияния теплофизических свойств почвы выполнен дополнительный расчет для слоя сухого торфа. При уменьшении плотности и массовой теплоемкости почвы снижается коэффициент аккумуляции теплоты, что приводит к ускоренному падению температуры внутреннего воздуха после аварийного отключения отопления. Для теплицы с сухим торфом критическое значение температуры 8°C достигается через 2 ч 3 мин, а температура 0°C – через 3 ч 16 мин после отключения отопления. Полученный результат подтверждает определяющее влияние теплоаккумулирующей способности предварительно нагретой почвы на продолжительность сохранения требуемого теплового режима культивационного сооружения.

Выводы

Разработанная методика прогнозирования температуры внутреннего воздуха в культивационном сооружении (на примере промышленной теплицы) при аварийном отключении отопления позволяет количественно оценивать динамику снижения температуры с учетом теплоаккумулирующей способности почвы и выполнять обоснованный прогноз теплового режима сооружения.

На основе численного моделирования установлены закономерности формирования

температурного режима и сформулированы следующие выводы:

1. Предложенный подход учитывает теплоаккумулирующие свойства предварительно нагретой почвы и количество теплоты, переданной во внутренний объем теплицы нагревательными элементами до момента отключения системы отопления.

2. Для принятых климатических условий температура внутреннего воздуха достигает 8°C через 8 ч 8 мин и 0°C через 14 ч 10 мин после аварийного отключения отопления; средний темп падения температуры за 24 ч составляет 1,302°C/ч, а суммарное количество аккумулярованной и переданной теплоты – около 1131 МДж.

3. При прогнозировании температурного режима теплицы существенное значение имеет теплоаккумулирующая способность предварительно нагретой почвы, что обусловлено малой толщиной и низким термическим сопротивлением ограждений. Для принятой системы отопления учет охлаждения нагревательных элементов позволяет уточнить начальный период формирования температурного режима после аварийного отключения теплоснабжения.

4. Предлагаемая методика предназначена для инженерной оценки изменения температуры внутреннего воздуха в культивационном сооружении при аварийном отключении отопления и учитывает теплоаккумулирующую способность предварительно нагретого слоя почвы, заданного исходными геометрическими и теплофизическими параметрами. Инфильтрационная составляющая тепловых потерь в рамках разработанной методики учитывается опосредованно – через удельную тепловую характеристику помещения, что соответствует принятому уровню инженерного приближения. При необходимости более детального исследования начального переходного периода и распределения температуры по глубине грунта целесообразным является применение нестационарной модели теплопроводности. Более детальный учет воздухообмена, включая организованную вентиляцию, требует введения в уравнение теплового баланса отдельного слагаемого и может рассматриваться как направление дальнейшего развития методики.

Список использованных источников

1. Рыбкина Г.В., Яблокова А.А. Современное состояние теплоснабжения и его развитие // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2, № 2. С. 89-99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99 EDN: IXLWON

References

1. Rybkina G.V., Yablokova A.A. The current state of heat supply and its development // Industrial Processes and Technologies. 2022. Vol. 2. No. 2. P. 89-99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99. EDN: IXLWON

2. Семикашев В.В. Теплоснабжение в России: текущая ситуация и проблемы инвестиционного развития // ЭКО. 2019. № 9 (543). С. 23-47. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-23-47 EDN: ATVUQK
3. Карпов Д.Ф., Павлов М.В., Вафаева Х.М., Фролова А.А. Разработка и верификация программно-вычислительного метода моделирования температурного режима помещения при аварийных отключениях отопления // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026. Т. 53, № 2. С. 192-201. DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-2-192-201
4. Малиявина Е.Г., Суслова В.В. Влияние теплоемкости ограждающих конструкций помещения на его температуру после отключения отопления // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 2 (794). С. 76-84. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-794-2-76-84 EDN: TNVTST
5. Малиявина Е.Г., Ахвердашвили Р.Г. Определение времени остывания помещения после отключения системы отопления с учетом теплоустойчивости внутренних и наружных многослойных ограждающих конструкций // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 10 (778). С. 83-96. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96 EDN: JDEDCQ
6. Самарин О.Д. Сравнение различных методов расчета остывания помещений при прекращении теплоснабжения // Жилищное строительство. 2023. № 1-2. С. 41-44. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-1-2-41-44 EDN: VLFPKT
7. Самарин О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах при переменной температуре наружного воздуха // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 1. С. 77-83. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.77-83 EDN: QLMJUT
8. Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Абрамова Е.В., Вафаева Х.М. Исследование температуры внутреннего воздуха в помещении гражданского здания после аварийного отключения системы отопления // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024. Т. 51, № 2. С. 197-207. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-2-197-207
9. Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Храпонова Л.В. Прогнозирование температуры воздуха в культивационном сооружении после отключения системы отопления // Природообустройство. 2025. № 3. С. 30-37. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-3-30-37 EDN: ALRBZM
10. Liu R., Li M., Guzmán J.L., Rodríguez F. A fast and practical one-dimensional transient model for greenhouse temperature and humidity // Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 186. P. 106186. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106186
11. Yan C., Ta N., Zhen Q., Sun Yu., Liu K., Li X. Prediction of air temperature and relative humidity in greenhouse based on neural network model // Research Square. September 30, 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4958200/v1
12. Lekouch K., El Jazouli M., Bouirden L. Study of temperature fields inside a Canarian greenhouse // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. 2022. Vol. 7. Pp. 79-88. DOI: 10.37394/232013.2022.17.8
13. Vafaeva Kh.M., Pavlov M.V., Karpov D.F., Ismailov A.M., Romanovski V. Optimizing heating systems for greenhouses using gas radiators // Journal of Engineering. 2025. Vol. 2025. Pp. 9586181. DOI: 10.1155/je/9586181
14. Küçükerdem K., Gulbe A. Comparison of energy requirement for heating and cooling of greenhouses in Adana and Iğdir provinces // Journal of the Institute of Science and Technology. 2026. Vol. 16 (1). Pp. 141-156. DOI: 10.21597/jist.1792012
15. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 2001. 472 с.
16. Самарин О.Д. Применение численных методов для уточнения скорости начального разогрева или охлаждения помещения // Жилищное строительство. 2026. № 5. С. 10-14. DOI: 10.31659/0044-4472-2026-5-10-14
2. Semikashev V.V. Heat supply in Russia: current state and problems of investment development // ECO. 2019. No. 9 (543). P. 23-47. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-23-47. EDN: ATVUQK
3. Karpov D.F., Pavlov M.V., Vafaeva Kh.M., Frolova A.A. Development and verification of a computational software-based method for modeling the indoor thermal regime under emergency heating shutdowns // Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026. Vol. 53. No. 2. P. 192-201. DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-2-192-201.
4. Malyavina E.G., Suslova V.V. The effect of the enclosing structures heat capacity of the room on its temperature after the heating is turned off // News of Higher Educational Institutions. Construction. 2025. No. 2 (794). P. 76-84. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-794-2-76-84. EDN: TNVTST
5. Malyavina E.G., Akhverdshvili R.G. Determination of the room cooling time after switching off the heating system, taking into account the thermal stability of indoor and outdoor multilayer enclosing structures // News of Higher Educational Institutions. Construction. 2023. No. 10 (778). P. 83-96. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96. EDN: JDEDCQ
6. Samarin O.D. Comparison of various methods for calculating the cooling of premises at the termination of heat supply / O.D. Samarin // Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]. 2023. No. 1-2. P. 41-44. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-1-2-41-44. EDN: VLFPKT
7. Samarin O.D. Calculation of cooling of building premises in emergency modes at variable outdoor temperature / O.D. Samarin // Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024. Vol. 19. No. 1. P. 77-83. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.77-83. EDN: QLMJUT
8. Karpov D.F., Pavlov M.V., Abramova E.V., Vafaeva Kh.M. Investigation of the indoor air temperature in a civilian building after an emergency shutdown of the heating system // Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024. Vol. 51. No. 2. P. 197-207. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-2-197-207.
9. Pavlov M.V., Karpov D.F., Khraponova L.V. Air temperature prediction in a cultivation facility after heating system shutdown // Environmental Engineering. 2025. No. 3. P. 30-37. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-3-30-37. EDN: ALRBZM
10. Liu R., Li M., Guzmán J.L., Rodríguez F. A fast and practical one-dimensional transient model for greenhouse temperature and humidity // Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 186. P. 106186. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106186.
11. Yan C., Ta N., Zhen Q., Sun Yu., Liu K., Li X. Prediction of air temperature and relative humidity in greenhouse based on neural network model // Research Square. September 30, 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4958200/v1.
12. Lekouch K., El Jazouli M., Bouirden L. Study of temperature fields inside a Canarian greenhouse // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. 2022. Vol. 7. P. 79-88. DOI: 10.37394/232013.2022.17.8.
13. Vafaeva Kh.M., Pavlov M.V., Karpov D.F., Ismailov A.M., Romanovski V. Optimizing heating systems for greenhouses using gas radiators // Journal of Engineering. 2025. Vol. 2025. P. 9586181. DOI: 10.1155/je/9586181.
14. Küçükerdem K., Gulbe A. Comparison of energy requirement for heating and cooling of greenhouses in Adana and Iğdir provinces // Journal of the Institute of Science and Technology. 2026. Vol. 16 (1). P. 141-156. DOI: 10.21597/jist.1792012.
15. Sokolov E.Ya. District heating and thermal networks. Moscow: MEI, 2001. 472 p.
16. Samarin O.D. The use of numerical methods to specify the rate of Initial heating or cooling of the room / O.D. Samarin // Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]. 2026. No. 5. P. 10-14. DOI: 10.31659/0044-4472-2026-5-10-14.

Информация об авторах

Михаил Васильевич Павлов, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплогазоводоснабжения; Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-код: 9241-4996; pavlovmv@vogu35.ru

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

Information about the authors

Mikhail V. Pavlov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat, Gas and Water Supply, Vologda State University; 160000, Vologda, 15 Lenin St., Office 111; e-mail: pavlovmv@vogu35.ru

Denis F. Karpov, PhD Candidate in Engineering, Senior Lecturer of the Department of Heat, Gas and Water Supply, Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-код: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

Вклад авторов

М.В. Павлов – постановка цели и задач исследований; разработка математических выражений для определения температуры внутреннего воздуха и темпа ее падения; анализ результатов численного моделирования и формулирование выводов. Д.Ф. Карпов – сбор и систематизация научно-технической литературы; выполнение вычислительных экспериментов и оценка влияния влажности почвы на продолжительность охлаждения; написание и редактирование текста рукописи, оформление полученных результатов.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Поступила в редакцию / Received 03.03.2026

Поступила после доработки и рецензирования / Received 02.09.2026

Принята к публикации / Accepted 02.09.2026

Contribution of the authors

M.V. Pavlov – Setting the goal and objectives of the study; development of mathematical statements to determine the temperature of the internal air and the rate of its fall; analysis of the results of numerical modeling and formulation of conclusions.

D.F. Karpov – Collection and systematization of scientific and technical literature; performing computational experiments and assessing the effect of soil moisture on the duration of cooling; writing and editing the text of the manuscript, formatting the results obtained.

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 627.824.3.003.13:624.131.7

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-64-74>**ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН ОТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ
ОЦЕНКИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ГРУНТОВ****Е.В. Андреев^{1✉}, В.Я. Жарницкий², Н.В. Ханов³**

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», Институт государственной службы и управления; г. Москва, Российская Федерация

²МОО «Академия проблем водохозяйственных наук»; г. Москва, Российская Федерация

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация

[✉]andreev-rf@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6867-144X

²zharnitskiy@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

³khanov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

Аннотация. Цель исследований – обосновать экономическую эффективность от внедрения разработанной системы оперативной оценки геотехнического контроля грунтов для повышения эксплуатационной надежности грунтовых плотин, подвергнутых нестационарным воздействиям ударных и газодинамических нагрузок при взрывах. Применение теории надежности как основного метода исследований обусловлено нестационарностью и изменчивостью системы от воздействия внешних факторов, инструментарий которого позволил увязать инженерную задачу обеспечения и повышения эксплуатационной надежности с управленческими и финансово-экономическими решениями. В результате исследований внедрена в практику строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений разработанная система оценки качества послойной укладки грунтов в тело плотин и их осадки. Это позволяет сократить время проведения обследования грунтовой плотины, трудоемкость и объем работ, направленных на контрольные мероприятия, снижает трудозатраты и требования к квалификации персонала, что уменьшает объем финансовых вложений в реализацию мероприятий по поддержанию и повышению их эксплуатационной надежности. Сделан вывод о целесообразности разработанной системы оперативной оценки геотехнического контроля грунтов для поддержания и повышения эксплуатационной надежности грунтовых плотин как объекта повышенной опасности, что совершенствует действующий инструментарий реализации Федерального закона № 117 «О безопасности гидротехнических сооружений».

Ключевые слова: грунтовые плотины, эксплуатационная надежность гидротехнических сооружений, экономическая эффективность, стоимость работ, экономический ущерб, безопасная эксплуатация, отказы и повреждения плотин, жизненный цикл объекта

Формат цитирования: Андреев Е.В., Жарницкий В.Я., Ханов Н.В. Обоснование экономической эффективности повышения эксплуатационной надежности грунтовых плотин от внедрения системы оперативной оценки геотехнического контроля грунтов. Природообустройство. 2026;Т.19(4):64-74. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-64-74>

Scientific article

SUBSTANTIATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF INCREASING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF EARTH DAMS FROM THE INTRODUCTION OF A SYSTEM FOR OPERATIONAL ASSESSMENT OF GEOTECHNICAL CONTROL OF SOILS

E.V. Andreev^{1✉}, V.Ya. Zharnitsky², N.V. Khanov³

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Institute of Public Administration and Management, Moscow, Russian Federation

²International Public Organization, Academy of Water Sciences, Moscow, Russian Federation

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Russian State Agrarian University, Moscow Timiryazev Agricultural Academy, A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management, and Construction, Moscow, Russian Federation

¹andreev-rf@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6867-144X

²zharnitskiy@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

³khanov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

Abstract. The purpose of the study: to substantiate the economic efficiency of the implementation of the developed system of operational assessment of geotechnical soil control, in order to increase the operational reliability of earth dams subjected to non-stationary effects of shock and gas dynamic loads during explosions.

Research methodology. The application of the theory of reliability as the main research method is due to the non-stationary nature and variability of the system from the impact of external factors, the tools of which made it possible to link the engineering task of ensuring and increasing operational reliability with managerial, financial and economic decisions.

Results. The introduction into the practice of construction and operation of hydraulic structures of the developed system for assessing the quality of layered soil laying in the body of the dam and their precipitation, which allows to assess the likelihood of changes in the level of operational reliability of the hydraulic structure, reduces the time of inspection of the earth dam, the complexity and amount of work for control measures., it reduces the amount of financial investment in the implementation of measures to maintain and improve their operational reliability. **Conclusion.** The article concludes that the developed system of operational assessment of geotechnical soil control is appropriate for maintaining and improving the operational reliability of earth dams as high-risk facilities, and improves the existing tools for implementing Federal Law No. 117 «On the Safety of Hydraulic Structures».

Keywords: earth dams, operational reliability of hydraulic structures, economic efficiency, cost of work, economic damage, safe operation, failures and damage to dams, the life cycle of the facility

Citation format: Andreev E.V., Zharnitsky V.Ya., Khanov N.V. Substantiation of the economic efficiency of increasing the operational reliability of earth dams from the introduction of a system for operational assessment of geotechnical control of soils. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(4):64-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-64-74>

Введение. За последние годы количество грунтовых плотин с высокой степенью износа превысило 85%, что требует разработки эффективных механизмов по привлечению инвестиций в их реконструкцию и поддержанию эксплуатационной надежности. Для этого требуется предложить не только эффективный, но и экономически обоснованный метод, позволяющий на разных стадиях жизненного цикла гидротехнических сооружений оценить качество укладки грунта для недопущения образования аварий и катастроф, наносящих прямой экономический и неэкономический ущерб региональной экономике.

На всех этапах эксплуатации грунтовых плотин, при использовании различных методов, инструментов и оборудования для определения геотехнических показателей грунтов как

строительного материала, всегда будет присутствовать их неопределенность – главным образом, ввиду несоответствия фактической плотности грунта, уложенного в тело плотины, действительному значению, которое получают только в технологических картах в ходе строительства объекта. Опытные укатки грунта, выполняемые для установления технологических параметров укладки грунтового материала и строительных показателей свойств грунта после его уплотнения, также не дают достаточно объективных значений показателей свойств грунта, так как не учитывают пространственную изменчивость карьерного грунта. К тому же и условия проведения «опытных укаток» отличаются от масштабов основного этапа производства работ на объекте, что вносит в жизненный цикл эксплуатируемых грунтовых плотин дополнительные

финансово-экономические категории затрат для обеспечения надежности гидротехнических сооружений и недопущения ущерба региональной экономике [1].

Существенным упущением имеющих место методов оценки уплотнения грунта в теле сооружения является то, что при их использовании отсутствует возможность оперативного определения таких контролируемых выходных показателей уплотненного грунта, как коэффициент уплотнения, прочность, водопроницаемость и другое по образцам, которые отбираются для оценки качества выполненного уплотнения в слое. Это повышает затраты на этапе эксплуатации грунтовых плотин и требует проведения мероприятий по обоснованию экономической эффективности инвестиций в оценку надежности и безопасности эксплуатируемых гидротехнических объектов [2].

Все это объясняет необходимость и важность наличия такой системы геотехнического освидетельствования качества уложенного с уплотнением грунта, которая бы являлась не затратной, не сложной по расчетному обоснованию, нетрудоемкой, понятной и доступной для профильных специалистов, а главное – не снижающей объективность и достоверность, существенно сокращала бы время на их определение и не требовала бы привлечения дополнительных экономических ресурсов на постоянной основе на протяжении всего жизненного цикла эксплуатируемых грунтовых плотин [3].

Цель исследований: обоснование экономической эффективности от внедрения разработанной системы оперативной оценки геотехнического контроля грунтов для повышения эксплуатационной надежности грунтовых плотин, подвергнутых нестационарным воздействиям ударных и газодинамических нагрузок при взрывах.

Материалы и методы исследований. Определение показателя экономической эффективности обеспечения надежности разработанной системы оперативной оценки качества укладки грунтов в тело грунтовых плотин, а также осадок по заранее заданным параметрам, определяющим качество укладки грунтов в гидротехническое сооружение, является в большей степени инженерной, а не управленческой задачей, потому что опосредованно увязывается с обоснованием экономических и управленческих решений в ходе проектирования и эксплуатации грунтовых плотин, но непосредственно влияющих на объем инвестиций в обеспечение этих параметров. Поэтому более целесообразным является изучение взаимосвязи осуществляемых инвестиций в обеспечение проектной и эксплуатационной

надежности грунтовых плотин и уровня полезного эффекта от проводимых мероприятий, так как некоторые мероприятия либо могут иметь номинальный характер, либо напрямую не относиться к обеспечению конструкционной надежности тела грунтовой плотины.

При решении инженерной задачи по обеспечению качества строительных работ и уложенных в тело плотин грунтов итоговым результатом (целью) было обеспечение безопасности, эксплуатационной надежности и долговечности грунтовых плотин как на этапе их возведения, так и в течение более длительного периода их эксплуатации за счет эффективности данных методов, что снижает экономические затраты на обеспечение жизненного цикла грунтовых плотин. При оценке экономической эффективности инвестиций в повышение надежности грунтовых плотин важно, чтобы выбранные показатели отражали именно этот аспект. Таким образом, показатели надежности могут служить мерой экономической эффективности вложений, направленных на продление срока службы грунтовых плотин.

Проблематика надежности исследовалась с различных точек зрения в рамках научных теорий и подходов. Основные работы [4, 5], в которых заложены и рассматриваются основы теории надежности, – это труды Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляева, А.Д. Соловьева и В.А. Колемаева. При этом важно, что для решения задачи, сформулированной в рамках наших исследований, более близкой к обеспечению технической надежности через экономические категории и оценку их экономической эффективности является работа В.И. Эдельмана [6]. Для этого можно привести анализ основных положений существующих теорий надежности для корреляции ее экономического смысла с техническими аспектами решаемой нами задачи.

Если рассматривать теорию надежности в традиционном формате, становится понятно, что она отражает в основном технические аспекты решаемых задач, где такое понятие, как надежность, определяется способностью гидротехнического сооружения выполнять заданные функции, сохраняя при этом проектные характеристики в заранее установленных пределах при условии, что эксплуатация сооружения происходит без отклонений от заданных проектных характеристик и сооружение не подвергается нестационарным нагрузкам и воздействиям. В данном формате она является отражением классических формулировок технической, а не экономической теории надежности, описание которой предлагается

в трудах таких ученых, как Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин [7] и др.

Ключевые направления, которые можно выделить в данной теории, – это направления, связанные с расчетным обоснованием условий эксплуатации грунтовых плотин, наиболее приближенных к проектным значениям.

С технической стороны в теории надежности можно сформулировать следующее:

– Нарушение работоспособности грунтовой плотины классифицируется как отказ технической системы, вызывающий экономические последствия.

– Если грунтовая плотина выполняет заданные функции и не отклоняется в каких-либо параметрах от проектных значений, то данное состояние можно классифицировать как работоспособное [8].

– Если грунтовая плотина на протяжении продолжительного периода обеспечивает воспроизводственный цикл и достижение заданных экономических показателей, то данное состояние объекта может быть классифицировано как безотказное.

Важно отметить, что данные определения не несут в себе экономического содержания, что побуждает нас к установлению такой связи.

В рамках экономической эффективности и целесообразности осуществления инвестиций в обеспечение надежности гидротехнических сооружений более целесообразным было бы оценивать такие повреждения технических систем, которые бы могли привести к остановке или замедлению воспроизводственного цикла или увеличить расходы на эксплуатацию грунтовой плотины и ее вспомогательных элементов, что также могло бы снизить экономическую эффективность всего проекта в целом [8]. Такие события в большей степени соответствуют цели исследований с точки зрения оценки целесообразности инвестиций в обеспечение и повышение надежности гидротехнических сооружений в рамках нанесения потенциально экономического ущерба, поскольку грунтовые плотины являются объектом повышенной опасности [9]. Поэтому при оценке экономической эффективности проводимых мероприятий, связанных с повышением эксплуатационной надежности грунтовых плотин, следует учитывать качественное изменение таких параметров, как вероятность и среднее время безотказной и бесперебойной работы гидротехнического сооружения.

Данные показатели в классическом сценарии могут быть применены к грунтовым плотинам, находящимся в высокой степени износа и не подлежащим ремонту или восстановлению.

Когда грунтовые плотины подлежат восстановлению и в принципе являются ремонтнопригодными, более целесообразным было бы принимать показатели, непосредственно связанные с ремонтнопригодностью. К ним в данном случае и в большей степени подходят такие показатели, как вероятность восстановления ремонтнопригодности, среднее время ремонтнопригодности потенциально опасной грунтовой плотины в целях недопущения экономического ущерба населению и инфраструктуре региона, где они расположены. Также необходимо учесть такой показатель, как среднее время, за которое можно восстановить ремонтнопригодность, а также коэффициент технического использования, зависящий от интенсивности использования потенциально опасных объектов [10, 11].

В таблице 1 представлены применимость в рамках исследуемого вопроса, определение и вышеупомянутые показатели, аргументы и их расчетные формулы, позволяющие делать выводы о том, что есть существенные расхождения в подходах к оценке надежности в ее классической и в экономической теории. Если классическая теория надежности ориентирована на рассмотрение в большей степени аспектов технического характера, то экономическая теория ориентирована на интеграцию технических показателей к экономическим оценкам. Такой аспект нужно учитывать на этапе инвестиционного анализа потенциального объекта, потому что в данном случае результирующим фактором при принятии решения является сопоставление экономических затрат с достигнутым эффектом по повышению эксплуатационной надежности и безопасности грунтовых плотин.

К основным задачам при оценке количественных показателей экономической эффективности в результате инвестиций в повышение надежности эксплуатируемых грунтовых плотин могут быть отнесены:

– снижение количества отказов, и как следствие – снижение убытков, что в свою очередь ведет к уменьшению средств на ремонт или замену оборудования, а также ликвидации последствий стихийных бедствий от разрушения гидротехнических сооружений;

– снижение или предотвращение косвенных экономических последствий в виде сохранения положительной репутации, отсутствие штрафов и санкций на предприятие, и как следствие – обеспечение непрерывного воспроизводственного цикла;

– увеличение срока службы и надежности всего объекта, что ведет к снижению затрат

на текущий и капитальный ремонт гидротехнических сооружений;

– общее повышение надежности и безопасности в ходе работы гидротехнических сооружений, что ведет к снижению рисков с нанесением ущерба жизни и здоровью людей.

В этой связи можно сделать вывод о том, что экономическая целесообразность инвестиций в обеспечение надежности и безопасной работы грунтовых плотин оценивается через призму

таких технических показателей, как интенсивность отказов, надежность, а также интенсивность отказов уже эксплуатируемого объекта. Ключевое решение об осуществлении инвестиций, особенно в условиях экономических изменений, является в большей степени управленческим [10]. При этом принятие подобных решений зачастую основывается на сопряжении экономических и технических показателей оцениваемой системы (табл.).

Таблица. Показатели технической теории надежности
Table. Indicators of the technical theory of reliability

Показатель и его определение	Расчетные формулы и аргументы	Применимость к исследуемому вопросу
Вероятность безотказной работы $P(t)$ – это вероятность того, что в заданном интервале времени t в грунтовой плотине не возникнет отказ.	$P(t) = \frac{N - N_0}{N};$ где N – число объектов, участвующих в испытании (эксплуатации); N_0 – число объектов, отказавших в течение времени t .	Очевидно, для оценки эффективности необходимо рассмотреть две вероятности: во-первых, вероятность, вычисленную для грунтовых плотин, при строительстве которых не использовались предложенные мероприятия (базовая вероятность); во-вторых, вероятность, вычисленную для грунтовых плотин, при строительстве которых такие мероприятия использовались. Второй показатель на данный момент рассчитать невозможно. Расчет первого показателя будет использовать неоднородные данные, поэтому не отразит реальное положение дел в рассматриваемом аспекте.
Вероятность бесперебойной работы $P_{сб}(t)$ – это вероятность того, что в заданном интервале времени t будет отсутствовать сбой в работе грунтовой плотины.	$P_{сб}(t) = \frac{N - N_0}{N};$ где N – число объектов, поступивших на эксплуатацию; N_0 – число объектов, на которых произошел сбой в течение времени t .	
Среднее время безотказной работы T – это математическое ожидание работы грунтовой плотины до первого отказа.	$T = \int_0^{\infty} P(t)dt;$	
Интенсивность отказа $\lambda(t)$ – это условная плотность вероятности возникновения отказа невозстанавливаемой грунтовой плотины до определенного момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.	$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{ср}(\Delta t)};$ где $n(\Delta t)$ – число отказавших грунтовых плотин в интервал времени (Δt) ; $N_{ср}(\Delta t)$ – среднее число исправных изделий в интервал времени (Δt) .	
Вероятность восстановления $S(t)$ – это вероятность того, что отказавшая грунтовая плотина будет восстановлена в течение времени t .	$S(t) = \frac{n_b}{N_{ов}};$ где n_b – число грунтовых плотин, время восстановления которых меньше заданного времени t ; $N_{ов}$ – число грунтовых плотин, оставшихся на восстановлении.	
Интенсивность восстановления $M(t)$ – условная плотность распределения времени восстановления для момента времени t при условии, что до этого момента не произошло восстановление грунтовой плотины.	$M(t) = \frac{n_b(\Delta t)}{N_{всп}(\Delta t)};$ где $n_b(\Delta t)$ – число восстановленных грунтовых плотин за время Δt ; $N_{всп}(\Delta t)$ – среднее число грунтовых плотин, которые не были восстановлены в течение времени Δt .	Данные показатели имеют смысл рассматривать лишь для анализа эксплуатационной, а не строительной надежности.
Среднее время восстановления T_b – это натуральная величина ожидания восстановления.	$T_b = \int_0^{\infty} (1 - S(t))dt;$	
Коэффициент готовности $K_r(t)$ – это вероятность того, что грунтовая плотина работоспособна в произвольный момент времени t .	Стационарная оценка: $K_r = (\sum t_{pi}) / (\sum t_{pi} + \sum t_{bi});$ где t_{pi} – i -й интервал времени исправной работы грунтовой плотины; t_{bi} – интервал времени восстановления грунтовой плотины; n – число отказов грунтовой плотины.	

Ущерб от сбоев в работе грунтовых плотин не ограничивается прямыми финансовыми потерями или расходами. Он также включает в себя упущенные выгоды, возникающие ввиду невозможности использования грунтовой плотины в полной мере.

Упущенные возможности, вызванные отказами, могут привести к значительному экономическому ущербу и потере экономической устойчивости предприятия, в ведении которого находится грунтовая плотина, поскольку они останавливают производственный процесс и увеличивают расходы, не связанные напрямую с производственным циклом предприятия.

Задачи по оптимизации затрат на обеспечение эксплуатационной надежности объектов повышенной опасности являются логическим завершением процесса обоснования привлечения инвестиций, если эти инвестиции направлены на повышение надежности грунтовых плотин. Можно выработать два основных подхода к решению задач оптимизации работы грунтовых плотин.

Подход 1. Расчет целесообразности инвестиций в обеспечение и повышение надежности грунтовых плотин. Для реализации данного подхода принимаются: Z_1 – ежегодные затраты на поддержание заданного уровня надежности грунтовой плотины; Y_1 – ежегодный ущерб от отказов грунтовой плотины (без принятия мер по защите); $Z_{зм}$ – затраты на проведение мероприятий по защите от отказов грунтовой плотины; Y_2 – ожидаемый ущерб после проведения мероприятий по защите от отказов грунтовой плотины.

Эффективными можно считать инвестиции, если их объем не будет больше затрат на ликвидацию последствий в случае разрушения грунтовой плотины:

$$(Z_{зм} + Y_2) < Y_1. \quad (1)$$

В этой связи можно сделать вывод о том, что в случае достижения данного показателя заданный уровень надежности грунтовой плотины с помощью защитных мер потребует меньших общих затрат. Это означает, что общие приведенные затраты (включая затраты на поддержание надежности и защитные меры) будут ниже, чем без них:

$$(Z_{зм} + Y_2 + Z_1) < (Y_1 + Z_1). \quad (2)$$

Подход 2. Оценка экономии и повышение надежности грунтовой плотины. При реализации этого подхода принимаются: Z_1 – ежегодные затраты на обеспечение надежности

грунтовой плотины; Y_1 – ежегодный экономический ущерб от отказов грунтовой плотины; H_1 – уровень надежности грунтовой плотины при затратах Z_1 .

Здесь, как и в первом подходе, мероприятия по защите являются эффективными, если $(Z_{зм} + Y_2) < Y_1$.

Данная методика может быть обоснована, если при осуществлении инвестиций не происходит снижения уровня надежности грунтовой плотины:

$$(Y_1 + Z_1) - (Z_{зм} + Y_2 + Z_1) = \Delta Z, \quad (3)$$

где ΔZ – достигнутая экономия.

Сэкономленные средства (ΔZ) могут быть reinvestированы в достижение более высокого уровня надежности. Если затраты Z_1 обеспечивают надежность H_1 , то дополнительная сумма ΔZ позволит увеличить надежность грунтовой плотины на величину ΔH :

$$F(Z_1) = H_1, F(Z_1 + \Delta Z) = H_1 + \Delta H, \quad (4)$$

где F – функция, описывающая зависимость между затратами на обеспечение надежности грунтовой плотины и самим уровнем надежности.

Подход 3. Суть данного подхода заключается в рассмотрении грунтовой плотины не как системы технических показателей, а как системы управленческих и экономических решений. В рамках сценарного анализа можно найти похожие предложения, которые реализованы у зарубежных авторов.

Специалисты разрабатывают различные сценарии развития событий (например, климатических или геологических изменений). Затем эксперты рассчитывают экономические последствия применения различных мер в случае наступления форс-мажорных/нештатных ситуаций. Задача аналитиков заключается в комплексном анализе всех предложенных мер для минимизации потенциального ущерба и разработке необходимых организационно-строительных мероприятий в случае проявления негативных факторов, влияющих на работу потенциально опасных объектов.

Ключевыми аспектами такого анализа являются:

- Оценка рисков: *идентификация и количественная оценка потенциальных угроз, которые могут повлиять на надежность грунтовой плотины и всего гидроузла в целом.*
- Разработка сценариев: *создание реалистичных сценариев развития событий, учитывающих различные внешние факторы (природные катаклизмы, экономические кризисы, технологические сбои и т.д.).*

- Моделирование последствий: *прогнозирование экономического ущерба и операционных потерь для каждого сценария.*

- Эффективность применяемых мер: *анализ эффективности осуществления инвестиций и их вклад в обеспечение показателей надежности грунтовых плотин.*

- Оптимизация инвестиционных решений: *определение оптимального значения инвестиционных средств для достижения заданных показателей надежности грунтовой плотины или всего гидроузла в целом.*

Своевременность такого анализа позволила бы определить не только объем инвестиционных ресурсов, необходимых для ликвидации последствий и экономического ущерба, а именно предотвратить эти последствия, то есть на ранней стадии принять эффективные управленческие решения по недопущению образования аварий и катастроф на грунтовых плотинах.

Безопасность эксплуатируемых грунтовых плотин, подвергшихся влиянию нестационарных ударных воздействий и газодинамическим нагрузкам при взрыве, обеспечивается современными подходами к осуществлению своевременного финансирования в их ремонт и обеспечению надежности. Поэтому для снижения рисков прямого ущерба от разрушений более выгодным является поэтапное финансирование проектов, связанных с обеспечением и повышением их надежной и безопасной эксплуатации, что в рамках реализации подобных проектов требует автоматизации как финансовых, так и управленческих решений [12].

Таким образом, рассматриваемые подходы к оптимизации надежности грунтовых плотин и экономической системы в целом (от прямого расчета затрат и ущерба до комплексного сценарного анализа) направлены на достижение главной цели: обеспечение стабильной и эффективной работы объекта в условиях неопределенности и потенциальных рисков.

Инвестиции в обеспечение эксплуатационной надежности грунтовых плотин можно рассмотреть с точек зрения как прямых затрат, так и упущенных возможностей, что является критически важным элементом долгосрочной стратегии обеспечения жизненного цикла объекта.

Важно отметить и такой аспект: разработанные нами методы оперативной оценки по обеспечению качества устройства грунтовых плотин, как и прогноза их осадок, предполагают сокращение объема, трудоемкости и времени на выполнение этих работ, что подтверждается практикой

отечественного и зарубежного строительства грунтовых плотин. Такой подход/сценарий в работах В.И. Эдельмана отсутствует.

В рамках третьего подхода рассматривается надежность экономической системы как совокупного результата реализованных технических характеристик в результате воспроизводственного цикла грунтовой плотины в составе гидроузла. В связи с достаточно ограниченным количеством источников финансирования подобных проектов и их отраслевой спецификой основные управленческие и инвестиционные решения должны быть направлены на поддержание воспроизводственного цикла гидротехнического сооружения и надежности его основных проектных показателей.

Результаты и их обсуждение. Для оценки экономической эффективности предложенного метода в рамках рассматриваемой задачи мы принимаем следующее правило: под эффективностью понимаем не классическую финансовую прибыль (отношение прибыли к затратам), а ожидаемую разницу в затратах между двумя альтернативными вариантами.

Повышение экономической эффективности проекта в результате инвестиций может затрагивать следующие направления его реализации:

1. Совершенствование геотехнического освидетельствования грунтов, укладываемых в тело грунтовой плотины, и сокращение времени на производство данного вида работ.

В результате внедрения разработанной методики происходит оптимизация по таким категориям затрат, как сокращение времени, трудоемкости и объемов работ на контрольные мероприятия, уменьшение трудозатрат и требований к квалификации персонала. Это высвобождает дополнительные инвестиционные средства, которые могут быть направлены на повышение надежности и обеспечение непрерывности воспроизводственного цикла гидротехнического сооружения.

2. Разработка методов оперативной оценки отклонения основных показателей надежности гидротехнического сооружения от проектных значений и динамика их развития. Это приводит к экономии финансовых ресурсов на протяжении всего жизненного цикла грунтовой плотины с учетом длительного срока эксплуатации гидротехнических сооружений. Таким образом, высвобождаются значительные инвестиционные ресурсы, которые могут быть направлены на повышение надежности и обеспечение безопасной эксплуатации грунтовой плотины.

Экономическая эффективность предложенных мероприятий будет доказана, если:

1. Не произойдет снижение надежности грунтовой плотины и отклонение ее основных характеристик от проектных показателей.

2. Разница между затратами на строительство без использования методов оперативной оценки качества устройства грунтовых плотин и прогноза их осадок ($D_{\text{баз}}$) и с ними (D) является положительной. Если это условие не выполняется, расчет эффективности становится некорректным. В этой связи зависимость для оценки экономической эффективности привлечения инвестиций приобретает следующий вид:

$$\text{Выгода} = D_{\text{баз}} - D - \sum_{k=1}^n \Delta p_k \cdot Y_k, \quad (5)$$

где $\sum_{k=1}^n \Delta p_k \cdot Y_k$ – показатель, отражающий суммарную выгоду от повышения надежности объекта, полученную в результате реализации предложенных мероприятий.

Для оценки ущерба и выгоды от повышения надежности грунтовой плотины предлагается использовать экспертный метод, когда экспертам на разрешение ставятся вопросы:

1. Определить перечень аварийных событий, на которые влияют предложенные меры (обозначим их количество как n).

2. Оценить, как изменится ожидаемая частота возникновения каждого из этих событий (Δp_k , $k=1, 2, \dots, n$).

3. Оценить приведенный экономический ущерб от каждого аварийного события, если оно произойдет (Y_k).

Когда вероятность возникновения аварийной ситуации типа « k » возрастает, это отражается положительным значением показателя ($\Delta p_k > 0$). В обратном случае, если вероятность возникновения аварийной ситуации не увеличивается, показатель Δp_k будет меньше или равен нулю ($\Delta p_k \leq 0$). Ожидаемые потери от события ($\Delta p_k > 0$) будут положительными и определяться как произведение ущерба (Y_k) на показатель изменения вероятности (Δp_k).

Если суммарное значение, полученное путем умножения ущерба от каждого типа аварии (Y_k) на изменение вероятности его возникновения (Δp_k) по всем возможным типам аварий (от 1 до n), оказывается меньше нуля:

$$\left(\sum_{k=1}^n \Delta p_k \cdot Y_k < 0 \right),$$

это означает, что разработанный и внедренный комплекс мероприятий повышает общую надежность объекта.

Для корректного сравнения ущербов, нанесенных в разное время, используется понятие «приведенный ущерб». Фактический ущерб, понесенный в определенный момент ($Y_{\text{факт.}k}(t)$), приводится к текущему моменту с учетом стоимости денег во времени (дисконтируется):

$$Y_k = Y_{\text{факт.}k}(t) e^{-t \ln(1+\delta)}, \quad (6)$$

где d – безрисковая процентная ставка, используемая для расчетов.

Если момент возникновения аварии на грунтовой плотине не имеет значения и предполагается, что авария может произойти с равной вероятностью в любой момент времени на интервале от t_1 до t_2 , то приведенный ущерб определяется путем интегрирования:

$$Y_k = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} Y_{\text{факт.}k}(t) e^{-t \ln(1+\delta)} dt. \quad (7)$$

Разница между базовыми затратами и затратами при использовании новой методики, обозначаемыми как $D_{\text{баз}}$ и D , может интерпретироваться по-разному в зависимости от решаемой задачи.

Задача 1. Оптимизация укладки грунтов в тело плотины. При разработке оперативных методов контроля качества укладки грунтов в каменно-земляные плотины эти методы должны применяться на этапе планирования. Поэтому разница в затратах ($D_{\text{баз}} - D$) будет зависеть от того, насколько успешно удастся оптимизировать сроки планирования. Поскольку нет достаточных данных для сравнения результатов оптимизации в базовом варианте и при использовании новой методики, точную оценку величины ($D_{\text{баз}} - D$) сделать сложно. Однако можно с уверенностью сказать, что эта величина будет положительной, и здесь возможны два сценария.

Сценарий 1. Постоянный контроль качества в ходе реализации инвестиционного проекта. Если стандартные методы определения свойств грунтов являются частью критического пути в сетевом графике работ, то внедрение оперативных методов сократит общее время их выполнения. Это сокращение времени составит ΔT (в днях), которое является разницей между временем определения свойств грунтов по стандартным методам и новым оперативным методам. Если новый метод также попадает на критический путь, то экономия будет равна ΔT . Если же он попадает на ближайший подкритический путь, то экономия будет равна разнице между временем критического и подкритического путей (рис. 1).

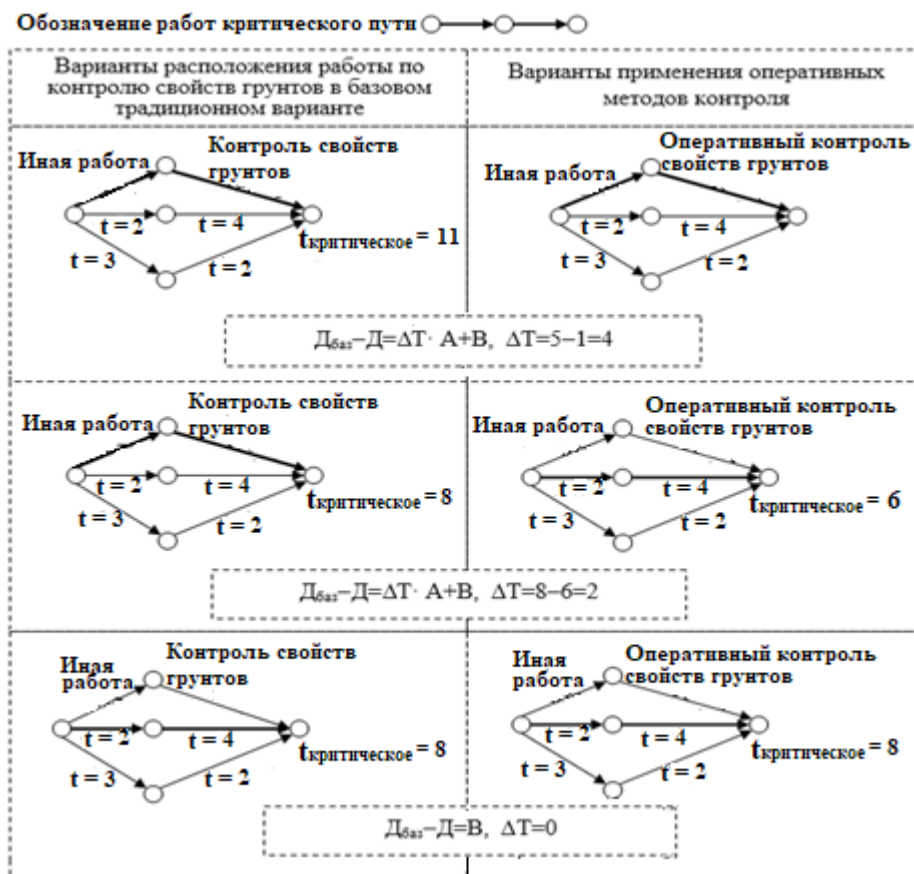


Рис. 1. Определение показателя экономической эффективности ($D_{\text{баз}} - D$) при использовании системы оперативной оценки качества укладки грунтов
Fig. 1. Determination of the economic efficiency indicator ($D_{\text{баз}} - D$) when using the system of operational assessment of the quality of soil laying

Если предположить, что «А» – это экономический эффект от досрочного завершения строительства, то вклад в общую экономию от досрочного завершения работ составит $(\Delta T \cdot A)$.

Сценарий 2. Контроль качества не на критическом пути. Если в базовом варианте определение свойств грунтов не влияло на критический путь, то сокращение времени может быть незначительным ($\Delta T = 0$). Экономический эффект от инвестиций в повышение надежности грунтовых плотин будет очевидным, так как сократятся затраты персонала на текущей обязательный мониторинг технического состояния грунтовой плотины и снизятся затраты на содержание и эксплуатацию лабораторного оборудования. Данные показатели экономической эффективности оценим величиной «В».

Задача 2. Прогнозирование осадки тела и основания грунтовой плотины. При использовании методов прогнозирования деформаций тела грунтовой плотины на основе качества уплотнения грунта и применении новых подходов к оценке качества уплотнения экономическая эффективность будет проявляться в предотвращении потенциальных аварийных ситуаций

и связанного с ними экономического ущерба. В этом случае разница ($D_{\text{баз}} - D$) будет отражать сумму предотвращенных ущербов от возможных деформаций, которые могли бы возникнуть при использовании стандартных методов.

Объем грунта (V) при ожидаемой величине осадки сооружения (S), который удастся сэкономить при использовании методов прогнозирования деформаций тела грунтовой плотины на основе качества уплотнения грунта, будет определяться как

$$V = z \int_0^g \frac{S}{H} h(x) dx, \quad (8)$$

где z – проектная ширина гребня плотины, на которую приходится «строительный подъем»; g – проектная длина гребня плотины; $h(x)$ – проектная мощность (толщина) «строительного подъема» по гребню сооружения; H – проектная высота грунтовой плотины.

Площадь поверхности, требующая «строительного запаса», напрямую зависит от ожидаемой величины осадки грунтовой плотины (S). При фиксированной ширине гребня z эта площадь представляет собой сумму длин слоев грунта ($L_0 + L_1 + \dots + L_N$) с определенной толщиной,

умноженную на z . Количество слоев $(N + 1)$ и их длина определяются величиной S :

$$L_k = \int_0^S H \operatorname{Ei} \left(\frac{s}{H} h(x) - 0,3k \right) dx, \quad (9)$$

где $H_{ev(x)}$ – функция Хэвисайда (при $x \geq 0$, и 0 принимает значение 1).



Рис. 2. Плотина «Сахаби» (САР) на этапе строительства (русло реки «Beit Yashut»)

Fig. 2. The Sahabi site (SAR) at the construction stage (Beit Yashut riverbed)

Выводы

Корректность представленных рассуждений подтверждается анализом действующих тарифов на земляные работы без учета инфляционных, региональных коэффициентов и проведенными расчетами по разработанной методике для каменно-земляных плотин «Сахаби» ($H = 68$ м) и «Саура» ($H = 78$ м). Экономическая выгода составила 80 и 56%

Список использованных источников

1. Секисов А.Н., Клименко В.В., Хорошев А.А., Сторчун Б.И. Основные тенденции и перспективы привлечения инвестиций в строительный сектор // Первый экономический журнал. 2024. № 9 (351). С. 168-175. DOI: 10.58551/20728115_2024_9_168. EDN: FRITOF
2. Пехтин В.А. Научное обобщение технико-экономических решений по строительству каменно-земляных плотин в условиях Крайнего Севера: специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пехтин Владимир Алексеевич. Санкт-Петербург, 1999. 307 с. EDN: QDATLP
3. Лопатина М.Г. Повышение эксплуатационной надежности грунтовых плотин в условиях потенциального заиливания дренажа: специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лопатина Маргарита Геннадьевна. Санкт-Петербург, 2009. 162 с. EDN: QEMPOX
4. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. 3-е изд., стер. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2024. 584 с.
5. Колемаев В.А. Математическая экономика: Учебник для вузов. 3-е изд., стер. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2022. 399 с.
6. Эдельман В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка. М.: Экономика, 1989. 151 с.

Количество слоев N «строительного запаса» определяется из условия:

$$L_N > 0, L_{N+1} = 0.$$

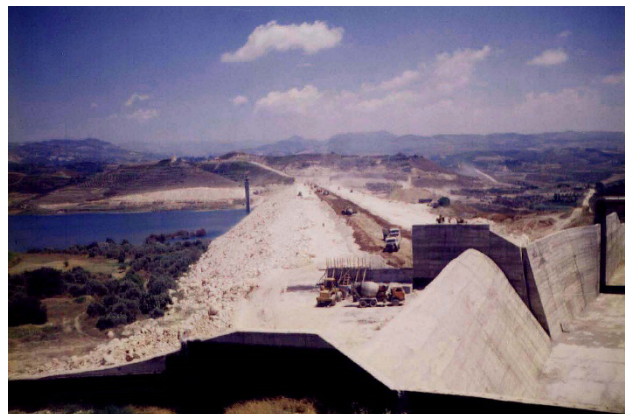


Рис. 3. Плотина «Саура» (САР) на этапе строительства (русло реки «Snoubar»)

Fig. 3. Saura dam (SAR) at the construction stage (Snoubar riverbed)

соответственно от затрат, предусмотренных проектными расчетами, на устройство «строительного запаса» грунтовых плотин. Это подтверждает целесообразность внедрения разработанной методики в практику проектирования, строительства и эксплуатации грунтовых плотин как объекта повышенной опасности в целях повышения их эксплуатационной надежности и безопасности.

References

1. Sekisov A.N., Klimenko V.V., Khoroshev A.A., Storchun B.I. Main trends and prospects for attracting investments in the construction sector // First Economic Journal. 2024. № 9(351). P. 168-175. DOI: 10.58551/20728115_2024_9_168. EDN: FRITOF
2. Pekhtin V.A. Scientific Generalization of Technical and Economic Solutions for the Construction of Stone-Earth Dams in the Far North: Specialty 05.22.07 "Hydraulic Engineering": Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences / Vladimir Alekseevich Pekhtin. Saint Petersburg, 1999. 307 p. EDN: QDATLP
3. Lopatina M.G. Improving the operational reliability of earth dams under conditions of potential drainage siltation: specialty 05.22.07 "Hydraulic engineering": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Lopatina Margarita Gennadyevna. Saint Petersburg, 2009. 162 p. EDN: QEMPOX
4. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyov A.D. Mathematical Methods in Reliability Theory. 3rd ed., revised. Moscow: UNITY-DANA, 2024. 584 p.
5. Kolemaev V.A. Mathematical Economics: Textbook for Higher Educational Institutions. 3rd stereotype. MOSCOW, UNITY-DANA PUBL., 2022. 399 p.
6. Edelman V.I. Reliability of technical systems: economic assessment. Moscow, Ekonomika Publ., 1989. 151 p.

7. Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. Надежность технических систем. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
8. Шакарна Салех. Оценка надежности гидротехнических сооружений на основе системного подхода с учетом сейсмических условий: Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2012. 158 с. EDN: QFVIKJ
9. Крутов Д.А. Гидротехнические сооружения: надежность и безопасность плотин: Учебник для вузов. М.: Изд-во Юрайт, 2026. 307 с. // Образовательная платформа Юрайт. URL: <https://urait.ru/bcode/589764>
10. Радзинский А.В. Надежность грунтовых плотин с противотфильтрационным элементом в виде «стены в грунте»: Дис. ... канд. техн. наук. Уфа. 2014. 128 с. EDN: JXWKUV
11. Алексаньян А.А. Управление промышленной безопасностью эксплуатации морских гидротехнических сооружений шельфа юга Вьетнама (на примере месторождения «Дракон» СП «Вьетсовпетро»): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2011. 25 с. EDN: ZOKJGF
12. Рыженко Н.Ю. Автоматизация оценки и прогнозирования безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов: Дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2006. 138 с. EDN: QEDIKD

Информация об авторах

Евгений Владимирович Андреев, канд. техн. наук, доцент кафедры «Государственного регулирования экономики ИГСУ РАНХиГС»; ORCID: 0000-0001-6867-144X; SPIN-код: 4590-9890; AuthorID: 804270; andreev-rf@mail.ru

Валерий Яковлевич Жарницкий, д-р техн. наук, профессор; Президент МОО «Академия проблем водохозяйственных наук»; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 1080-9924; AuthorID: 527542; zharnitskiy@mail.ru

Нартмир Владимирович Ханов, д-р техн. наук, профессор кафедры гидротехнических сооружений; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Вклад авторов

Е.В. Андреев – формулирование целей, задач и выводов исследования, проведение натурных наблюдений, выбор методов исследования, обоснование экономической эффективности от внедрения методов оперативной оценки геотехнических показателей грунтов гидротехнических сооружений, подготовка, редактирование и доработка окончательной версии статьи; В.Я. Жарницкий – проведение натурных испытаний в период возведения каменно-земляных плотин, разработка и апробация методов оперативной оценки геотехнических показателей грунтов на обследуемых каменно-земляных плотинах, подготовка и обработка эмпирической базы исследования; Н.В. Ханов – обработка и формирование результатов натурных исследований, разработка сценариев внедрения методов оперативной оценки геотехнических показателей грунтов гидротехнических сооружений применительно к решаемым задачам с учётом внешних факторов (природные катаклизмы, экономические кризисы, технологические сбои).

Поступила в редакцию / Received 15.06.2026

Одобрена после рецензирования / Approved 03.09.2026

Принята к публикации / Accepted 04.09.2026

7. Belyaev Yu.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V. Reliability of technical systems [J. Moscow, Radio and connection Publ., 1985. 608 p.

8. Shakarna Saleh. Assessment of the reliability of hydraulic structures based on a system approach taking into account seismic conditions: specialty 05.23.07 "Hydraulic engineering construction": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Shakarna Saleh. Samara, 2012. 158 p. EDN: QFVIKJ

9. Krutov D.A. Hydraulic structures: reliability and safety of dams: a textbook for higher educational institutions. Moscow, Yurayt Publ., 2026. 307 p. Text: electronic // Yurayt Educational Platform [site]. URL: <https://urait.ru/bcode/589764>

10. Radzinskiy A.V. Reliability of soil dams with a counter-seepage element in the form of a "wall in the soil": specialty 05.23.07 "Hydrotechnical construction": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Radzinsky Aleksandr Vladimirovich, 2014. 128 p. EDN: JXWKUV

11. Aleksanyan A.A. Management of industrial safety of operation of marine hydraulic structures of the shelf of the south of Vietnam (on the example of the Dragon field of JV Vietsovpetro): specialty 05.26.03 "Fire and industrial safety (by industries)": Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Aleksanyan Artur Aramovich. Ufa, 2011. 25 p. EDN: ZOKJGF

12. Ryzhenko N.Yu. Automation of assessment and forecasting of safety of hydraulic structures of liquid industrial waste storage facilities: specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and production (by industries)": Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Ryzhenko Natalya Yurievna. Petrozavodsk, 2006. 138 p. EDN: QEDIKD

About the authors

Evgeny V. Andreev, CSs (Tech), associate professor of the Department of State Regulation of the Economy of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Institute of Public Administration and Management; ORCID: 0000-0001-6867-144X; SPIN code: 4590-9890; AuthorID: 804270; andreev-rf@mail.ru

Valery Ya. Zharnitsky, DSs (Tech), President of MOO "Academy of Water Management Sciences"; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN code: 1080-9924; AuthorID: 527542; zharnitskiy@mail.ru

Nartmir V. Khanov, DSs (Tech), professor of the Department of Hydraulic Structures; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Contribution of the authors

E.V. Andreev – formulation of goals, objectives and conclusions of the study, field observations, selection of research methods, justification of economic efficiency from the introduction of methods for operational assessment of geotechnical indicators of soils of hydraulic structures, preparation, editing and revision of the final version of the article;

V.Y. Zharnitsky – conducting full-scale tests during the construction of stone-earth dams, development and testing of methods for operational assessment of geotechnical indicators of soils on the surveyed stone-earth dams, preparation and processing of the empirical base of the study;

N.V. Khanov – processing and formation of the results of field studies, development of scenarios for the implementation of methods for the operational assessment of geotechnical indicators of soils of hydraulic structures in relation to the tasks to be solved, taking into account external factors (natural disasters, economic crises, technological failures).

Оригинальная статья

УДК 627.824.7:628.515:681.518

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-75-85>



АНАЛИЗ ДАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОГРАЖДАЮЩИХ ДАМБ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ФОСФОГИПСА ПРИ ИХ НАРАЩИВАНИИ

А.А. Ткачев¹, А.И. Мокотова², Е.А. Волкова³, М.С. Медведев⁴

^{1,2,3,4}Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета; г. Новочеркасск, Российская Федерация

¹prof_al@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

²ainekludova@yandex.ru

³katerina7tomashevich7@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>

⁴arsgorobez@mail.ru

Аннотация. Цель исследований – на основе данных автоматизированного многоточечного мониторинга гидростатического давления и температуры подземных вод установить количественную структуру и динамику вертикального фильтрационного режима ограждающих дамб хвостохранилища фосфогипса и оценить фактический запас их фильтрационной прочности при поэтапном наращивании. Обработаны 42 и 53 замера по скважинам ГГ-1 и ГГ-2 за период ноября 2023 г. – сентября 2025 г., полученные многоточечными системами из четырех пьезорезистивных датчиков со встроенными термисторами и регистраторами САП-1М/GSM. Выполнены статистическая обработка рядов, расчет вертикальных градиентов по 6 измерительным интервалам, оценка относительной проницаемости слоев из условия неразрывности вертикального потока и сопоставление с критериями безопасности K_1 и $K_{пр}$. Установлен устойчивый нисходящий поток с полным перепадом напора 20,62 м (ГГ-1) и 22,47 м (ГГ-2); показано, что режим не является установившимся. В скважине ГГ-2 зарегистрирован переходный процесс: за 39 суток напоры в средней части намывного массива выросли на 7,85 и 7,48 м и рассеялись за 65 суток при реакции основания не более 0,61 м. В скважине ГГ-1 доля перепада напора на интервале «Кремнегель-сцементированный фосфогипс» возросла с 26,4 до 52,5% при снижении доли интервала с прослоем торфа с 51,0 до 21,6%. Термометрия независимо подтверждает различие участков: температура вод основания составляет 7,48°C в ГГ-1 против 12,56°C в ГГ-2. Минимальный запас до критерия K_1 3,12 м. Полученные оценки позволяют обосновать схему дренирования на участке ГГ-2, регламент опроса датчиков в период наращивания и параметризацию слоистой геофильтрационной модели.

Ключевые слова: ограждающие дамбы, хвостохранилище фосфогипса, автоматизированный мониторинг, гидростатическое давление, температурный режим, гидравлический градиент, переходный процесс, фильтрационная прочность, безопасность ГТС

Формат цитирования: Ткачев А.А., Мокотова А.И., Волкова Е.А., Медведев М.С. Анализ данных автоматизированного пьезометрического мониторинга ограждающих дамб хвостохранилища фосфогипса при их наращивании. Природообустройство. 2026;Т.19(4):75-85. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-75-85>

Scientific article

ANALYSIS OF AUTOMATED PIEZOMETRIC MONITORING DATA FOR THE CONTAINMENT DAMS OF A PHOSPHOGYPSUM TAILINGS STORAGE FACILITY DURING THEIR RAISING

Tkachev A.A.¹, Mokotova A.I.², Volkova E.A.³, Medvedev M.S.⁴

^{1,2,3,4}Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

¹prof_al@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

²ainekludova@yandex.ru

³katerina7tomashevich7@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>

⁴arsgorobez@mail.ru

Abstract. *The purpose of the research* is to establish, from automated multipoint monitoring of hydrostatic pressure and groundwater temperature, the quantitative structure and dynamics of the vertical seepage

regime of the containment dams of a phosphogypsum tailings storage facility and to assess the actual reserve of their seepage strength during staged raising. *Materials and methods.* Forty-two and fifty-three readings from wells GG-1 and GG-2 covering November 2023 – September 2025 were processed; the data came from multipoint systems of four piezoresistive sensors with built-in thermistors and SAP-1M/GSM loggers. The work included statistical processing of the series, calculation of vertical hydraulic gradients for six measuring intervals, estimation of the relative permeability of the layers from the continuity condition of the vertical flow, and comparison with the design safety criteria K1 and Kpr. *Results.* A steady downward flow was established with a total head difference of 20.62 m (GG-1) and 22.47 m (GG-2); the regime was shown not to be steady. A transient process was recorded in well GG-2: over 39 days the heads in the middle of the mass rose by 7.85 and 7.48 m and dissipated over 65 days, while the response of the foundation did not exceed 0.61 m. In well GG-1 the share of head loss across the silica gel – cemented phosphogypsum interval increased from 26.4 to 52.5%, while the share of the interval containing the peat layer decreased from 51.0 to 21.6%. Thermometry independently confirms the difference between the sites: the foundation groundwater temperature is 7.48°C in GG-1 against 12.56°C in GG-2. The minimum reserve up to criterion K1 is 3.12 m. *Conclusions.* The estimates make it possible to substantiate the drainage layout in the GG-2 area, the sensor polling schedule during raising and the parameterisation of a layered seepage model.

Keywords: containment dams, phosphogypsum tailings storage facility, automated monitoring, hydrostatic pressure, thermal regime, hydraulic gradient, transient process, seepage strength, safety of hydraulic structures

For citation: Tkachev A.A., Mokotova A.I., Volkova E.A., Medvedev M.S. Analysis of automated piezometric monitoring data for the containment dams of a phosphogypsum tailings storage facility during their raising. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):75-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-75-85>

Введение. Поэтапное наращивание ограждающих дамб хвостохранилищ изменяет напряженно-деформированное состояние сооружения и положение кривой депрессии: рост порового давления снижает эффективные напряжения в скелете грунта и сопротивление сдвигу. Неконтролируемое изменение фильтрационного режима остается одной из доминирующих причин аварий [1], а стандарт GISTM требует перехода к риск-ориентированному управлению на основе данных наблюдений [2]. Традиционная сеть с ручными замерами месячной дискретности фиксирует лишь конечный результат медленных процессов и не позволяет разделить вклад отдельных слоев в общее фильтрационное сопротивление [3]. Автоматизированные многоточечные системы устраняют этот пробел, однако их данные чаще используются для констатации отсутствия превышения критериев безопасности [4, 6], тогда как количественная интерпретация: расчет послойных градиентов, оценка контраста проницаемости, параметризация расчетных моделей – выполняется редко, особенно для хвостохранилищ фосфогипса, материал которых претерпевает вторичную цементацию [7-10]. Между тем наибольшую опасность при наращивании представляют не сезонные изменения, а кратковременные процессы генерации избыточного порового давления, сопоставимые по длительности с интервалом между ручными замерами, а встроенные в датчики термисторы дают независимое

от пьезометрии поле для верификации выводов о фильтрации [9].

Цель исследований: на основе данных автоматизированного многоточечного мониторинга гидростатического давления и температуры подземных вод установить количественную структуру вертикального фильтрационного режима ограждающих дамб хвостохранилища фосфогипса и оценить фактический запас их фильтрационной прочности при поэтапном наращивании.

Задачи исследований:

- 1) выполнить статистическую обработку рядов наблюдений и установить характер их изменчивости во времени;
- 2) определить вертикальное распределение пьезометрических напоров и порового давления в теле дамбы и основании;
- 3) рассчитать вертикальные гидравлические градиенты по всем измерительным интервалам, выявить слои основного фильтрационного сопротивления и проследить их изменение за период наблюдений;
- 4) оценить относительную фильтрационную неоднородность разреза и привлечь данные термометрии для независимой проверки полученных выводов;
- 5) сопоставить фактические уровни с проектными критериями безопасности и определить запас;
- 6) сформулировать инженерные решения, вытекающие из установленных закономерностей.

Материалы и методы исследований.

Объект исследований – ограждающие дамбы действующего хвостохранилища фосфогипса I класса ответственности в районе г. Череповца Вологодской области, возводимые по намывной технологии с поэтапным наращиванием ярусов обвалования. Тело дамбы сложено фосфогипсом, свойства которого изменяются во времени: верхние слои не консолидированы, глубокие горизонты уплотнены и частично сцементированы вследствие вторичных физико-химических процессов. В разрезе присутствует также прослой кремнегеля – побочного продукта производства с низкой водопроницаемостью.

Геолого-литологическое строение разрезов, вскрытых скважинами, приведено на рисунке 1. Под техногенными грунтами залегают четвертичные аллювиальные пески, подстилаемые слабопроницаемыми суглинками. В разрезе скважины ГГ-1 на глубине 32,5-34,2 м вскрыт прослой торфа мощностью 1,7 м; в разрезе ГГ-2 он отсутствует, что и определяет различие фильтрационных условий на двух участках. Лабораторные определения физико-механических и фильтрационных характеристик не выполнялись, поэтому оценка фильтрационной неоднородности носит относительный характер.

Контрольно-измерительная аппаратура. Наблюдательная сеть объекта включает в себя традиционную сеть из 80 пьезометрических скважин в 28 контрольных створах (замеры электроуровнемером один раз в месяц) и автоматизированную подсистему, данные которой служат в качестве основы представленных исследований. Последняя развернута на базе скважин ГГ-1 и ГГ-2, пробуренных 20-22.11.2023 г. и 21-24.11.2023 г. вблизи существующих створов пьезометров. Каждая скважина обсажена фильтровой колонной и оборудована многоточечной системой из четырех автономных датчиков, глубины установки которых выбраны по литологическому строению массива: в скважине ГГ-1 датчик 56665 – на 13,0 м (фосфогипс слабый), 56694 – на 29,0 м (кремнегель), 56800 – на 32,0 м (сцементированный фосфогипс), 56887 – на 36,0 м (четвертичные пески); в скважине ГГ-2 датчики 57229 и 56670 – на 8,0 и 18,0 м (фосфогипс средней плотности), 56878 – на 28,0 м (сцементированный фосфогипс), 53026 – на 39,0 м (четвертичные пески). Гидравлическая изоляция точек измерения обеспечивается тампонами из гранулированного бентонита, исключаящими переток вдоль затрубного пространства, и именно она обеспечивает достоверность послойных градиентов.

Применены пьезорезистивные датчики гидростатического давления со встроенными термисторами: диапазон измерения давления составляет 0-100 м вод. ст. при пределе допускаемой погрешности $\pm 0,10$ м вод. ст., диапазон измерения температуры – от -20 до $+80^\circ\text{C}$ при погрешности $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Сбор и передача данных осуществляются регистратором САП-1М/GSM (заводские номера 1022104 и 1022105); дискретность опроса – сутки.

Методика обработки данных. Абсолютная отметка пьезометрического уровня для каждого датчика рассчитывалась по формуле:

$$H_{\text{абс}} = H_{\text{изм}} + Z_{\text{дат}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где $H_{\text{абс}}$ – абсолютная отметка пьезометрического уровня, м (Балтийская система высот); $H_{\text{изм}}$ – показание датчика (гидростатический напор), м вод. ст.; $Z_{\text{дат}}$ – абсолютная отметка установки датчика, м.

$$u = \gamma_{\text{в}} \cdot H_{\text{изм}}, \text{ кПа}, \quad (2)$$

где u – поровое давление, кПа; $\gamma_{\text{в}} = 9,81 \text{ кН/м}^3$ – удельный вес воды; $H_{\text{изм}}$ – показание датчика, м вод. ст.

Значение u входит непосредственно в критерий прочности Мора-Кулона в эффективных напряжениях (принцип Терцаги), связывающий результаты мониторинга с устойчивостью откосов [1, 5]:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \text{tg } \phi' = c' + (\sigma - u) \cdot \text{tg } \phi', \text{ кПа}, \quad (3)$$

где τ_f – сопротивление грунта сдвигу, кПа; c' – эффективное удельное сцепление, кПа; σ – полное нормальное напряжение, кПа, зависящее от высоты наращиваемого яруса; σ' – эффективное нормальное напряжение, кПа; ϕ' – эффективный угол внутреннего трения, град.

Из формулы (3) следует, что рост u при неизменном σ линейно снижает σ' и, соответственно, τ_f ; именно поэтому непрерывный контроль u является определяющим для оценки безопасности при наращивании. Вертикальный гидравлический градиент между соседними датчиками рассчитывался по формуле:

$$I = (H_1 - H_2) / L, \quad (4)$$

где I – вертикальный гидравлический градиент, безразмерная величина; H_1, H_2 – абсолютные отметки пьезометрических уровней на верхнем и нижнем датчиках соответственно, м; L – расстояние между датчиками по вертикали, м. Положительное значение соответствует нисходящей фильтрации, отрицательное – восходящей.

Для количественной оценки фильтрационной неоднородности разреза использовано условие неразрывности установившегося вертикального потока: при отсутствии источников и стоков удельный расход через все слои одинаков, $q = k_i \cdot I_i = \text{const}$, откуда относительный коэффициент фильтрации i -го

интервала по отношению к верхнему (опорному) интервалу –

$$k_i / k_1 = I_i / I_1, \quad (5)$$

где k_i , k_1 – коэффициенты фильтрации i -го и опорного интервалов, м/сут.; I_i , I_1 – соответствующие вертикальные градиенты.

Соотношение (5) позволяет по данным одного лишь пьезометрического мониторинга получить оценку контраста проницаемости слоев без отбора монолитов. Запас пьезометрического уровня до проектного критерия безопасности определялся как

$$\Delta H_{K1} = H_{K1} - H_{абс}, \quad (6)$$

где H_{K1} – абсолютная отметка пьезометрического уровня, отвечающая критерию безопасности первого уровня $K1$ (коэффициент устойчивости $k_{st} = 1,25$), м. Аналогично рассчитывался запас до предельного критерия $K_{пр}$ ($k_{st} = 1,0$). Значения H_{K1} и $H_{K_{пр}}$ приняты по Декларации безопасности ГТС для текущего этапа эксплуатации.

Результаты и их обсуждение. Характер рядов наблюдений. Ряды абсолютных отметок пьезометрических уровней приведены на рисунке 2, их статистические характеристики – в таблице 1. Массив включает в себя 42 замера

по скважине ГГ-1 и 53 по скважине ГГ-2; показания на даты оборудования скважин (22.11.2023 г. и 24.11.2023 г.) в обработку не включались, поскольку отражают уровень воды в незатампонированном стволе.

Полученные характеристики опровергают предположение о квазиустановившемся характере режима, которое можно было бы сделать по единичному срезу измерений. Датчики верхней зоны обеих скважин и датчики основания демонстрируют размах 1,18-2,65 м при СКО 0,22-0,83 м, что отвечает сезонным колебаниям, тогда как датчик 56800 в скважине ГГ-1 и датчики 56670 и 56878 в скважине ГГ-2 показывают размах 8,71-9,03 м при СКО 2,00-2,59 м – на порядок выше сезонного фона. Природа этих изменений в двух скважинах является различной.

Переходный процесс февраля 2025 г. в скважине ГГ-2. Наиболее выразительное событие за весь период наблюдений – кратковременный подъем напоров в средней части намывного массива скважины ГГ-2 (рис. 2б). За 39 суток, с 15.01.2025 г. по 23.02.2025 г., отметка уровня выросла на 7,85 м по датчику 56670 (18,0 м)

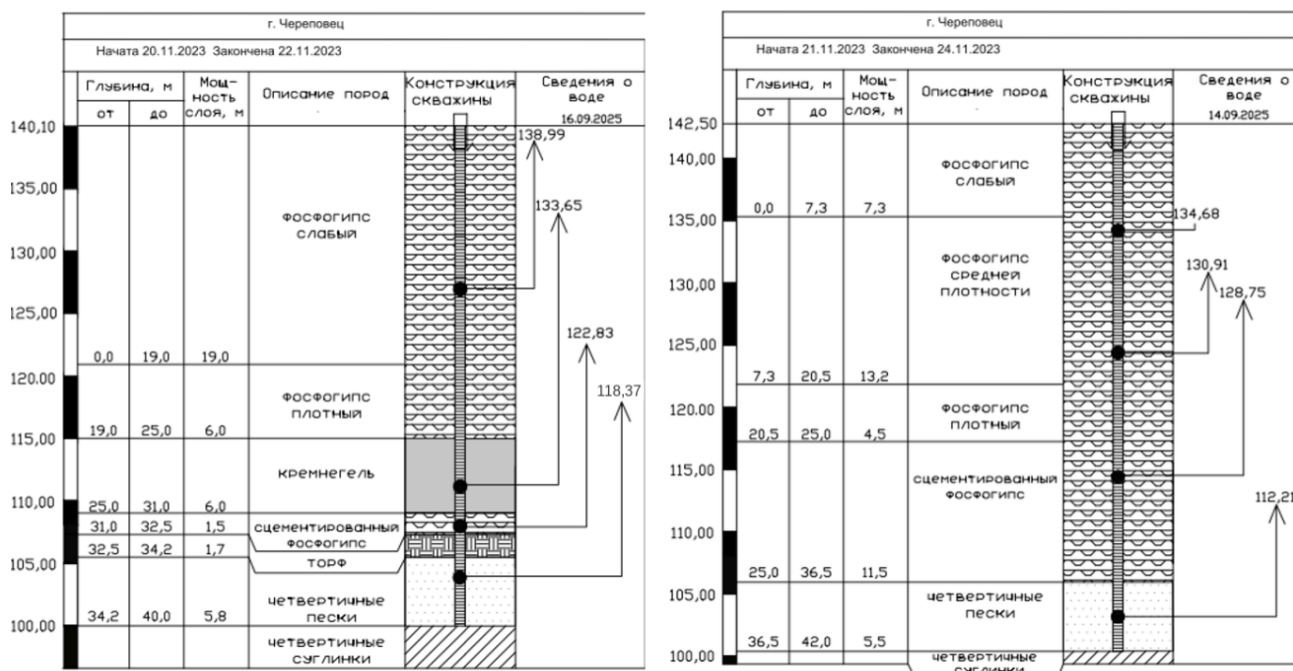


Рис. 1. Геолого-литологические разрезы скважин ГГ-1 (а) и ГГ-2 (б) с распределением пьезометрических уровней по глубине на 16.09.2025 г. и 14.09.2025 г.:

слева – шкала абсолютных отметок, м (Балтийская система высот);
в графах «Глубина, м» – границы и мощности литологических разностей;
в графе «Конструкция скважины» точками показаны места установки датчиков;
цифрами со стрелками указаны абсолютные отметки пьезометрических уровней, м

Fig. 2. Time series of absolute elevations of piezometric levels recorded by the sensors of wells GG-1 (a) and GG-2 (b) over the period XI.2023 – IX.2025.

Abscissa – date of observation; ordinate – absolute elevation of the piezometric level, m (Baltic height system); the legend gives the sensor serial number, installation depth and host lithological unit

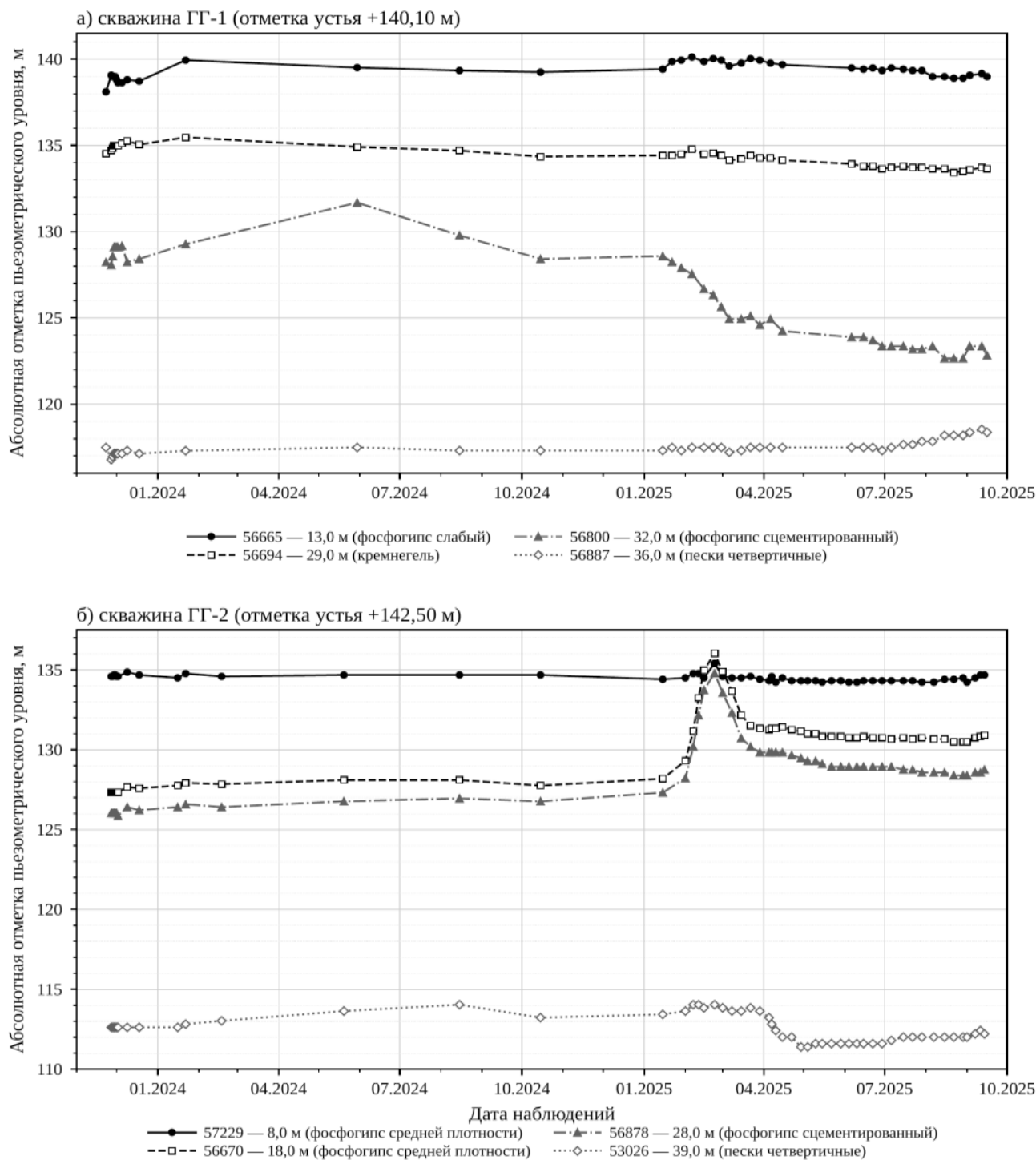


Рис. 2. Динамика абсолютных отметок пьезометрических уровней по датчикам скважин ГГ-1 (а) и ГГ-2 (б) за период XI.2023 г. – IX.2025 г.:

по оси абсцисс – дата наблюдений; по оси ординат – абсолютная отметка пьезометрического уровня, м (Балтийская система высот); в легенде – заводской номер датчика, глубина установки и вмещающая литологическая разность

Fig. 2. Time series of absolute elevations of piezometric levels recorded by the sensors of wells GG-1 (a) and GG-2 (b) over the period XI.2023 – IX.2025.

Abscissa – date of observation; ordinate – absolute elevation of the piezometric level, m (Baltic height system); the legend gives the sensor serial number, installation depth and host lithological unit

и на 7,48 м по датчику 56878 (28,0 м), достигнув максимальных за период значений +136,03 и +134,79 м при среднем темпе подъема 0,20 и 0,19 м/сут. Диссипация избыточного

напора заняла около 65 суток: к 29.03.2025 г. уровни вернулись к отметкам +131,33 и +129,83 м.

Реакция остальных горизонтов оказалась несопоставимо слабее: датчик 57229,

Таблица 1. Статистические характеристики рядов пьезометрических уровней и температуры подземных вод (XI.2023 г. – IX.2025 г.)

Table 1. Statistical characteristics of the piezometric level and groundwater temperature series (XI.2023 – IX.2025)

Скв.	№ датчика	Глу-би-на, м	Уровень мин., м	Уро-вень макс., м	Уро-вень средн., м	СКО уров-ня, м	Раз-мах уров-ня, м	t мин., °C	t макс., °C	t средн., °C	Раз-мах t, °C
ГГ-1	56665	13,0	+138,11	+140,12	+139,34	0,46	2,01	14,7	20,4	15,95	5,7
ГГ-1	56694	29,0	+133,43	+135,47	+134,31	0,55	2,04	8,8	9,8	9,46	1,0
ГГ-1	5680	32,0	+122,65	+131,68	+126,07	2,59	9,03	8,2	9,0	8,46	0,8
ГГ-1	56887	36,0	+116,78	+118,54	+117,51	0,39	1,76	7,4	7,9	7,48	0,5
ГГ-2	57229	8,0	+134,23	+135,41	+134,49	0,22	1,18	11,9	14,0	13,14	2,1
ГГ-2	56670	18,0	+127,32	+136,03	+130,32	2,04	8,71	13,2	14,3	13,82	1,1
ГГ-2	56878	28,0	+125,86	+134,79	+128,74	2,00	8,93	13,5	14,7	14,14	1,2
ГГ-2	53026	39,0	+111,39	+114,04	+112,57	0,83	2,65	11,8	13,8	12,56	2,0

фиксирующий поверхность депрессии, поднялся на 1,00 м, а датчик 53026 в песках основания – на 0,61 м. Следовательно, импульс был сгенерирован внутри намывного массива и практически полностью погашен слоем сцементированного фосфогипса, не достигнув водоносного горизонта основания. Градиент в нижнем интервале вырос при этом с 1,26 до 1,89, что представляет наибольшую нагрузку на контактную зону за весь период наблюдений.

Событие имеет и методическое значение: продолжительность его фазы максимума составила около трех недель, поэтому при месячной дискретности ручных замеров вероятность зафиксировать пик близка к случайной, а темп подъема 0,2 м/сут. не мог быть определен.

Перераспределение фильтрационного сопротивления в скважине ГГ-1. Изменения в скважине ГГ-1 носят не импульсный, а направленный характер (рис. 2а). Отметка уровня по датчику 56800 (32,0 м) монотонно снизилась с +131,68 м (30.05.2024) до +122,65 м (август 2025 г.), то есть на 9,03 м, тогда как на вышележащем датчике 56694 снижение составило лишь 1,82 м, а на нижележащем 56887 уровень вырос на 1,06 м. При практически неизменном полном перепаде напора по всей толще (20,62–22,19 м) это означает перераспределение фильтрационного сопротивления между слоями.

Расчет градиентов по опорным датам показал, что в течение 2024 г. и в начале 2025 г. основное сопротивление было сосредоточено в интервале 32,0–36,0 м, включающем в себя прослой торфа: на него приходилось от 50,6 до 64,4% полного перепада при градиенте 2,78–3,55. В первом полугодии 2025 г. произошла инверсия: доля интервала 29,0–32,0 м (кремнегель и сцементированный фосфогипс) выросла с 26,4 до 52,5%, а доля интервала 32,0–36,0 м снизилась с 51,0 до 21,6%; градиенты изменились с 1,94 до 3,61 и с 2,82

до 1,12 при практически неизменном градиенте верхнего интервала (0,31–0,35).

Наиболее вероятное объяснение заключается в продолжающейся цементации фосфогипса в интервале 31,0–32,5 м и кольматации кремнегеля при сохранении дренирующей способности контакта с песками. Вместе с тем нельзя исключить и приборную природу тренда – дрейф нуля датчика 56800.

Структура фильтрационного режима на конец периода наблюдений. Дальнейшие расчеты выполнены по данным сентября 2025 г. (табл. 2, 3). Данные всех 8 датчиков свидетельствуют об устойчивом нисходящем потоке, дренирующемся в водоносный горизонт четвертичных песков. Общий перепад напора составляет 20,62 м в скважине ГГ-1 и 22,47 м в скважине ГГ-2 при мощности контролируемой толщи 23,0 и 31,0 м; при отсутствии зон восходящей фильтрации это подтверждает прямую гидравлическую связь техногенного и природного водоносных горизонтов.

Отметки уровней на верхних датчиках позволяют оценить заглубление поверхности депрессии относительно гребня действующего яруса: в скважине ГГ-1 оно составляет 1,11 м, в скважине ГГ-2 – 7,82 м. Различие в 6,71 м между участками одного сооружения объясняет минимальный запас до критерия К1 именно на участке ГГ-1 и повышает там риск сезонного морозного пучения. Датчик 57229 при показании 0,18 м вод. ст. фиксирует положение самой поверхности депрессии.

Рассчитанные по (2) значения порового давления изменяются от 1,8 кПа на поверхности депрессии до 221,2 кПа на глубине 29,0 м. Максимальные значения приурочены не к нижним, а к средним датчикам обеих скважин, что прямо следует из послойной структуры сопротивления: над водоупорным комплексом накапливается

Таблица 2. Пьезометрические уровни, поровое давление и сопоставление с критериями безопасности (сентябрь 2025 г.)

Table 1. Statistical characteristics of the piezometric level and groundwater temperature series (XI.2023 – IX.2025)

Скв.	№ датчика	Глубина, м	Показание датчика, м вод. ст.	Абс. отм. пьезометр. уровня, м	u , кПа	$K1 (k_{st} = 1,25)$, м	Запас до $K1$, м	$K_{пр} (k_{st} = 1,0)$, м	Запас до $K_{пр}$, м
ГТ-1	56665	13,0	11,89	+138,99	116,6	+142,11	3,12	+152,01	13,02
ГТ-1	56694	29,0	22,55	+133,65	221,2	+138,13	4,48	+138,85	5,20
ГТ-1	56800	32,0	14,73	+122,83	144,5	+137,66	14,83	+138,85	16,02
ГТ-1	56887	36,0	14,27	+118,37	140,0	+161,71	43,34	+163,75	45,38
ГТ-2	57229	8,0	0,18	+134,68	1,8	+139,73	5,05	+140,39	5,71
ГТ-2	56670	18,0	6,41	+130,91	62,9	+140,04	9,13	+140,39	9,48
ГТ-2	56878	28,0	14,25	+128,75	139,8	+140,04	11,29	+140,39	11,64
ГТ-2	53026	39,0	8,71	+112,21	85,4	+134,55	22,34	+150,40	38,19

Примечание. $K1$ – критерий безопасности первого уровня, соответствующий нормативному коэффициенту устойчивости $k_{st} = 1,25$; $K_{пр}$ – предельный критерий, соответствующий $k_{st} = 1,0$. Значения приняты по Декларации безопасности ГТС.

Таблица 3. Вертикальные гидравлические градиенты, распределение перепада напора и относительная проницаемость по измерительным интервалам (сентябрь 2025 г.)

Table 3. Vertical hydraulic gradients, head loss distribution and relative permeability by measuring intervals (September 2025)

Интервал (скважина, датчики)	Глубина, м	L , м	Литологический состав интервала	ΔH , м	Доля, %	I	k_i/k_1
ГТ-1: 56665-56694	13,0-29,0	16,0	Фосфогипс слабый и плотный	5,34	25,9	0,334	1,00
ГТ-1: 56694-56800	29,0-32,0	3,0	Кремнегель, цементированный фосфогипс	10,82	52,5	3,607	0,093
ГТ-1: 56800-56887	32,0-36,0	4,0	Цементированный фосфогипс, торф, пески	4,46	21,6	1,115	0,300
ГТ-1: в целом	13,0-36,0	23,0	Вся контролируемая толща	20,62	100	0,897	–
ГТ-2: 57229-56670	8,0-18,0	10,0	Фосфогипс средней плотности	3,77	16,8	0,377	1,00
ГТ-2: 56670-56878	18,0-28,0	10,0	Фосфогипс средней плотности и плотный	2,16	9,6	0,216	1,745
ГТ-2: 56878-53026	28,0-39,0	11,0	Цементированный фосфогипс, пески	16,54	73,6	1,504	0,251
ГТ-2: в целом	8,0-39,0	31,0	Вся контролируемая толща	22,47	100	0,725	–

Примечание. Относительная проницаемость рассчитана по формуле (5) относительно верхнего интервала каждой скважины, принятого за опорный (k_1).

Note. The relative permeability is calculated according to formula (5) relative to the upper interval of each well, taken as the reference interval (k_1).

напор, который затем резко срабатывается. Согласно (3) зона наименьших эффективных напряжений расположена непосредственно над водоупором, а не у подошвы сооружения.

В скважине ГТ-1 более половины полного перепада напора – 10,82 м из 20,62 м – срабатывается на интервале мощностью всего 3,0 м, приуроченном к кремнегелю и цементированному фосфогипсу, где градиент достигает 3,61, а относительный коэффициент фильтрации в 10,8 раза ниже, чем у вышележащей толщи. Именно этот комплекс, а не прослой торфа, выполняет функцию основного водоупора: торф попадает в интервал 32,0-36,0 м с градиентом 1,12.

В скважине ГТ-2 картина является качественно иной. Верхние два интервала общей мощностью 20,0 м срабатывают лишь 26,4% полного перепада при градиентах 0,377 и 0,216.

Основное сопротивление сосредоточено в нижнем интервале 28,0-39,0 м: 16,54 м перепада (73,6%) при градиенте 1,50. Роль водоупора здесь выполняет исключительно цементированный фосфогипс мощностью 11,5 м – образование техногенное, свойства которого могут изменяться во времени.

Осредненные по всей толще градиенты (0,897 против 0,725) различий между участками не выявляют. Принципиальное различие обнаруживается только на уровне послойного анализа и заключается в том, где именно сосредоточено фильтрационное сопротивление: в скважине ГТ-1 – в средней части разреза, на удалении 8,0 м от контакта с песками основания, в скважине ГТ-2 – непосредственно у этого контакта. Это основной содержательный итог работы, недостижимый при использовании традиционной

сети одноточечных пьезометров: разброс отметок уровня по глубине в пределах одной точки достигает 20,62 и 22,47 м (табл. 2). Отметим, что градиент 1,50 осреднен по интервалу, включающему в себя и сцементированный фосфогипс, и пески, поэтому локальный градиент в песках заведомо меньше, а контактная зона «Сцементированный фосфогипс-песок» наиболее уязвима для контактного размыва.

Температурный режим и независимая проверка выводов о неоднородности. Ряды температуры подземных вод приведены на рисунке 3, статистические характеристики – в таблице 1.

Термические профили двух скважин различаются принципиально. В скважине ГГ-1 средняя температура закономерно убывает с глубиной: 15,95°C на 13,0 м; 9,46°C на 29,0 м; 8,46°C на 32,0 м; 7,48°C в песках основания на 36,0 м. Сезонная волна прослеживается только на верхнем датчике (размах – 5,7°C) и практически полностью затухает на глубине 29,0 м. В скважине ГГ-2 разрез, напротив, близок к изотермическому: 13,14; 13,82; 14,14; 12,56°C при размахе 1,1-2,1°C.

Наиболее информативным является сопоставление температур в песках основания при сопоставимых глубинах: 7,48°C в скважине ГГ-1 (36,0 м) против 12,56°C в скважине ГГ-2 (39,0 м). Значение 7,5°C отвечает фоновой температуре подземных вод региона, тогда как превышение на 5,08°C можно объяснить только поступлением в горизонт основания более теплой воды техногенного происхождения. Тем самым термометрия независимо подтверждает основной вывод работы: на участке ГГ-2 эффективный водоупор между намывным массивом и основанием отсутствует, тогда как на участке ГГ-1 комплекс «Кремнегель-сцементированный фосфогипс-торф» ограничивает и фильтрационный, и конвективный теплопереносы [9]. Дополнительный аргумент – синхронное с подъемом напоров понижение температуры на датчиках 56670 и 56878 на 0,7 и 0,6°C в феврале 2025 г.

Сопоставление с критериями безопасности. За весь период наблюдений пьезометрические уровни не превышали критериальных значений К1 (табл. 2), однако запас распределен по разрезу крайне неравномерно: минимальное значение 3,12 м приурочено к верхнему датчику 56665 скважины ГГ-1 на глубине 13,0 м, второе по критичности – 4,48 м (датчик 56694), тогда как для датчиков основания запас превышает 22 м. Лимитирующей является, таким образом, не зона основания, а верхняя, наименее

консолидированная часть намывного массива, – именно та, на которую непосредственно воздействует наращивание очередного яруса. Отметим, что значения К1 для датчиков 56887 и 56665 превышают отметку гребня действующего яруса на 21,6 и 2,01 м, то есть физически недостижимы: по-видимому, критерии рассчитаны для проектной отметки после завершения наращивания.

Инженерные решения, вытекающие из результатов. Установленные закономерности позволяют сформулировать следующие технические решения по обеспечению безопасности при наращивании ограждающих дамб.

1. *Дифференциация проектных решений по участкам.* Участки, аналогичные разрезу ГГ-2 (73,6% перепада напора у контакта с песками основания), требуют первоочередной проработки организованного дренирования основания, участки, аналогичные разрезу ГГ-1, – контроля состояния слоя кремнегеля и сцементированного фосфогипса.

2. *Развитие схемы размещения контрольно-измерительной аппаратуры.* Для разрешения градиента в контактной зоне необходим дополнительный датчик на отметке кровли четвертичных песков (+106,0 м в разрезе ГГ-2, глубина – 36,5 м). Двух автоматизированных скважин на 28 створов недостаточно для пространственной интерполяции: рекомендуется оборудовать многоточечными системами не менее одного створа на каждом характерном участке дамбы.

3. *Регламент опроса датчиков в период наращивания.* Суточная дискретность опроса достаточна для регистрации процессов, подобных событию февраля 2025 г., но недостаточна для определения начальной фазы генерации избыточного давления. На период отсыпки и намыва яруса рекомендуется повышение частоты опроса до одного раза в 2-4 ч – не только для датчиков верхней зоны (56665, 57229), но и для датчиков средней части массива (56670, 56878).

4. *Пороговые значения системы оповещения.* С учетом фактического минимального запаса 3,12 м целесообразно задать предупредительный порог по датчику 56665 на уровне снижения запаса до 1,5 м с автоматическим уведомлением службы эксплуатации ГТС.

5. *Параметризация расчетных моделей.* Соотношения относительной проницаемости (табл. 3) дают основание для перехода от однородной к слоистой геофильтрационной модели с контрастом коэффициентов фильтрации не менее одного порядка. Поскольку распределение сопротивления изменяется во времени, модель должна перекалибровываться по актуальным

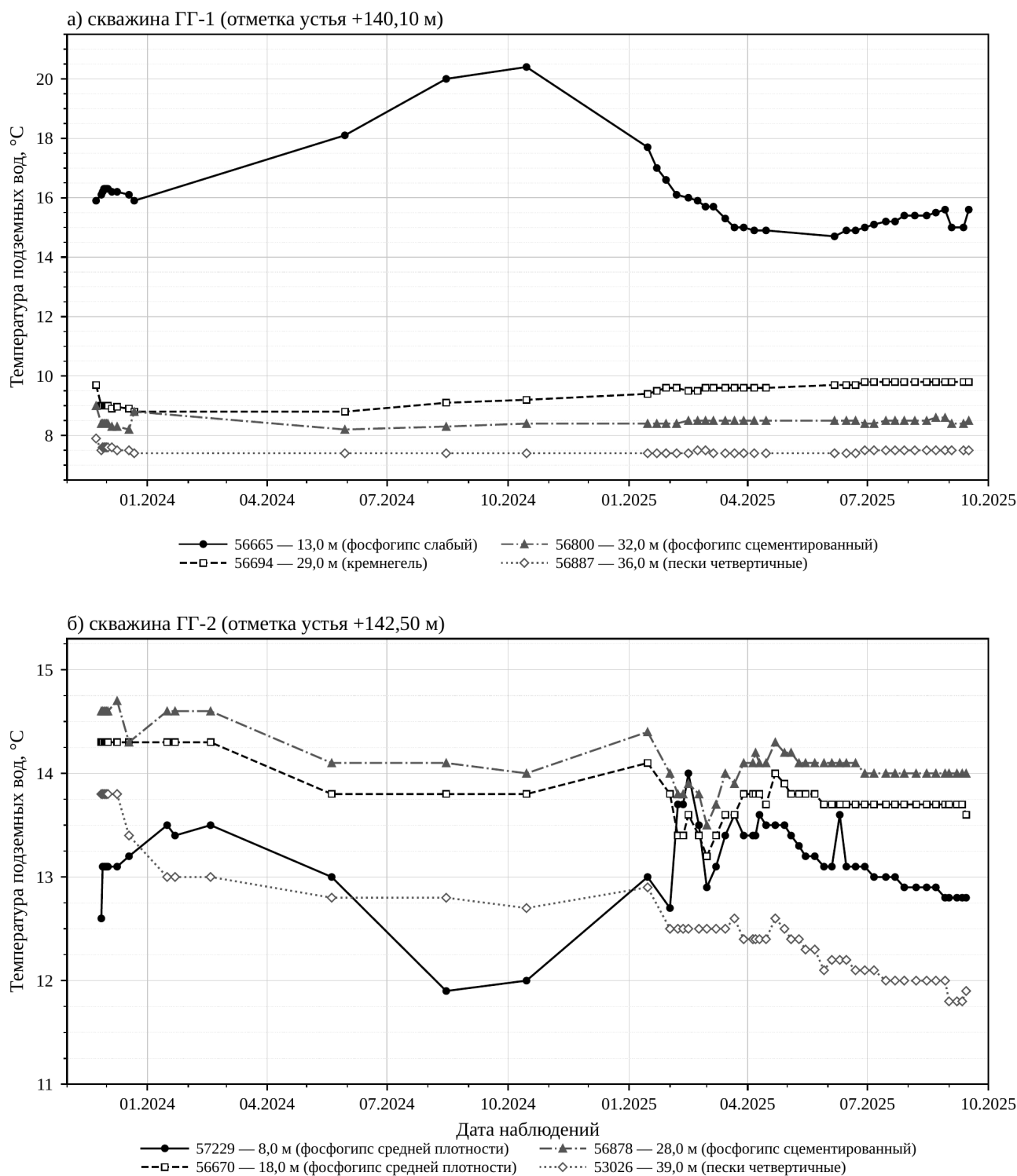


Рис. 3. Динамика температуры подземных вод по датчикам скважин ГГ-1 (а) и ГГ-2 (б) за период XI.2023 г. – IX.2025 г.: по оси абсцисс – дата наблюдений; по оси ординат – температура подземных вод, °C (условные обозначения см. на рисунке 2)

Fig. 3. Time series of groundwater temperature recorded by the sensors of wells GG-1 (a) and GG-2 (b) over the period XI.2023 – IX.2025.

Abscissa – date of observation; ordinate – groundwater temperature, °C; for legend see Fig. 2

данным мониторинга перед проектированием каждого очередного яруса [10].

6. Метрологическое сопровождение.

Направленное снижение уровня по датчику

56800 при слабой реакции соседних требует исключения приборной причины: необходимы контрольный замер в ближайшем пьезометре традиционной сети и внеочередная поверка датчика,

а впредь – регламент ежегодного сопоставления показаний автоматизированных датчиков с ручными замерами.

Ограничения исследований. Наблюдения 2024 г. представлены единичными замерами, что ограничивает точность датировки начала переходного процесса. Оценка фильтрационной неоднородности по (5) справедлива при допущениях одномерности и квазиустановившегося потока; абсолютные значения коэффициентов фильтрации требуют лабораторного определения. Интерпретация температурного поля является качественной, тренд по датчику 56800 требует верификации, а выводы о пространственной неоднородности основаны на данных двух скважин.

Выводы

1. Установлено наличие устойчивого нисходящего фильтрационного потока, охватывающего всю контролируемую толщ техногенных отложений и дренирующегося в водоносный горизонт четвертичных песков основания. Полный перепад напора составляет 20,62 м на участке скважины ГГ-1 и 22,47 м – на участке ГГ-2, что подтверждает прямую гидравлическую связь техногенного и природного водоносных горизонтов и обосновывает рассмотрение системы «Сооружение-основание» как единого объекта при моделировании.

2. Статистическая обработка рядов за ноябрь 2023 г. – сентябрь 2025 г. показала, что режим не является установившимся: наряду с сезонной составляющей (размах – 1,18-2,65 м) выявлены изменения на порядок большей амплитуды: размах – 8,71-9,03 м по датчикам 56800, 56670 и 56878.

3. В скважине ГГ-2 зарегистрирован переходный процесс генерации и диссипации избыточного порового давления: за 39 суток уровни на глубинах 18,0 и 28,0 м выросли на 7,85 и 7,48 м при темпе 0,20 и 0,19 м/сут., после чего рассеялись за 65 сут., тогда как реакция поверхности депрессии составила 1,00 м, а горизонта основания – 0,61 м. Синхронное

понижение температуры на 0,6-0,7°C подтверждает гидравлическую природу события, а продолжительность фазы максимума около трех недель делает его регистрацию ручными замерами месячной дискретности практически случайной.

4. Выполнено количественное разделение фильтрационного сопротивления по слоям и прослежено его изменение во времени: в скважине ГГ-1 за первое полугодие 2025 г. доля перепада напора на интервале 29,0-32,0 м выросла с 26,4 до 52,5%, а на интервале 32,0-36,0 м, включающем прослой торфа, снизилась с 51,0 до 21,6%. Основную водоупорную функцию выполняет комплекс «Кремнегель-цементированный фосфогипс», относительная проницаемость которого в 10,8 раза ниже, чем у вышележащего фосфогипса.

5. В разрезе скважины ГГ-2, где комплекс кремнегеля и торфа не выражен, 73,6% перепада напора сосредоточено у контакта цементованного фосфогипса с четвертичными песками. Различие в положении зоны основного сопротивления между участками не выявляется традиционной сетью одноточечных пьезометров и определяет необходимость дифференциации проектных решений по дренированию основания. Термометрия подтверждает это независимо: температура вод основания составляет 7,48°C в скважине ГГ-1 против 12,56°C в ГГ-2 при фоновом значении около 7,5°C.

6. Пьезометрические уровни за весь период не превышали значений К1, причем минимальный запас 3,12 м приурочен не к основанию, а к верхней неконсолидированной части намывного массива, которая и является лимитирующей зоной при наращивании. Результаты позволили обосновать конкретные инженерные решения: дополнительный датчик на кровле четвертичных песков в разрезе ГГ-2; повышение дискретности опроса датчиков верхней и средней зон до одного раза в 2-4 ч на период намыва яруса; предупредительный порог оповещения по датчику 56665 при снижении запаса до 1,5 м.

Список использованных источников

1. Гаппаров Ф.А., Нарзиев Ж.Ж., Ирмахамедова Л.Х. Результаты исследований процесса фильтрации в теле грунтовой плотины и ее химическое влияние на пьезометры // Молодой ученый. 2018. № 21 (207). С. 34-38
2. Абакумова О.А., Любаненко А.В. Международные стандарты экологического менеджмента как инструмент правового регулирования бизнеса // Вестник Тюменского государственного университета. 2021. Т. 7, № 1 (25). С. 147-167
3. Лобач А.А., Блинов И.Ф., Магрук В.И., Родионов В.Б. Компьютеризация надзора за состоянием сооружений

References

1. Gapparov F.A., Narzиеv Zh.Zh., Irmukhamedova L.Kh. Results of studies of the filtration process in the body of an earth dam and its chemical effect on piezometers // Young Scientist. 2018; (21(207)): 34-38.
2. Abakumova O.A., Lyubanenko A.V. International standards of environmental management as an instrument of legal regulation of business // Bulletin of Tyumen State University. 2021; 7(1(25)): 147-167.
3. Lobach A.A., Blinov I.F., Magruk V.I., Rodionov V.B. Computerization of supervision over the condition of structures

Загорской ГАЭС // Гидротехническое строительство. 1996. № 4. С. 41-44

4. Малышев А.С., Пашали А.А., Здолник С.Е., Волков М.Г. Удаленный мониторинг механизированного фонда скважин в ОАО «НК «Роснефть» // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2009. № 1. С. 23-28

5. Иваненко Ю.Г., Бакштанин А.М., Ткачев А.А., Иваненко Д.Ю. Специальные задачи гидравлики рек и каналов. Москва: Редакция журнала «Механизация и электрификация сельского хозяйства», 2020. 220 с.

6. Ткачев А.А., Клименко В.В., Родионенко А.В. Анализ применения берегоукрепительных конструкций // Мелиорация и водное хозяйство: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Новочеркасск, 24 октября 2019 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2019. Вып. 17. Ч. 1. С. 221-225

7. Piciullo L., Storøsten E.B., Liu Z., Nadim F., Lacasse S. A new look at the statistics of tailings dam failures // Engineering Geology. 2022. Vol. 303. Article 106657

8. Delgado B., Da Fonseca A., Bittar R., Castilho B., Coelho D. Geomechanical behaviour of an iron ore tailings under high-stress levels for disposal by dry stacking. 2023.

9. Kharaghani S. Seepage investigation of embankment dams using numerical modelling of temperature field // Indian Journal of Science and Technology. 2013.

10. Chen Y. et al. Coupled hydro-mechanical modeling of tailings storage facilities aided by continuous field monitoring data // Engineering Geology. 2025. Vol. 320. Article 107050

Информация об авторах

Александр Александрович Ткачев, д-р техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>; prof_al@mail.ru;

Александра Ивановна Мокотова, магистрант; ainekludova@yandex.ru;

Екатерина Александровна Волкова, старший преподаватель; <https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>; 7katerina7tomashevich7@mail.ru;

Михаил Сергеевич Медведев, аспирант; arsgorobez@mail.ru

Вклад авторов

А.А. Ткачев – концепция и методика исследования, интерпретация результатов, научное редактирование текста.

А.И. Мокотова – сбор и первичная обработка данных мониторинга, подготовка таблиц. Е.А. Волкова – обзор литературы, расчёт градиентов и относительной проницаемости, графические материалы, перевод на английский язык

. М.С. Медведев – обработка временных рядов, расчёт порового давления и запасов до критериев безопасности, раздел с инженерными решениями.

Conflict of interest / Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию / Received 01.04.2026

Поступила после рецензирования / Received 14.08.2026

Принята к публикации / Accepted 07.09.2026

of the Zagorsk pumped storage power plant // Hydrotechnical Construction. 1996; (4): 41-44.

4. Malyshev A.S., Pashali A.A., Zdolnik S.E., Volkov M.G. Remote monitoring of the mechanized well stock in OJSC NK Rosneft // Scientific and Technical Bulletin of OJSC NK Rosneft. 2009; (1): 23-28.

5. Ivanenko Yu.G., Bakshtanin A.M., Tkachev A.A., Ivanenko D.Yu. Special problems of hydraulics of rivers and canals. Moscow: Editorial Board of the Journal "Mechanization and Electrification of Agriculture"; 2020. 220 p. ISBN 978-5-6042796-1-8.

6. Tkachev A.A., Klimenko V.V., Rodionenko A.V. Analysis of the application of bank protection structures // Land Reclamation and Water Management: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Novocherkassk, October 24, 2019. Vol. 17, part 1. Novocherkassk: ООО "Лик"; 2019. P. 221-225.

7. Piciullo L., Storøsten E.B., Liu Z., Nadim F., Lacasse S. A new look at the statistics of tailings dam failures. Engineering Geology. 2022; 303: 106657.

8. Delgado B., Da Fonseca A., Bittar R., Castilho B., Coelho D. Geomechanical behaviour of an iron ore tailings under high-stress levels for disposal by dry stacking. 2023.

9. Kharaghani S. Seepage investigation of embankment dams using numerical modelling of temperature field. Indian Journal of Science and Technology. 2013.

10. Chen Y. et al. Coupled hydro-mechanical modeling of tailings storage facilities aided by continuous field monitoring data. Engineering Geology. 2025; 320: 107050.

Information about the authors

Alexander A. Tkachev, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>, prof_al@mail.ru

Alexandra I. Mokotova, Master's Student, ainekludova@yandex.ru

Ekaterina A. Volkova, Senior Lecturer, <https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>, 7katerina7tomashevich7@mail.ru

Mikhail S. Medvedev, Postgraduate Student, arsgorobez@mail.ru

About the authors

A.A. Tkachev – research concept and methodology, interpretation of the results, scientific editing.

A.I. Mokotova – collection and primary processing of the monitoring data, preparation of the tables.

E.A. Volkova – literature review, calculation of gradients and relative permeability, graphic materials, translation into English.

M.S. Medvedev – processing of the time series, calculation of pore pressure and safety-criteria reserves, section on engineering solutions.

Оригинальная статья

УДК 626.01: 628.11:004.89

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-86-96>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ОЦЕНКЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ВОДОЗАБОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А.А. Кадысева^{1✉}, С.В. Максимова²¹ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»; г. Москва, Российская Федерация²ФГБОУ ВО «Тюменский промышленный университет»; г. Тюмень, Российская Федерация¹kadyseva@mai.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684²maksimovasv@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-51411120

Аннотация. Одним из перспективных направлений является использование искусственного интеллекта при разработке и оценке проектных решений в сфере строительства, в том числе в гидротехническом строительстве. В статье продемонстрировано применение искусственного интеллекта при решении проектных задач в сфере водозаборных комплексов. Для этого были разработаны специализированные промпты для ряда моделей искусственного интеллекта на основе кейсов, представляющих собой типичные задачи для инженера, специализирующегося на проектировании водозаборных комплексов. Анализ полученных ответов позволил выявить сильные и слабые стороны применения искусственного интеллекта в области проектирования водозаборных сооружений. Выявлены ключевые ограничения генеративных моделей искусственного интеллекта в инженерном проектировании: нестабильность качества ответов; отсутствие методологической прозрачности; игнорирование условий промпта. Применение искусственного интеллекта требует многоэтапного экспертного контроля. При этом искусственный интеллект может выступать вспомогательным инструментом для поиска нормативных документов, генерации предварительных решений. Искусственный интеллект повышает эффективность работы инженера, но не заменяет его; без экспертного сопровождения использование моделей искусственного интеллекта вызывает высокие риски ошибок.

Ключевые слова: гидротехническое строительство, водозаборные комплексы, искусственный интеллект, запрос, проектные решения, насосная станция, промпт-инжиниринг

Формат цитирования: Кадысева А.А., Максимова С.В. Использование искусственного интеллекта при разработке и оценке проектных решений водозаборных комплексов. Природообустройство. 2026;Т.19(4):86-96. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-86-96>

Original article

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DEVELOPMENT AND ASSESSMENT OF DESIGN SOLUTIONS FOR WATER INTAKE COMPLEXES

А.А. Kadyseva^{1✉}, S.V. Maksimova²¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting”, Moscow, Russian Federation²Industrial University of Tyumen, Volodarskogo, 38, Tyumen, 625000, Russia¹kadyseva@mai.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684²maksimovasv@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-51411120

Abstract. One promising area is the use of artificial intelligence in the development and assessment of design solutions in construction, including hydraulic engineering. The article demonstrates the application of artificial intelligence in solving design problems in the field of water intake complexes. To this end, specialized prompts were developed for a number of artificial intelligence models based on case studies representing typical tasks for an engineer specializing in the design of water intake systems. An analysis of the responses received allowed us to identify the strengths and weaknesses of using artificial intelligence in the design of water intake structures. Key limitations of generative models of artificial intelligence in engineering design have been identified: instability of response quality; lack of methodological transparency; ignoring prompt conditions. The use of artificial intelligence requires multi-stage expert review. At the same time, artificial intelligence can serve as an auxiliary tool for searching regulatory

documents and generating preliminary decisions. Artificial intelligence improves engineers' efficiency, but it does not replace them; without expert guidance, the use of AI models carries a high risk of errors.

Keywords: hydraulic engineering, water intake complexes, artificial intelligence, prompt, design solutions, pumping station, prompt-engineering

For citation: Kadyseva A.A., Maksimova S.V. The use of artificial intelligence in the development and assessment of design solutions for water intake complexes. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(4):86-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-86-96>

Введение. Несмотря на относительно недавнее начало активного применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в России, текущая динамика их распространения характеризуется стремительным охватом широкого спектра отраслей компаний [1]. Процесс внедрения вышел за рамки экспериментальных пилотных проектов в отдельных высокотехнологичных секторах и приобретает массовый характер, становясь элементом стратегического развития для компаний различных масштабов.

Данная тенденция подтверждается растущей популярностью ИИ на уровне индивидуального потребления и профессиональной деятельности. Наблюдается устойчивый рост частоты обращения пользователей к системам на основе ИИ для решения разнообразных задач – от оптимизации повседневных бытовых процессов до сложных аналитических и креативных задач в профессиональной среде [2]. Этот феномен свидетельствует не только о повышении доступности технологий, но и о формировании новой цифровой культуры взаимодействия с интеллектуальными системами.

Согласно ряду исследований, ИИ выступает в роли мощного катализатора парадигмальных изменений в профессиональных сферах, трансформируя сами принципы организации труда, методологию принятия решений и требования к компетенциям специалистов [3]. Он инициирует переход от традиционных, зачастую линейных, процессов к адаптивным, data-driven моделям работы, где прогнозная аналитика и интеллектуальная оптимизация становятся основой для стратегического планирования и операционной деятельности.

Ключевые преимущества внедрения ИИ в инженерно-техническую деятельность связаны с существенным повышением операционной эффективности за счет автоматизации рутинных операций, ускорения проектных процессов и оптимизации затрат. Одновременно с этим отмечается значительное улучшение качества результатов работы благодаря возможностям точного анализа больших данных, комплексному учету множества параметров и раннему выявлению

потенциальных проблем [4]. Способность ИИ-систем к постоянному обучению и развитию трансформирует их функциональные возможности и области применения. В этой связи инженерное мышление должно быть ориентировано на опережающее прогнозирование подобных изменений и создание адаптивных решений, соответствующих будущим реалиям технологического развития [5]. Влияние ИИ носит всеобъемлющий характер, преобразуя ключевые сферы общественной жизни, включая экономику, образование и профессиональные практики [5].

На основе анализа актуальных исследований и технологических разработок можно выделить следующие перспективные направления применения ИИ в инженерной сфере: машинное обучение (ML), глубокое обучение (DL), компьютерное зрение (CV), роботизированные системы для инспекции и мониторинга, а также генеративный ИИ для оптимизации и поиска проектных решений [6, 7].

Однако распространение ИИ в инженерной практике сталкивается с рядом существенных барьеров. Одним из ключевых вызовов является сложность формирования качественных, репрезентативных и стандартизированных наборов данных (датасетов), необходимых для эффективного обучения моделей [8]. Кроме того, любой результат, полученный с помощью нейросетевой модели, требует обязательной независимой верификации и экспертной проверки квалифицированными специалистами. Необходимость такого контроля обусловлена рядом факторов: потенциальными ошибками в формулировке входного запроса, ограничениями, заложенными в этапе предварительного обучения модели, или недостаточным объемом и разнообразием обучающих данных [3].

В контексте глобальной цифровой трансформации инженерной отрасли искусственный интеллект (ИИ) становится инструментом, позволяющим помочь с расчетами, оптимизацией ресурсов и увеличению надежности сложных инфраструктурных систем [9].

Водозаборные комплексы (ВЗК), выполняющие функции забора, очистки и подачи воды,

представляют собой сложные технологические системы, проектирование которых требует междисциплинарного подхода с участием гидрологов, геологов, экологов, экономистов и социологов.

В статье ставится цель исследовать, насколько современные приложения искусственного интеллекта способны принимать инженерные решения, а также обосновать, в какой мере можно полагаться на их результаты при отсутствии у пользователя специализированных профессиональных компетенций.

Материалы и методы. Для реализации целей исследования был использован комплексный методологический подход, объединяющий теоретический анализ, систематизацию полученных данных и сравнительный анализ результатов.

ИИ был использован для решения двух кейсов из области проектирования элементов водозаборного комплекса. Запросы (промпты) были созданы для следующих публично доступных версий сервисов: *Алиса AI, Giga chat, Deep-Seek, Perplexity AI*, которые относятся к большим языковым моделям (LLM, Large Language Model) (дата обращения 14.01.2026). Под запросом (prompt) понимается инструкция или вопрос к ИИ, входные данные, по которым будет происходить генерация ответа. Запрос может представлять собой сложную инструкцию с тренировочными наборами данных (training dataset). Для взаимодействия с ИИ важно формировать навык формулирования запросов – промпт-инжиниринг [10].

Промпты строились по единому шаблону из пяти блоков: назначение роли (инженер-проектировщик гидротехнических сооружений); исходные данные кейса в форме, приближенной к проектной и изыскательской документации; перечень нумерованных подзадач; требование опираться на действующие нормативные документы Российской Федерации; требование к форме представления результата. Для всех четырех сервисов формулировки были идентичными, что обеспечивает сопоставимость оценок. Ответы фиксировались путём экспорта или копирования текста и хранятся в архиве авторов.

Итоговым формулировкам предшествовала пилотная серия, в которой для каждого кейса проверялись четыре типа промптов: минимальный вариант (без роли, нормативных требований и формы ответа); нормативно-ориентированный (с указанием роли, исходных данных и требованием нормативного обоснования); пошаговый (с явной последовательностью инженерных действий); диалоговый (каждая подзадача

оформлялась отдельным сообщением с контрольными вопросами к модели).

Краткие формулировки дали наибольший разброс структуры ответов: часть сервисов ограничивалась общими рекомендациями без расчётов и нормативных ссылок, что делало оценку невозможной. Пошаговые и диалоговые запросы повышали полноту, но одновременно подсказывали модели последовательность действий и требовали от пользователя способности распознать ошибку в промежуточном ответе, что противоречит цели исследования. В итоге был принят нормативно-ориентированный промпт единой структуры: он воспроизводит типовое производственное задание, не содержит методических подсказок и обеспечивает одинаковые условия для всех моделей ИИ.

Результаты и обсуждение. Кейс № 1 посвящен проектированию сооружения для забора воды из реки с ярко выраженным весенним половодьем и пониженным стоком в остальные сезоны и включает в себя следующие исходные данные. Источником хозяйственно-питьевого водоснабжения населенного пункта является река с ярко выраженным весенним половодьем, пониженным стоком в остальной период, не пересыхающая и не перемерзающая по всей ширине. Ледовый режим: замерзание в начале ноября, вскрытие в двадцатых числах апреля; местами возможное промерзание русла до дна в отдельные годы. Колебания уровней: абсолютный максимум +1164 см, абсолютный минимум –152 см (амплитуда 13,16 м → большой диапазон уровней). Питание: преимущественно талые воды (>90%), подземное питание незначительно, но достаточно для постоянного стока. Берег: пологий. Годовой объем забора воды: 3504 тыс. м³/год.

В соответствии с нормативными документами необходимо:

1. Определить категорию надежности водозаборного сооружения.
2. Предложить оптимальный тип водозаборного сооружения, подходящего для данных условий; описать конструктивные особенности; указать преимущества применительно к заданным условиям; обозначить потенциальные недостатки и риски.
3. Рассчитать необходимые параметры водозаборного сооружения.

В рамках настоящего исследования анализируется кейс, базирующийся на реальном объекте водопроводной инфраструктуры – водозаборном сооружении, расположенном в городе Ишиме (Тюменская область). Данный объект заслуживает внимания ввиду

длительной (на протяжении нескольких десятилетий) успешной эксплуатации нестандартного инженерного решения, адаптированного к специфическим гидрологическим условиям.

Особенность рассматриваемого водозабора сооружения заключается в необходимости эффективного преодоления значительной разницы уровней воды в источнике водоснабжения. В подобных гидрологических условиях традиционные технические решения зачастую демонстрируют недостаточную функциональность и экономическую целесообразность. Это обстоятельство послужило стимулом для разработки и внедрения альтернативной схемы водозабора, отвечающей как эксплуатационным, так и финансово-экономическим требованиям.

В результате проведения технико-экономического анализа оптимальным вариантом было признано использование понтонного водозабора на базе плавучей насосной станции «Иртыш Комфорт» [11]. Практическое применение данного решения позволило реализовать ряд важных эксплуатационных преимуществ. В частности, система продемонстрировала

высокую адаптивность к сезонным колебаниям уровня воды, обеспечила снижение капитальных затрат на строительство стационарных сооружений, упростила процедуры эксплуатационного обслуживания и предоставила возможность оперативного перемещения водоприёмных устройств в зависимости от текущей гидрологической ситуации.

На основании анализа кейса водозабора сооружения была сформулирована задача по оценке потенциала современных систем искусственного интеллекта в области решения инженерно-технических задач.

Результаты оценки по каждому заданию и каждой модели сведены в таблицу 1. В ней представлены: ответы на части задания с качественной и количественной (по 10-балльной шкале) их оценками. Такой подход позволил не только количественно измерить способности ИИ к работе с технической документацией, но и качественно проанализировать сильные и слабые стороны каждой модели в контексте инженерных задач. В строке таблицы «Оценка» в скобках указан номер части задания (см. табл. 1).

Таблица 1. Оценка результатов выполнения кейса № 1

Table 1. Assessment of the results of case No. 1

Модель ИИ	Ответы на части задания / Оценка по 10-балльной шкале	Комментарий
Алиса AI	1. Согласно СП 31.13330.2021, насосные станции первого подъема для населенных пунктов с населением более 50 000 человек относятся к I категории.	Категория определена верно.
	2. Тип водозабора – ковшовое русловое сооружение с самопромываемым входом. Плюсы: работает при сильных перепадах уровня воды, самоочищается в половодье, адаптировано к шуге. Минусы: требует обслуживания, уязвимо при экстремальных ледовых явлениях, нужно защищать от промерзания.	Верно, но в данном решении не приведено экономическое обоснование.
	3. Расчёты включают: пересчет годового расхода (3504 тыс. м ³ /год) в суточный/часовой; расчёт площади водоприёмных окон и диаметра труб (скорость воды $\geq 0,7$ м/с); учёт шуголедовых рисков; проверку уровней воды (97% для максимальных, 1% для минимальных). Нужны дополнительные данные: гидрография реки, статистика шуги, сведения о грунтах и требования к качеству воды.	Даны рекомендации по расчету, отсутствуют сами расчеты или ссылки на рекомендованную литературу для расчета.
	Оценка: (1) 10 баллов + (2) 5 баллов + (3) 3 балла = 18 баллов	
Гига чат	1. Категория надежности: Водозабор предназначен для хозяйственно-питьевого водоснабжения, следовательно, категория надежности должна быть I категории согласно СП 31.13330 («Водоснабжение»).	Категория определена верно. Но само обоснование неверное. Категория зависит от числа жителей в населенном пункте.
	2. Оптимальное решение – береговой колодец-шахта с каптажем и оголовком. Вода поступает самотёком, оснащена фильтром и защитой от повреждений. Достоинства: круглогодичный забор, экономичность, простота обслуживания. Недостатки: необходимость профилактики фильтров, риск замерзания зимой.	Береговой водозабор для данных условий нерационален.
	3. Выполнен только расчет подачи насосного оборудования.	Неверно, расчеты не соответствуют расчету водозаборного сооружения.
	Оценка: (1) 5 баллов + (2) 0 баллов + (3) 0 баллов = 8 баллов	

Модель ИИ	Ответы на части задания / Оценка по 10-балльной шкале	Комментарий
DeepSeek	1. Водозабор предназначен для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Согласно СП 31.13330, системы водоснабжения населенных пунктов должны относиться к I категории надежности. Это требует обеспечения бесперебойной подачи воды в любых условиях, включая периоды экстремально низких уровней и ледовой обстановки.	Категория определена верно. Но само обоснование неверное. Категория зависит от числа жителей в населенном пункте.
	2. Подрусловой (инфильтрационный) водозабор горизонтального типа (лучевой водозабор) или комбинированный вариант с береговым водоприемным колодцем и самотечными линиями, заложенными в русловых отложениях. Система водозабора состоит из берегового водоприёмного колодца, самотёчных дрен и резервных скважин на пойме/террасе. Колодец размещён на берегу вне зоны льда и быстрого течения; дрены забирают инфильтрационный поток через русловые отложения; скважины обеспечивают резерв в маловодный период. Основные преимущества: устойчивость к колебаниям уровня воды за счёт забора из подруслового потока; защита от ледовых воздействий (дрены ниже зоны промерзания); предварительная фильтрация воды через грунт; стабильность подачи в маловодный период; высокая надёжность (ремонт лучей без остановки водозабора). Ключевые недостатки: высокая стоимость строительства; сложность ремонта дрен; зависимость от наличия фильтрующих русловых отложений; риск загрязнения подруслового потока при загрязнении реки. Альтернативные типы водозаборов не подходят: береговой – из-за пологого берега и большой амплитуды уровней; русловой – из-за уязвимости к льду и необходимости сложных конструкций; отдельные скважины на пойме – из-за недостаточного дебита и падения производительности в межень.	Частично верный, дано описание конструкции, приведены недостатки других конструкций.
	3. Выполнено определение расчетных расходов. Для обеспечения часового расхода требуется ≈ 520 п. м дрен при удельном дебите $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ на метр. Планируется 6 лучей (5 рабочих, 1 резервный) длиной по 110 м. Береговой колодец диаметром 6,0 м; глубина – ниже отметки промерзания, нижняя отметка на 4-6 м ниже минимального уровня реки для безнапорного поступления воды. Резервные скважины: общая производительность – $234 \text{ м}^3/\text{ч}$ (30% от расчётного расхода). При дебите одной скважины $30\text{-}40 \text{ м}^3/\text{ч}$ необходимо 6-8 скважин на речной террасе.	Даны краткие данные. Нет ссылок на методику расчета.
Оценка: (1) 5 баллов + (2) 7 баллов + (3) 5 баллов = 17 баллов		
Perplexity AI	1. Для хозяйственно-питьевого водоснабжения из поверхностного источника с годовым объемом 3504 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ (суточный расход $\sim 9,6$ тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, или $\sim 0,11 \text{ м}^3/\text{с}$) водозабор относится к I категории надежности по СП 31.13330, так как это питьевое снабжение и объем соответствует системам для населенных пунктов свыше 50 тыс. человек	Категория определена верно.
	2. Бездонный береговой колодец оптимален для пологого берега, амплитуды уровней 13,16 м и половодья. Железобетонная конструкция без дна (глубина 10-15 м ниже мин. уровня –152 см), 2-3 отсека с перемычками, решетки (ячейка 20-30 мм), донные воронки, подвижные насосы. Преимущества: стабильный забор в межень за счет подземного притока (не перемерзает), защита от половодья/льда, низкие эксплуатационные затраты. Недостатки: засорение наносами, локальное промерзание, вибрация насосов.	Ответ неверный.
	3. Выполнено определение расчетных расходов. Глубина колодца: 12-15 м ниже мин. уровня (–152 см от условного нуля). Площадь сечения: $\sim 100\text{-}200 \text{ м}^2$ (для скорости $< 0,3 \text{ м/с}$ при $Q=0,9 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина 10-15 м). Отметки: низ воды при 97% обеспеченности (+5-10 см над мин.), верха при 1% обеспеченности (пол +1 м над макс. 1164 см).	Присутствуют расчеты очень поверхностные, даны ссылки на сайты со шпаргалками для студентов
Оценка: (1) 10 баллов + (2) 0 баллов + (3) 2 балла = 12 баллов		

В представленном сравнительном анализе моделей искусственного интеллекта по задаче проектирования водозаборного сооружения оценены три ключевых аспекта: определение категории надежности, выбор типа сооружения и расчет параметров. Все модели ИИ корректно определили I категорию надежности в соответствии с СП 31.13330, что обусловлено назначением для хозяйственно-питьевого водоснабжения и объемом забора 3504 тыс. м³/год, эквивалентным системам для населенных пунктов свыше 50 тыс. человек.

Существенные различия проявились при анализе второго критерия – выбора и обоснования типа водозаборного сооружения. Модель *DeepSeek* предложила подрусовой (лучевой) водозабор с береговым колодцем и дренами, представив развёрнутое обоснование его преимуществ: устойчивость к колебаниям уровня воды (свыше 13 м), защита от ледовых воздействий, предварительная фильтрация через грунт, возможность ремонта без остановки водозабора. Кроме того, модель аргументированно отвергла альтернативные варианты (береговой, русловой, пойменные скважины), указав на их недостатки в заданных условиях. По данному критерию *DeepSeek* получила 7 баллов, уступив другим моделям лишь из-за недостаточной проработки экономического сравнения вариантов.

Модель *Алиса AI* предложила ковшовый русловой водозабор с самопромывающимся входом, учтя работу при перепадах уровня и шуге, однако не привела экономического обоснования и не раскрыла риски при экстремальных ледовых явлениях, что снизило оценку до 5 баллов. Модели *Giga chat* и *Perplexity AI* рекомендовали технически нерациональные решения (береговой колодец-шахта и бездонный береговой колодец соответственно), не соответствующие условиям пологого берега и амплитуды уровней более 13 м; обе получили по 0 баллов за данный блок.

В расчётной части (*третий критерий*) *DeepSeek* продемонстрировала наиболее полные и логически связанные результаты: приведены годовой, суточный и часовой расходы с учётом коэффициентов неравномерности, рассчитаны длина дрен (520 п. м) и количество лучей (6), указаны диаметр (6 м) и глубина заложения колодца, а также параметры резервных скважин. Тем не менее, отсутствие ссылок на нормативные методики расчётов ограничило оценку 5 баллами. *Алиса AI* перечислила необходимые расчёты, но не выполнила их, получив 3 балла. *Perplexity AI* представила поверхностные вычисления с сомнительными источниками («шпаргалки для

студентов»), заработав 2 балла. *Giga chat* допустил ошибки в учёте коэффициентов и не связал расчёты с конструкцией, получив 0 баллов.

На основании проведённого анализа можно заключить, что среди исследованных моделей *DeepSeek* наиболее пригодна для предварительной проработки проектных решений в области водозаборных сооружений, однако требует обязательной верификации расчётов по нормативным методикам. *Алиса AI* может использоваться для проверки соответствия базовым требованиям СП 31.13330, но нуждается в контроле инженерных предложений. Модели *Giga chat* и *Perplexity AI* в текущем виде не обеспечивают достаточного уровня достоверности для применения в критически важных инженерно-технических задачах. Для повышения надёжности результатов рекомендуется комбинировать ответы нескольких моделей с последующей экспертной оценкой и использованием специализированного расчётного программного обеспечения.

В кейсе № 2, представляющем собой задание для проверки решений, принятых при проектировании водозаборного комплекса, подающего воду в систему водоснабжения населенного пункта, в котором проживает 63 тысячи человек, подобран один рабочий насос марки 1Д500-636 с частотой вращения 1450 об/мин. Один резервный насосный агрегат той же марки установлен в машинном зале и еще один хранится на складе. Требуемые значения: подача 882 м³/час, напор 25 метров.

Необходимо в соответствии с нормативными и справочными документами:

1. Определить категорию насосной станции первого подъема по степени обеспеченности подачи воды;

2. Проверить правильность подбора марки насоса по подаче и напору.

3. Проверить правильность назначения количества рабочих и резервных насосных агрегатов.

Для оценки способностей моделей ИИ к анализу текстовой составляющей проектной документации в исходные данные было заложено несколько ошибок. Неверно подобрана марка насоса, который при подаче в оптимальной режимной точке 400 м³/час не может обеспечить требуемое значение подачи. Подобран всего один рабочий насос для насосной станции первой категории по степени обеспеченности подачи воды, хотя в примечании 2 к таблице 24 СП 31.13330.21 указано, что количество рабочих агрегатов одной группы для такой должно быть не менее двух [12]. Назначено неверное количество резервных насосов: вариант с одним

агрегатом в машинном зале и одним агрегатом на складе допускается для насосных станций второй категории, на которых установлено более 6 рабочих агрегатов одной группы. Оценка каждой части задания проводилась по 10-балльной шкале. В строке таблицы «Оценка» в скобках указан номер части задания (табл. 2).

Практически верно на все вопросы кейса № 2 модель ИИ «Perplexity AI» ответила верно, не справившись только с обоснованием вывода по выбранной марке насоса. Остальные исследуемые модели ИИ ошиблись при ответе на вопрос по достаточности количества резервных насосных агрегатов, нормативные требования по которому приведены в таблице 24 СП 31.13330.2021 и зависят от двух факторов: количества рабочих агрегатов одной группы и категории по степени обеспеченности подачи воды [12].

Только модель ИИ «DeepSeek» предложила помощь в подборе насосного оборудования, которое удовлетворяло бы требованиям по ключевым параметрам: подаче и напору. Было предложено три варианта подбора насосов.

В первом варианте ИИ предложил: использовать два насоса 1Д500-636, установив их параллельно; для выхода на требуемые параметры (882 м³/ч при 25 м) потребуется регулирование работы насоса: дросселирование или установка частотного преобразователя для снижения скорости вращения. Анализируя только значения подачи и напора, указанные в таблице каталога насосов двустороннего входа, ИИ «DeepSeek» предположил, что суммарная подача в этом варианте составит около 800 м³/ч, а также при совместной работе напор в системе повысится, и каждый насос будет работать с подачей меньше

Таблица 2. Оценка результатов выполнения кейса № 2

Table 2. Assessment of the results of case No. 2

Модель ИИ	Ответы на части задания / Оценка по 10-балльной шкале	Комментарий
Алиса AI	1. Согласно СП 31.13330.2021, насосные станции первого подъема для населенных пунктов с населением более 50 000 человек относятся к I категории.	Категория определена верно.
	2. Подобранный насос не соответствует требуемым параметрам, так как: подача существенно ниже требуемой (270 < 882); напор также недостаточен (20 < 25). Вывод: заменить насос 1Д500-636 на модель с подходящими параметрами подачи и напора.	В целом, вывод верный, но сравниваемые подача 270 м³/ч и напор 20 м соответствуют частоте вращения 980 об/мин, а не 1450 об/мин.
	3. В насосных станциях I категории при количестве рабочих агрегатов до 6 штук требуется 2 резервных агрегата. В данном случае есть только один резервный насос в машинном зале, а ещё один хранится на складе, что не соответствует нормативу. Таким образом, количество насосных агрегатов подобрано неправильно. Для соответствия требованиям необходимо: увеличить количество рабочих насосов до двух; добавить ещё один резервный насос, чтобы их общее количество составило два.	Ответ верный.
	Оценка: (1) 10 баллов + (2) 5 баллов + (3) 10 баллов = 25 баллов	
Гига чат	1. По СП 31.13330.2021 пункт 5.1.1 установлено следующее правило категоризации насосных станций по числу жителей: насосные станции, обслуживающие населённые пункты с численностью населения свыше 50 000 человек, относятся к I категории надёжности. Насосная станция относится к I категории надёжности электроснабжения.	Пункта 5.1.1 в СП 31.13330.2021 не существует. Категоризация систем водоснабжения устанавливается в п. 7.4. Между категорией электроснабжения и категорией по степени обеспеченности подачи воды связь существует, но то разные понятия.
	2. Возможно изменение частоты вращения либо подбор иного насоса с большей производительностью. Однако исходя из задания, предлагается рассмотреть проблему при неизменной частоте вращения. Вывод: Подбор марки насоса неверен.	Оценка правильности выбора насоса проведена верно.
	3. Минимальное требование гласит, что необходимо два рабочих насоса и один резервный. Следовательно, действующий вариант конфигурации соответствует минимальным нормам, однако рекомендовано наличие ещё одного рабочего насоса для увеличения надежности системы.	Вывод по количеству рабочих насосов верный. Вывод по количеству резервных насосов неверный.
	Оценка: (1) 3 балла + (2) 10 баллов + (3) 5 баллов = 18 баллов	

Модель ИИ	Ответы на части задания / Оценка по 10-балльной шкале	Комментарий
DeepSeek	1. Насосная станция относится к I категории.	Категория определена верно.
	2. Один насос обеспечивает 500 м ³ /ч, что недостаточно для требуемых 882 м ³ /ч. Насос создает напор 44 м, что существенно выше требуемых 25 м. Это может привести к избыточному давлению в сети и необходимости установки регуляторов давления или дросселирования. Вывод: насос подобран неправильно. Необходимо использовать не менее двух насосов параллельно или подобрать другую марку насоса с характеристиками, близкими к требуемым.	Оценка правильности выбора насоса проведена верно.
	3. Количество насосов нарушает нормы: требуется как минимум 2 рабочих + 1 резервный в машинном зале.	Вывод по количеству рабочих насосов верный. Вывод по количеству резервных насосов неверный.
	4. Предложено три варианта подбора насосов (см. ниже).	Один вариант подбора верный.
	Оценка: (1) 10 баллов + (2) 10 баллов + (3) 5 баллов + (4) 5 баллов = 30 баллов	
Perplexity AI	1. Население 63 тыс. → объединённый хоз-питьевой водопровод относится к I категории по степени обеспеченности подачи воды (более 50 тыс. жителей).	Категория определена верно.
	2. Насос 1Д500-63б в каталоге имеет номинальную подачу около 500 м ³ /ч при напоре порядка 63 м, то есть в оптимальной точке он сильно «переподнимает» напор и не дотягивает по требуемой подаче 882 м ³ /ч, даже если работать одному насосу. Следовательно, марка по Q и H подобрана неверно.	Неверное обоснование, так как варианту обточки рабочего колеса «б» в каталоге соответствуют параметры: подача 400 м ³ /ч при напоре 44 м.
	3. Для станции I категории по СП 31.13330.2021 число рабочих агрегатов одной группы должно быть не менее двух; вариант «1 рабочий + 1 в машинном зале + 1 на складе» допускается для II категории при числе рабочих агрегатов более 6, поэтому и по количеству рабочих, и по резервным насосам схема неправильна.	Вывод по количеству рабочих и резервных насосов верный.
	Оценка: (1) 10 баллов + (2) 5 баллов + (3) 10 баллов = 25 баллов	

своей номинальной, что приведет к увеличению индивидуального напора выше 44 м. Построение графика совместной работы и определение параметров рабочей точки при параллельной работе двух насосов 1Д500-63б на систему трубопроводов дает другой результат: подача 1140 м³/ч при напоре 35 м. За попытку предложить варианты подбора оборудования, некоторые из которых оказались верными, можно добавить к итоговой оценке еще 5 баллов.

Кейс № 3 представляет собой типичную задачу по проектированию насосной станции первого подъема. На подготовительном этапе был разработан шаблон расчета, по сути являющийся тренировочным набором данных (training dataset). Объект проектирования – насосная станция первого подъема городской системы водоснабжения, относящейся к первой категории по степени обеспеченности подачи воды. Насосная станция забирает воду из всасывающего отделения берегового колодца и подает ее на водопроводные очистные сооружения. Насосная станция размещена с водозаборным береговым колодцем. Источник водоснабжения – река. Подача насосной станции $Q_{nc} = 1200$ м³/ч. Количество рабочих

насосов принять равным трем. Количество напорных трубопроводов два, материал труб – сталь ГОСТ 10704. Длина напорных трубопроводов 2500 м. Отметка уровня воды в смесителе водопроводных очистных сооружений +77,000 м. Отметки уровней воды во всасывающем отделении берегового колодца составляют при: низшем уровне летней воды +53,600 м; низшем уровне ледостава +53,900 м; высоком уровне воды (паводке) +57,000 м.

Необходимо в соответствии с нормативными и справочными документами:

1. Определить диаметр напорных трубопроводов;
2. Определить напор насосной станции;
3. Подобрать типоразмер насосов, указать их характеристики (использовать насосы двустороннего входа 1Д производства АО «ГМС Ливгидромаш»);
4. Определить количество резервных насосных агрегатов;
5. Результаты представить в табличной форме.

Как и в предыдущих кейсах, для оценки частей задания использовалась 10-балльная шкала (см. табл. 3).

Таблица 3. Оценка результатов выполнения кейса № 3

Table 3. Assessment of the results of case No. 3

Оцениваемая часть задания	Модели ИИ			
	Алиса AI	Гуга чат	DeepSeek	Perplexity AI
1. Определение диаметра напорных трубопроводов	0	5	10	2
2. Определение напора насосной станции	0	3	10	2
3. Выбор типоразмера насоса	2	0	8	2
4. Определение количества резервных насосных агрегатов	10	0	10	0
5. Представление результатов	5	7	8	4
Итого	17	15	46	10

В шаблоне расчета было дано подробное объяснение методики принятия решений там, где это требовалось, приведены расчетные формулы. Несмотря на это, модель ИИ Алиса AI полностью игнорировала материалы тренировочного набора данных. Например, гидравлический уклон был просто назначен без обоснования, причем неверно; неверно выбрана из предложенных отметка уровня воды во всасывающем отделении водозаборного сооружения; предложена несуществующий типоразмер насоса: 1Д800-50. В скачанном ответе были недоступны формулы и единицы измерения величин. Обоснованным и верным оказалось только количество резервных насосов.

Гуга чат назначил диаметр напорного трубопровода 500 мм, игнорировав логику ответа из шаблона расчета. ИИ пересчитал скорость, получил 0,82 м/с и сделал вывод о том, что это число находится в пределах от 1 до 3 м/с; воспользовался формулой Дарси-Вейсбаха и указал без всякого расчета значение гидравлического уклона, равное 0,005 (расчетное значение составляет 0,0053). Гуга чат не справился с выбором отметок из предложенных вариантов, определением подачи одного насоса, определением типоразмера насоса, назначением резервного количества насосов.

DeepSeek практически полностью следовал логике объяснений из тренировочного набора данных. Снижена оценка за выбор марки насоса, так как требуемым значениям подачи и напора (400 м³/ч при 44 м) почти полностью соответствует другой насос (1Д500-63б), но предложенный типоразмер также может использоваться. При скачивании ответа не сохраняется табличный формат данных, но при этом дается подробное обоснование принятых решений с ориентацией на тренировочный набор данных, поэтому представление результатов оценено в 8 баллов.

Модель ИИ Perplexity AI провела вычисления только трех величин: расхода одного трубопровода, подачи одного насоса и геометрического

напора. По остальным частям задания была предложена только схема выполнения расчетов с формулами.

Заключение

Проведённое исследование позволяет сформулировать обобщённые выводы о применимости современных генеративных моделей искусственного интеллекта в инженерно-технической сфере, в частности – при проектировании водозаборных сооружений. Анализ показал, что, несмотря на определённый потенциал ИИ-систем как вспомогательных инструментов, их автономное использование без экспертного сопровождения остаётся недопустимым.

Во-первых, наблюдается существенная неоднородность качества ответов даже в рамках одной предметной области. Модели демонстрируют разный уровень компетентности: от корректного применения нормативных документов (DeepSeek, Алиса AI) до технически несостоятельных предложений, противоречащих базовым инженерным требованиям (Гуга чат, Perplexity AI). Это свидетельствует о нестабильности результатов и невозможности гарантировать достоверность вывода без дополнительной проверки.

Во-вторых, ключевым ограничением является отсутствие у моделей полной методологической прозрачности. Ответы, как правило, не содержат ссылок на нормативные источники или расчётные методики, что делает невозможным верифицировать их корректность исключительно на основе предоставленного текста. Даже при наличии численных результатов отсутствует описание алгоритма их получения, что недопустимо для задач, где ошибка может привести к серьёзным техническим или экономическим последствиям.

В-третьих, модели склонны игнорировать критические контекстные факторы, определяющие выбор инженерного решения. Например, при заданных условиях (пологий берег, амплитуда уровней воды свыше 13 м) некоторые

ИИ-системы предлагали конструкции, неприемлемые в таких гидрологических условиях. Это указывает на недостаточную способность ИИ учитывать комплекс взаимосвязанных параметров, которые специалист воспринимает как обязательные для анализа.

Вместе с тем, исследование подтверждает возможность использования ИИ в качестве вспомогательного инструмента при соблюдении строгих условий. Модели могут быть полезны для быстрого поиска нормативных требований, генерации предварительных вариантов технических решений или расчёта ориентировочных параметров. Однако их применение должно сопровождаться многоэтапным экспертным контролем, включающим проверку: соответствия действующим СП и ГОСТ; учёта специфических условий объекта (рельеф, климат, гидрология); корректности расчётов по утверждённым методикам.

Кроме того, для снижения рисков рекомендуется комбинировать ответы нескольких

ИИ-систем, сравнивая их между собой и выявляя противоречия. Такой подход позволяет минимизировать вероятность принятия ошибочного решения на основе единичного ответа. При этом расчёты, требующие высокой точности (гидравлические, фильтрационные и т.п.), следует выполнять в специализированном инженерном программном обеспечении, а не полагаться на генерацию ИИ.

Таким образом, современные генеративные модели ИИ не заменяют инженера, но могут повысить эффективность его работы при условии чёткой формулировки задачи, многоступенчатой проверки результатов и интеграции с нормативными документами и отраслевыми методиками. Без экспертного сопровождения их использование в проектировании водозаборных сооружений и аналогичных инженерных объектов сопряжено с неприемлемо высокими рисками ошибок, способных привести к нарушению требований безопасности или экономическим потерям.

Список использованных источников

1. Искусственный интеллект в России – 2025: тренды и перспективы // Информационно-аналитический журнал Университетская книга: сайт. URL: <https://www.unkniga.ru/news/issledovanie-iskusstvennyi-intellekt-v-rossii-2025-trendy-i-perspektivy.html>
2. Тележкин В.Ф., Угаров П.А., Девятков М.А. Ультразвуковой нейросетевой комплекс экспресс-контроля качества кирпича // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11. № 1. С. 77-85. EDN: TSUUPS
3. Присс О.Г., Димитрюк Ю.С. Опыт применения искусственного интеллекта в строительной экспертизе рабочей документации «Конструкции металлические» и «Конструкции металлические деталеровочные» // Инженерный вестник Дона. 2025. № 2 (122). С. 833-844. EDN: PXRYTY
4. Rane N., Choudhary S., Rane J. Transforming the Civil Engineering Sector with Generative Artificial Intelligence, such as ChatGPT or Bard // SSRN Electronic Journal. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4681718.
5. Шейнбаум В.С., Никольский В.С. Инженерная деятельность и инженерное мышление в контексте экспансии искусственного интеллекта // Высшее образование в России. 2024. Т. 33, № 6. С. 9-27. DOI: 10.31992/0869-3617-2024-33-6-9-27. EDN: LRFVIO
6. Nyokum T., Tamut Y. Artificial intelligence in civil engineering: emerging applications and opportunities // Frontiers in Built Environment. 2025. Vol. 11. P. 1622873. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1622873>
7. Khan S. The Application of Artificial Intelligence and Machine Learning in Civil Engineering // Doupe Journal of Top Trending Technologies. 2024. Vol. 1. No. 1. DOI: 10.71063/DJT.TT.2025.1103.
8. Park H., Gu H., Hong S., Choo S. Developing a Robust Training Dataset for AI-Driven Architectural Spatial Layout Generation // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. No. 16. P. 7095. <https://doi.org/10.3390/app14167095>
9. Abubakar A.M. Artificial Intelligence Applications in Engineering: A Focus on Software Development and Beyond // Doupe Journal of Top Trending Technologies. 2025. Vol. 1. No. 1. Pp. 1-11. <https://doi.org/10.71063/DJT.TT.2025.1101>

References

1. Artificial Intelligence in Russia – 2025: Trends and Prospects // Information and Analytical Journal University Book: website. URL: <https://www.unkniga.ru/news/issledovanie-iskusstvennyi-intellekt-v-rossii-2025-trendy-i-perspektivy.html>
2. Telezhkin V.F., Ugarov P.A., Devyatov M.A. Ultrasonic neural network complex for bricks express quality control // Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia. 2025. V. 11. No 1. P. 77-85. EDN: TSUUPS
3. Priss O.G., Dimitryuk J.S. Experience in the use of artificial intelligence in the construction expertise of the working documentation “Metal structures” and “Metal detailed structures” // Engineering bulletin of the Don. 2025. No 2 (122). P. 833-844. EDN: PXRYTY
4. Rane N., Choudhary S., Rane J. Transforming the Civil Engineering Sector with Generative Artificial Intelligence, such as ChatGPT or Bard. SSRN Electronic Journal. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4681718.
5. Sheinbaum V.S., Nikolskiy V.S. Engineering Activity and Engineering Thinking in the Context of Artificial Intelligence Expansion // Higher Education in Russia. 2024. Vol. 33, No. 6, P. 9-27, doi: 10.31992/0869-3617-2024-33-6-9-27. EDN: LRFVIO
6. Nyokum T., Tamut Y. Artificial intelligence in civil engineering: emerging applications and opportunities. Frontiers in Built Environment. 2025. Vol. 11. P. 1622873. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1622873>
7. Khan S. The Application of Artificial Intelligence and Machine Learning in Civil Engineering. Doupe Journal of Top Trending Technologies. 2024. Vol. 1. No. 1. DOI: 10.71063/DJT.TT.2025.1103.
8. Park H., Gu H., Hong S., Choo S. Developing a Robust Training Dataset for AI-Driven Architectural Spatial Layout Generation. Applied Sciences. 2024. Vol. 14. No. 16. P. 7095. <https://doi.org/10.3390/app14167095>
9. Abubakar A.M. Artificial Intelligence Applications in Engineering: A Focus on Software Development and Beyond. Doupe Journal of Top Trending Technologies. 2025. Vol. 1. No. 1. Pp. 1-11. <https://doi.org/10.71063/DJT.TT.2025.1101>
10. Sokolova M.E. ChatGPT and prompt engineering: on the prospects for the introduction of generative neural

10. Соколова М.Е. ChatGPT и промпт-инжиниринг: о перспективах внедрения генеративных нейросетей в науку // Научно-технические исследования. 2024. № 1. С. 92-109. DOI: 10.31249/scis/2024.01.07. EDN: PRANUV

11. Реконструкция главного водозабора г. Ишим // За-вод «Взлёт»: сайт. URL: <https://www.vzlet-omsk.ru/vypolnennye-raboty/rekonstruktsiya-glavnogo-vodozabora-g-ishim>.

12. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-85*. СП 31.13330.2021. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/142012/>

Информация об авторах

Анастасия Александровна Кадысева, докт. биол. наук, доцент; ORCID: 0000-0001-8703-5684; SPIN-код: 4485-7332; Author ID: 698088; kadyseva@mail.ru

Светлана Валентиновна Максимова, канд. техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-51411120; SPIN-код: 7626-9213; Author ID: 753376; maksimovasv@tyuiu.ru

networks in science // Scientific Studies. 2024. No 1. pp. 92-109. DOI: 10.31249/scis/2024.01.07. EDN: PRANUV

11. Reconstruction of the main water intake of the city of Ishim // Plant “Vzlet”: website. URL: <https://www.vzlet-omsk.ru/vypolnennye-raboty/rekonstruktsiya-glavnogo-vodozabora-g-ishim>.

12. Water supply. Pipelines and portable water treatment plants. Updated version CC&R2.04.02-85*: 31.13330.2021. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/142012/>

Information about the authors

Anastasia A. Kadyseva, DScs (Bio), Associate Professor; ORCID: 0000-0001-8703-5684; SPIN-code: 4485-7332; Author ID: 698088; kadyseva@mail.ru

Svetlana V. Maksimova, CSs Ph.D. (Eng.), Associate Professor; ORCID: 0000-0002-51411120; SPIN-code: 7626-9213;

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 authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Поступила в редакцию / Received 12.02.2026

Поступила после рецензирования / Received 18.09.2026

Принята к публикации / Accepted 21.09.2026

Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

УДК 556.5:626.81

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-97-106>ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЧНОГО СТОКА НА ПРОЦЕССЫ
ОПУСТЫНИВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ В НИЗОВЬЕ РЕКИ ВОЛГИВ.И. Сметанин^{1✉}, В.А. Шевченко², Хунас Каси³^{1,2} ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»; г. Москва, Российская Федерация³ Астраханский государственный технический университет; г. Астрахань, Российская Федерация^{1*} smetanin2000@yandex.ru; ORCID iD: 0009-0004-0134-1234² shevchenko.v.a@yandex.ru; ORCID iD: 0000-0002-5444-9693³ hkaci@yandex.ru; ORCID iD: 0009-0005-0830-9699

Аннотация. Цель исследований – оценка влияния хозяйственной деятельности человека на деградацию земель в Астраханской области и поиск основных направлений снижения антропогенной нагрузки на степные ландшафты в низовье Волги. Проведен аналитический анализ источников литературы, картографического материала с использованием искусственного интеллекта, выполнены водобалансовые расчеты и визуальные наблюдения. Показано, что помимо аридизации климата, в Астраханской области на опустынивание степных ландшафтов оказывает хозяйственная деятельность человека – в частности, зарегулирование речного стока Волго-Камского бассейна и добыча углеводородного сырья. Для снижения темпов деградации степных ландшафтов в Астраханской области можно либо изменить климатические условия, либо снизить антропогенную нагрузку на ландшафт. Климат изменить практически невозможно, а антропогенную нагрузку снизить теоретически возможно, если, увеличить речной сток за счет переброски части стока северных рек в низовье Волги и (или) снизить темпы добычи углеводородного сырья. Однако, первое – дорого и неэффективно, второе – маловероятно. Остается один путь – задержать речной сток в низовье Волги на период рыбоводного половодья: в левобережной части дельты, используя существующий Астраханский водodelитель, а в юго-западной – созданием «шпор» в протоках и ериках системы, обеспечивающих подъем уровня воды в них до значений «рыбохозяйственной полки» по рыбоводному графику.

Ключевые слова: аридизация, климат, хозяйственная деятельность, речной сток, гидрографическая сеть, поверхностный сток, подземные, акваториальные воды, почва, почвенный покров, капиллярная кайма, рыбоводная полка, деградация, опустынивание

Формат цитирования: Сметанин В.И., Шевченко В.А., Хунас Каси. Влияние изменения речного стока на процессы опустынивания земель в низовье реки Волги. Природообустройство. 2026;Т.19(4):97-106. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-97-106>

Scientific article

THE IMPACT OF RIVER FLOW CHANGES ON LAND DESERTIFICATION
PROCESSES IN THE LOWER REACHES OF THE VOLGA RIVERV.I. Smetanin^{1✉}, V.A. Shevchenko², Hunas Kasi³^{1,2} FGBNU «Federal'nyy nauchnyy tsentr gidrotekhniki i melioratsii imeni A.N. Kostyakova». Moskva, Rossiyskaya Federatsiya³ Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet.; g. Astrakhan', Rossiyskaya Federatsiya^{1*} smetanin2000@yandex.ru; ORCID iD: 0009-0004-0134-1234² shevchenko.v.a@yandex.ru; ORCID iD: 0000-0002-5444-9693³ hkaci@yandex.ru; ORCID iD: 0009-0005-0830-9699

Abstract. The purpose of the research is to assess the impact of human economic activity on land degradation in the Astrakhan region and to search for the main directions for reducing the anthropogenic load on steppe landscapes in the lower reaches of the Volga. Analytical analysis of literature sources,

cartographic material using artificial intelligence, water balance calculations and visual observations are carried out. It is shown that in addition to climate aridization, in the Astrakhan region, human economic activity contributes to the desertification of steppe landscapes, in particular, the regulation of the river flow of the Volga-Kama basin and the production of hydrocarbons. To reduce the rate of degradation of steppe landscapes in the Astrakhan region, it is possible either to change climatic conditions or reduce the anthropogenic load on the landscape. It is almost impossible to change the climate, and it is theoretically possible to reduce the anthropogenic load, if, for example, the river flow is increased by diverting part of the flow of northern rivers to the lower reaches of the Volga and (or) the rate of hydrocarbon production is reduced. However, the first is expensive and inefficient, the second is unlikely. using the existing Astrakhan water divider, and in the south-west – by creating “spurs” in the channels and eriks of the system, ensuring the rise of the water level in them to the values of the “fishery shelf” according to the fish-breeding schedule.

Keywords: aridization, climate, economic activity, river runoff, hydrographic network, surface runoff, groundwater, aquatorial waters, soil, soil cover, capillary border, fish-breeding shelf, degradation, desertification

Citation format: Smetanin V.I., Shevchenko V.A., Hunas Kasi. The impact of river flow changes on land desertification processes in the lower reaches of the Volga River. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):97-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-97-106>

Введение. Аридизация климата, сопровождающаяся повышением среднегодовых температур и уменьшением атмосферных осадков, является первопричиной опустынивания земель степных ландшафтов. Как правило, это связано с испарением влаги, которое в 2...3 раза превышает выпадение осадков, что естественным образом вызывает засуху, потерю почвенного покрова, деградацию и опустынивание земель [1. 2]. На деградацию степных ландшафтов оказывает влияние хозяйственная деятельность человека, дополняя естественные причины, вызывающие опустынивание земель. Выпадение лесов приводит к потере защищенности почвы от ветра и прямых солнечных лучей, ускоряет поверхностный сток и испарение влаги. Чрезмерный выпас скота приводит к вытаптыванию и низкому поеданию, особенно овцами, растительного покрова, к разрушению верхнего слоя почвы. Нерациональное ведение сельского хозяйства приводит к истощению питательных веществ в почве и засолению земель ввиду несовершенства оросительных систем и высоких норм орошения. Немалую роль в процессе опустынивания земель в условиях Астраханской области играет добыча полезных ископаемых, в том числе добыча углеводородов как на суше, так и на шельфе в северной части Каспия.

На процессы опустынивания земель в низовье Волги оказало существенное влияние уменьшение речного стока по сравнению с до-строительным периодом Волго-Камского каскада. Это привело к обмелению естественной гидрографической сети (протоков, ериков в дельте Волги). Обмеление гидрографической сети в свою очередь повлекло понижение уровня грунтовых

вод на водосборе и, как следствие, потерю капиллярной каймы в корнеобитаемом слое почвы, приведшую местами к утрате почвенного покрова на водосборе и облесенности водозащитных полос в системе водоохраных зон водных объектов. Все это послужило причиной интенсификации эрозионных процессов на водосборе, повлекших заиление гидрографической и, как следствие ухудшение нерестовых условий в них.

Аридизация климата и нерациональная хозяйственная деятельность человека являются основными причинами опустынивания земель в Астраханской области.

Цель исследований: оценка влияния хозяйственной деятельности человека на деградацию земель в Астраханской области и поиск основных направлений снижения антропогенной нагрузки на степные ландшафты в низовье Волги.

Материалы и методы исследований. Анализ климатических данных Астраханского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (филиал ФГБУ «Северокавказское УГМС») за период 1979-2024 гг. показал стабильное повышение средней годовой температуры на 0,047°C и ежегодное снижение количества осадков на 1,6 мм в год, что указывает на тренд глобального потепления [1-3].

Динамика изменения среднегодовых температур и ежегодных осадков в Астраханской области на ближайшие годы показывает, что к 2035 г. среднегодовая температура может достичь 12,33°C, а объем осадков – снизиться до 189,6 мм. Это говорит о том, что дальнейшее потепление усиливает аридизацию климата в Астраханской области.

Земли Астраханской области, расположенные в Прикаспийской низменности, состоят из малопродуктивных засоленных, солонцеватых и заболоченных почв; около 80% территории характеризуются маломощным плодородным слоем [4]. Любое негативное воздействие на эти почвы, особенно животных (их копыт) и, в частности, овец, разрыхляющих верхний плодородный слой, делает агроландшафты неустойчивыми. Разреженность растительности снижает задерживаемость почв, что делает их более уязвимыми к водной и ветровой эрозии. При сильных ветрах верхний плодородный слой почвы разрушается и уносится, значительно снижая способность почвы удерживать влагу и питательные вещества. В результате растения теряют возможность укореняться и получать достаточное количество влаги и питательные вещества, что ведет к деградации растительного покрова, делает почву менее способной поддерживать естественные экосистемы, угрожая биоразнообразию и устойчивости степных ландшафтов [5].

Растительность области отличается низкорослостью, разреженностью и низкой продуктивностью, а сформировавшиеся засоленные земли и солончаки в большей степени подвержены ветровой эрозии. Опустыниванию также способствует миграция саранчи. В источниках литературы отмечается, что на протяжении истории нашествие саранчи в Астраханской области было распространенным. Стаи саранчи, насчитывающие несколько миллиардов особей, образуют «летучие облака», или «тучи». Площадь летучего облака может достигать до 1000 км², а общая его масса – до 2-3 тыс. т. Саранча представляет колоссальную угрозу для сельского хозяйства и продовольственной безопасности, сметая все на своем пути (листья, плоды, кору деревьев, стебли, растительный покров) и превращая сельскохозяйственные угодья в выжженную землю. Так, в июне 2026 г. саранча не оставила «без внимания» и Астраханскую область.

Наибольшее воздействие на процессы опустынивания в Астраханской области оказывают ветра западного и восточного направлений. Преобладающие ветра, дующие с запада по румбам ЮЗ, З, СЗ, составляют 35%, способствуя процессам опустынивания на территориях Наримановского, Енотаевского и Лиманского районов, расположенных на правобережной стороне Волги.

На восточной (левобережной) части Волги активизация процессов опустынивания на территориях Харабалинского, Красноярского районов и северной части Володарского района вызвана

преобладающими ветрами, дующими с востока по румбам СВ, В, ЮВ, которые составляют 47% [6].

Помимо причин природного характера, вызывающих деградацию земель в Астраханской области, на опустынивание территорий опосредованно оказало влияние зарегулирование речного стока Волго-Камского бассейна: во-первых, уменьшился общий речной сток в низовье Волги до 30 км³/год; во-вторых, произошло снижение уровня воды в Каспийском море до отметки минус 29 м.

За непосредственный речной сток в низовьях отвечает Волжская ГЭС, рис. 1. Начало строительства пришлось на 1950 г., ввод гидроагрегатов в эксплуатацию происходил с 1958 по 1962 гг. [3].

Основные параметры ГЭС:

- установленная электрическая мощность по состоянию на 2025 г. – 2734 МВт [2];
- годовая выработка электроэнергии в 2024 г. – 12513 млн кВтч;
- расчетный напор – 20-21,5 м;
- количество и тип гидроагрегатов – 22 вертикальных гидроагрегата с поворотными лопастными турбинами, из них 7 – мощностью по 115 МВт, 5 – по 120 МВт, 10 – по 125,5 МВт [2];
- расчетный расход воды через турбины – 18900 м³/с [2];
- здание ГЭС – руслового типа, совмещенно с донными водосбросами, длина составляет 736 м, ширина – 90 м, наибольшая высота – 71 м. Здание ГЭС выполнено из монолитного железобетона, разделено на 11 секций, в каждой из них расположены по 2 гидроагрегата и по 4 донных водосброса.

Бетонная водосливная плотина имеет длину 725 м, высоту – 44 м, а также 3 земляные плотины, возведенные намывным способом, общей длиной 3253 м. Пропускная способность водосливной плотины (без учета рыбоподъемника) составляет 30850 м³/с при нормальном подпорном уровне (НПУ) и 37500 м³/с при форсированном подпорном уровне (ФПУ).

Площадь Волгоградского водохранилища при нормальном подпорном уровне составляет 3117 км², длина – 524 км, максимальная ширина – 17 км, максимальная глубина – 41 м; полная и полезная емкость – 31,45 и 8,25 км³ соответственно.

Основными причинами снижения речного стока в низовье Волги стали потери воды из водохранилищ Волго-Камского бассейна на испарение, фильтрацию и диверсификация его в сторону гидроэнергетической ориентации.

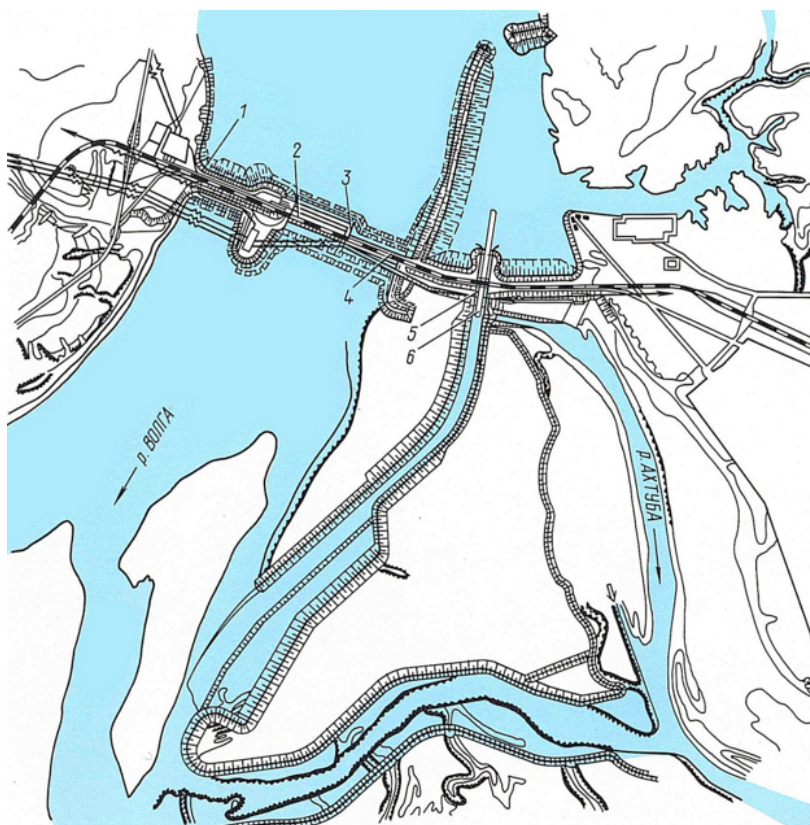


Рис. 1. План сооружений Волжского гидроузла:

1 – земляная плотина; 2 – ГЭС; 3 – рыбоподъемник;
4 – водосливная плотина; 5 – межплузовая ГЭС; 6 – шлюз

Fig. 1. Plan of the Volga hydroelectric complex:

1 – earth dam; 2 – hydroelectric power station; 3 – fish lift; 4 – spillway dam;
5 – inter-lock hydroelectric power station; 6 – lock

Гидроэнергетика в отличие от тепловой и атомной играет важную роль в обеспечении надежности работы Единой энергосистемы России. Однако гидроэнергетика имеет и свои существенные недостатки: например, возникают трудности обеспечения судоходства, водоснабжения, орошения засушливых земель, нарушается нерест тутовых и проходящих рыб и др.

На фоне уменьшения годового речного стока Волго-Камского бассейна около $30 \text{ км}^3/\text{год}$ в низовье Волги произошло снижение уровня воды в Каспийском море до отметки минус 29 м.

В период весеннего половодья при сбросе около $25000 \text{ м}^3/\text{с}$ уровень воды в нижнем бьефе Волжской ГЭС составил около минус 4 м. В межень, когда расход воды не превышает $10000 \text{ м}^3/\text{с}$ уровень воды в нижнем бьефе достигает отметки минус 8 м (по Балтийской системе высот). Уровень воды на раскатах остается практически неизменным и составляет минус 29 м. Изменение уровней воды в нижнем бьефе Волжской ГЭС при неизменном низком уровне воды в Каспийском море формирует разные гидравлические уклоны потока в годовом разрезе времени:

в паводок они увеличиваются, в межень уменьшаются, см. (1, 2 и 3, 4).

$$Z_{\Pi} = \nabla_{(\text{НБ})}(-4) - \nabla_{(\text{К})}(-29) = 25; \quad (1)$$

$$i_{\Pi} = \frac{Z_{\Pi}}{L} = \frac{25}{800000} = 4,125 \times 10^{-4}; \quad (2)$$

$$Z_{\text{М}} = \nabla_{(\text{НБ})}(-8) - \nabla_{(\text{К})}(-29) = 21; \quad (3)$$

$$i_{\text{М}} = \frac{Z_{\text{М}}}{L} = \frac{21}{800000} = 2,625 \times 10^{-4}, \quad (4)$$

где Z_{Π} – кинетическая энергия потока в низовье реки Волга в период половодья, м; ∇_{20} – уровень воды в нижнем бьефе Волжской ГЭС в период половодья, м; $\nabla_{(-29)}$ – уровень воды в Каспийском море, м; $Z_{\text{М}}$ – кинетическая энергия потока в низовье реки Волга в период межени, м; ∇_{11} – уровень воды в нижнем бьефе Волжской ГЭС в период межени; i_{Π} – продольный гидравлический уклон потока в период половодья; $i_{\text{М}}$ – продольный гидравлический уклон потока в период межени; L – расстояние от створа Волжской ГЭС до раскатов по воде около 800 км.

При сбросе в нижний бьеф паводковых расходов создается «волна» с отметкой гребня минус 4 м, постепенно растекаясь по длине, формирует поток с гидравлическим уклоном $i_{\Pi} = 4,125 \times 10^{-4}$, при котором растет скорость ее добегания

до раскатов, но сокращается время поддержания требуемых уровней воды в гидрографической сети в системе дельты.

При сбросе меженных расходов формируется «волна» с отметкой гребня примерно минус 8 м, формируя поток с меньшим продольным гидравлическим уклоном, например, при расходе $10000 \text{ м}^3/\text{с}$ составляет $i_m = 2,625 \times 10^{-4}$. При меженных расходах увеличивается продолжительность добегания волны до раскатов, но при малых уровнях воды в гидрографической сети дельты.

Резюмируя отмеченное, следует отметить, что в период половодья образуется высокая «волна» добегания, сформированная большими попусками, достаточно быстро «пролетает» от ГЭС до раскатов, не успевая обеспечить требования водопользователей в низовье Волги, а в период меженных расходов происходит просадка уровней воды в гидрографической сети дельты Волги и грунтовых вод на водосборе.

С 70-х гг. XX в. в Астраханской области началось интенсивное освоение месторождений углеводородного сырья. На месте бывших степных ландшафтов построены завод, административные и жилые здания, созданы полигоны для размещения отходов и хранения серы, подземные хранилища сырья, токсичных отходов, проведены продуктопроводы, транспортные магистрали и т.д.

Добыча углеводородов на шельфе сопряжена с загрязнением акваториальных вод нефтепродуктами и сырой нефтью. Образующаяся

на поверхности воды нефтяная пленка препятствует развитию личинок комаров и мошки, являющихся кормовой базой для ихтиофауны, что влияет на сокращение рыбных запасов в северной части Каспия [7]. Как показывает практика, освоение месторождений углеводородов в Астраханской области оказывает существенное негативное воздействие на почву, поверхностные, грунтовые и подземные воды, атмосферный воздух.

На процессы опустынивания оказывает влияние так называемый социальный фактор. В летний период за счет развития организованного и неорганизованного туризма численность населения увеличивается, соответственно возрастают водопотребление, водоотведение и образование отходов производства и потребления, в том числе ТКО, преимущественно в сельской местности. Образовавшиеся отходы оказывают негативное воздействие на атмосферный воздух, почву, поверхностные и грунтовые воды в местах их постоянного размещения. Урбанизация территорий увеличивает площадь водонепроницаемых площадей, поверхностный сток с которых стекает непосредственно в ближайшую гидрографическую сеть, минуя подпочвенные горизонты [7].

Наблюдения за речным стоком реки Волга и изменением уровня Каспийского моря за 2011–2024 гг. (рис. 2) показали, что при незначительном приросте речного стока за 14 лет (около $5 \text{ км}^3/\text{год}$) уровень воды в море не повысился, а упал за тот же период в среднем на 0,6 м.

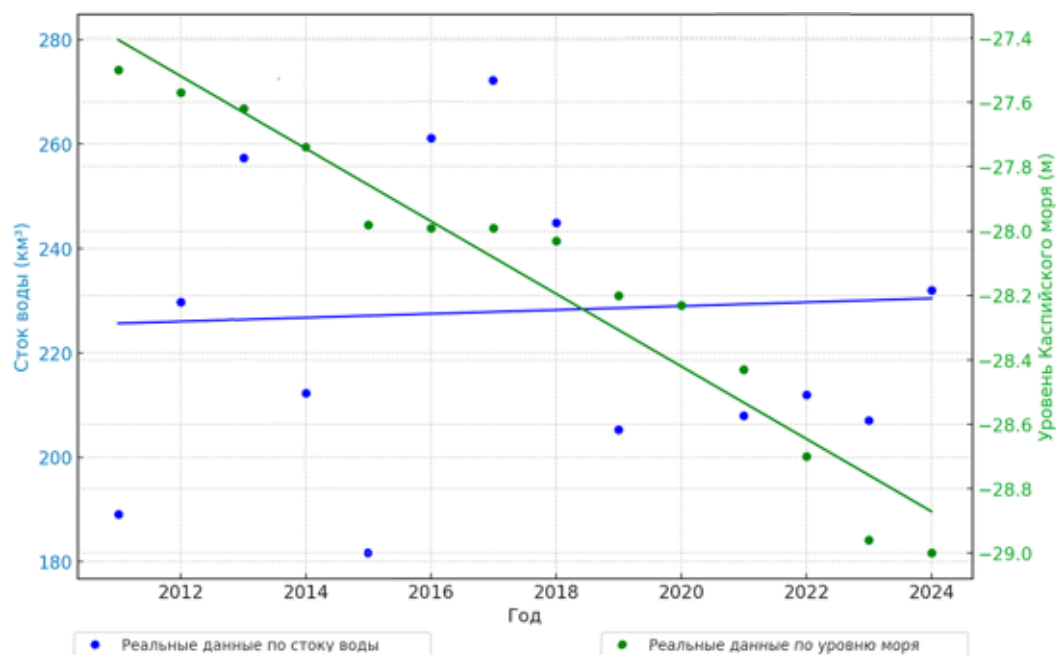


Рис. 2. Изменение речного стока реки Волга и уровня Каспийского моря за 2011–2024

Fig. 2. Changes in the river flow of the Volga River and the level of the Caspian Sea for 2011–2024

Колебание уровня воды в Каспийском море зависит как от природных геотехнических особенностей региона, так и от поступления поверхностного стока впадающих рек.

Последние исследования котловины Каспия показали, что она сформировалась и развивается под преобладающим воздействием горизонтальных тектонических движений, связанных с пульсационным давлением выступа Аравийской плиты. Этот тектогенный механизм «Сжатие-растяжение» периодически приводил к сжатию или растяжению котловины Каспия, а соответственно – к повышению или понижению уровня моря.

Основные колебания уровня Каспия в XX в. были тесно связаны с крупномасштабными геодинамическими процессами на обширных территориях. Аномальное падение уровня моря в 1929-1940 гг. совпадает с резкой активизацией сейсмичности в северных альпийских горных системах: Карпатах, Крыму, Кавказе и прилегающей части юга Русской равнины, а аномальное повышение уровня Каспия в 1978-1995 гг. соответствует периоду резкой активизации сейсмичности в средних альпийских орогенах: северо-западной Турции, Малом Кавказе, северном Иране, западной Туркмении. Можно полагать, что колебания уровня Каспия в известной мере являются региональной реакцией на глобальные изменения природной среды [8].

Естественным является то, что на изменение уровня воды в Каспийском море влияют поверхностный приток впадающих рек, атмосферные осадки, приток подземных вод, а также испарение с водной поверхности моря и сток воды из моря в залив Кара-Богаз-Гол. Состояние уровня в море можно оценить соотношением приходной и расходной частей водного баланса.

Так, приходная часть (ПЧ) водного баланса, км³/год, составляет:

$$\text{ПЧ} = \text{П} + \text{АО} + \text{Пп/в} = 290 + 66,78 + 2,9 = 359,68 \text{ км}^3, \quad (5)$$

где П – поверхностный приток впадающих рек (в Каспийское море впадают 130 рек, из них – Волга, Урал, Терек, Кура, Сулак, Самур и реки Иранского побережья) при среднегодовом речном притоке в море 290 км³, в том числе 215...224 км³ из Волги; АО (атмосферные осадки) – выпадает в год около 180 мм, или около 66,78 км³; Пп/в (приток подземных вод) – около 1% от общего притока.

Расходная часть (РЧ) водного баланса, км³/год, составляет:

$$\text{РЧ} = \text{Е} + \text{Скбг} = 445 + 20 = 465 \text{ км}^3, \quad (6)$$

где Е – испарение с поверхности Каспийского моря, около 1000...1400 мм/год, или около 445 км³/год; Скбг – сток воды из моря в залив Кара-Богаз-Гол в зависимости от уровня моря не более 20 км³/год (при уровне моря примерно 30,5 м Скбг = 0).

Полученные результаты по формулам (5) и (6) показывают, что расходная часть водного баланса превалирует над приходной в сумме на 105,32 км³/год. Недостаточное количество водной массы, поступающей в Каспийское море, тоже привело к снижению его уровня. Это примерно тот объем, на что необходимо увеличить приходную часть водного баланса, при которой произойдет стабилизация падения или некоторое повышение уровня. Уменьшить дисбаланс между приходной и расходной частями можно за счет увеличения поверхностного притока впадающих рек. Например, в 80-е гг. прошлого столетия намечались системы 1 и 2 очереди переброски части стока северных рек в бассейн Волги. В соответствии с технико-экономическим обоснованием, уточненным в 1982 г. по замечаниям ГЭК Госплана СССР, переброска части стока северных рек в бассейн реки Волги намечалась с разбивкой на очереди и этапы, отраженные в таблице 1.

Таблица 1. Объемы переброски части стока северных рек в бассейн Волги [9]

Table 1. Volumes of transfer of part of the flow of northern rivers to the Volga basin [9]

1 очередь		
I этап	Из озер Лача, Воже	1,8 км ³ /год
	из озера Кубенского и р. Верхней Сухоны	4 км ³ /год
II этап	из озера Онежского	3,5 км ³ /год
III этап	из р. Печоры	9,8 км ³ /год
2 очередь		
I этап	из рек Нижней Сухоны и Малой Северной Двины	10,2 км ³ /год
II этап	из Онежской губы Белого моря	37,7 км ³ /год
Итого	По переброске	67 км ³ /год

Строительство первого этапа первой очереди было включено в Продовольственную программу СССР со сроком окончания строительных работ в 1990 г. Окончание строительства II этапа первой очереди было намечено на 1992 г., а срок ввода в действие объектов III этапа – на 1995 г. По второй очереди переброски окончание строительства первого этапа планировалось на 2005 г., а второго этапа на 2010-2015 гг.

Если при поступлении в Каспий дополнительно $1 \text{ км}^3/\text{год}$ речного стока без учета потерь теоретический прирост уровня может составить около 2,6 мм, то при ежегодном поступлении дополнительных 67 км^3 речного стока, планируемого за счет переброски стока северных рек в Волгу, подъем уровня в Каспии мог бы составить около 174,2 мм. Чтобы теоретически поднять уровень воды в Каспии на высоту около 3 м, потребуется примерно 17 лет без учета потерь воды по трассе переброски и из самого Каспийского моря.

Предварительные расчеты показали, что переброска части стока северных рек в бассейн Волги проблему обводнения низовья Волги и обмеления Каспия в ближайшем будущем не решит. Но проблему обводнения Волго-Ахтубинской поймы и обеспечения рыбохозяйственной полки по рыбоводному графику в низовье Волги необходимо решать в первую очередь за счет диверсификации речного стока в разрезе года, отдавая предпочтение обеспечению «рыбохозяйственной» полки по рыбоводному графику с учетом забора воды на сельскохозяйственное орошение, не забывая о гидроэнергетике и о других водопользователях.

Водопропускные сооружения Волжской ГЭС способны пропустить речной сток из водохранилища в низовье Волги в объеме при НПУ 1568, при ФПУ 1778 $\text{км}^3/\text{год}$, табл. 2.

Как следует из данных таблицы 2, существующие водопропускные и водосбросные сооружения Волжской ГЭС способны «безболезненно» пропустить Волжский сток и часть стока северных рек, перебрасываемого в Волгу, в объеме свыше $317 \text{ км}^3/\text{год}$, что не требует строительства

дополнительных водосбросных и рыбопропускных сооружений из Волгоградского водохранилища или в него.

Далее речной сток по основному руслу, протокам и ерикам, через «раскаты» поступает в Каспийское море. В результате сброса речного стока в низовье Волги создается гидрологический режим с образованием волны «добегания» от Волгоградского гидроузла по протокам и ерикам до «раскатов».

Как отмечалось выше, по мере увеличения сбрасываемого расхода в нижний бьеф формируется паводковая волна с высоким «гребнем», которая при высоком градиенте напора добежит до «раскатов», смешивается с водами Каспийского моря и оказывается неиспользованной как водный ресурс. Быстрое «добегание» паводковой волны до Каспия уменьшает продолжительность обводнения полей Волго-Ахтубинской поймы и стабильность рыбохозяйственной полки по рыбоводному графику в протоках и ериках дельты Волги. В нерестовом цикле рыб должно соблюдаться соответствие начала обводнения нерестилищ, наступления нерестовых температур воды, захода производителей на полои степени подготовленности благоприятных условий для развития потомства [10, 11].

К сожалению, интересы гидроэнергетики и требования рыбного и сельского хозяйства по использованию водных ресурсов при управлении волжским стоком существенно расходятся. В докладе «Об экологической ситуации в Астраханской области в 2023 году» приведены показатели дезинтеграции попусков между гидрологическими и биологическими потребностями в период нерестового цикла рыб: запаздывание сроков затопления полей при высокой скорости подъема высоты волны половодья, ранняя подача максимальных расходов воды в нижний бьеф Волжской ГЭС при малой продолжительности обводнения нерестилищ и быстром спаде волны половодья [10, 11].

С целью снижения негативного воздействия зарегулированного сброса речного стока

Таблица 2. Водопропускная способность сбросных сооружений и среднегодовой речной сток

Table 2. Discharge capacity and average annual river flow

№	Наименование	Речной сток, $W, \text{ км}^3/\text{год}$
1	Максимальный возможный сток через турбины	596
2	Максимальный возможный сток, сбрасываемый через бетонную водосливную плотину: При НПУ При ФПУ	972 1182
3	Среднегодовой речной сток реки Волги	240-250
4	Среднегодовой речной сток из северных рек, перебрасываемый в бассейн Волги	67

в низовье Волги в 50 км к северу от Астрахани был построен Астраханский вододелитель для распределения волжской воды между рукавами Волги, Ахтубы и Бузана (рис. 3).

В состав сооружений вододелителя входят: бетонная плотина длиной 1067 м с водосливным фронтом 900 м. Бетонная плотина состоит из двух судоходных пролетов шириной по 110 м, перекрываемых затворами массой по 1200 т каждый. Плотина включает в себя 33 регуляционных бетонных пролета шириной по 20 м каждый, двухниточный рыбопропускной шлюз с двумя камерами по 10 м и судоходный шлюз докового типа (длина камеры – 290 м, ширина – 30 м, глубина на пороге – 5,5 м).

Земляная плотина высотой 2,2 м имеет длину 1317,9 м. Вододелитель при весенних паводочных расходах, сбрасываемых через Волжскую ГЭС, обеспечивал подпор воды до 4,5 м, необходимый для обводнения нерестилищ Волго-Ахтубинской поймы и восточной части дельты в нужный период времени по рыбоводному графику.

Для подачи воды большего объема в восточную часть Волжский рукав временно перекрывался затворами, уровень в верхнем бьефе вододелителя повышался, обводняя Волго-Ахтубинскую пойму и затопляя нерестилища восточной части дельты через Бузан. Суда в данный период проходили через судоходные шлюзы. В этот период удовлетворялись и рыбоводческая, и сельскохозяйственная гидрологические полки. Вододелитель был введен в эксплуатацию в 1977 г. и использовался всего 6 раз: в 1977, 1978, 1982, 1983, 1988, 1989 гг., причем общая продолжительность его работы составила 160 дней (в среднем 20-30 дней в году). После 1989 г. Астраханский вододелитель не эксплуатируется по причине его «неэффективности» [12].

Результаты и их обсуждение. Анализ климатических данных за период 1979-2024 гг. показал тенденцию изменения природно-климатических условий в Астраханской области, проявляющихся в стабильном повышении средней годовой температуры, ежегодном снижении количества осадков, повышении ветровой активности, послуживших в качестве основной причины деградации и опустынивания степных ландшафтов. К активным причинам опустынивания территорий можно отнести хозяйственную деятельность, в результате которой формируется антропогенная нагрузка, которая приводит к потере растительного покрова, лишая защищенность почвы от ветра и прямых солнечных лучей, а чрезмерный выпас скота приводит к вытаптыванию растительного покрова и разрушению верхнего слоя почвы. Нерациональное ведение сельского хозяйства приводит к истощению питательных веществ в почве и засолению земель ввиду несовершенства оросительных систем и высоких норм орошения. Немалую роль в процессе опустынивания земель в условиях Астраханской области играет добыча полезных ископаемых, особенно добыча углеводородов, как на суше, так и на шельфе в северной части Каспия. Особое влияние на процесс опустынивания земель в низовье Волги оказало уменьшение речного стока по сравнению с достроительным периодом Волго-Камского каскада (понижение уровня воды в Каспийском море до отметки минус 29 м), что привело к обмелению естественной гидрографической сети (протоков, ериков в дельте Волги), понижению уровня капиллярной каймы в корнеобитаемом слое почвы на водосборе.

1. Для предотвращения дальнейшей деградации земель и опустынивания территорий в Астраханской области в информационном пространстве рассматриваются некоторые



Рис. 3. Волжская часть Астраханского вододелителя
(из материалов свободного доступа в Интернете)

Fig. 3. Volga part of the Astrakhan water divider
(Свободный доступ в интернете)(Free access on the Internet)

«реанимируемые» проекты: переброска части стока северных рек в бассейн реки Волги в объеме $67 \text{ км}^3/\text{год}$. Проект предлагает машинный подъем планируемого объема на высоту около 70 м без учета гидравлических потерь в зависимости от дальности транспортирования, а также без учета затрат на строительство всей системы.

2. В качестве альтернативы переброске может послужить реанимация Астраханского вододеливателя в системе управления речным стоком в низовье реки Волги по рыбоводному графику. Обеспечивая подпор воды перед вододеливателем до 4,5 м, можно достичь необходимого обводнения нерестилищ Волго-Ахтубинской поймы и восточной части дельты в нужный период времени по рыбоводному графику.

3. Для обводнения территорий Наримановского, Енотаевского и Лиманского районов, расположенных на правобережной стороне Волги, можно предложить два пути:

– построить обводнительную систему закрытого типа с забором воды с машинным водоподъемом насосной станцией, устанавливаемой выше вододеливателя и подающей волжскую воду по системе трубопроводов в водонакопительные резервуары или ильмена вне нерестового графика;

– для обводнения западной части дельты на юго-западе Астраханской области предлагается создание системы «шпор» в протоках и ериках, обеспечивающих подъем уровня воды в них до значений «рыбохозяйственной полки» по рыбоводному графику.

4. Повышение уровня воды в гидрологической сети низовья Волги в течение обеспечения гидрологической рыбоводной полки и выдерживание ее в течение нерестового графика позволят обводнить прибрежные территории и сохранить облесенность водоохранных зон, включая в их

состав прибрежные защитные полосы, и тем самым снизить процесс опустынивания территорий.

Выводы

В качестве основных причина, вызывающих опустынивание земель в Астраханской области, служат аридизация климата и хозяйственная деятельность человека – в частности, зарегулирование речного стока Волго-Камского бассейна и добыча углеводородного сырья. Изменить климат невозможно, снизить темпы добычи углеводородного сырья маловероятно, а увеличить речной сток за счет переброски части стока северных рек в бассейн реки Волга будет дорого и вряд ли эффективно. Остается один путь: задерживать часть речного стока в низовье реки Волга.

Для этого, на период половодья в левобережной части дельты использовать существующий Астраханский вододеливатель, а для обводнения и затопления правобережных ильменей на юго-западе Астраханской области создать систему «шпор» в протоках и ериках, обеспечивающих подъем уровня воды до значений «рыбохозяйственной полки» по рыбоводному графику.

Повышение уровня воды в гидрологической сети в дельте Волги до уровня рыбоводческой полки и выдерживание ее в течение нерестового графика позволят обводнить прибрежные территории и сохранить облесенность водоохранных зон и прибрежных лесозащитных защитных полос, и тем самым снизить антропогенную нагрузку на степные ландшафты.

Кроме того, на всех этапах природопользования необходимо своевременно выполнять работы по природообустройству вновь осваиваемых территорий с использованием природоподобных технологий рекультивации нарушенных, деградированных и залежных земель.

Список использованных источников

1. Изменения климата / Астрахань, Астраханская Область // Россия, $46.35^{\circ}\text{S}48.04^{\circ}\text{E}$, 12 м над уровнем моря URL: <https://meteoblue.com> (дата последнего посещения 30.04.2025 г)
2. Сметанин В.И., Каси Хунас. Особенности опустынивания земель в Астраханской области // Орошаемое земледелие. 2025. № 3(50). С. 25-31. DOI: 10.35809/2618-8279-2025-3-4. EDN: QAQLNI
3. Волжская ГЭС – мощность электростанции и её технические характеристики, год ввода в эксплуатацию, расположение и конструкция URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Волжская_ГЭС. (дата обращения: 22.06.2026)
4. Агрохимическая характеристика почв Астраханской области: Справочник / Ю.Б. Салина [и др.]. Астрахань, 2020. 68 с.
5. Деградация земель, опустынивание и устойчивое землепользование: концепции и термины / Г.С. Куст,

References

1. Changes in climate / Astrakhan, Astrakhan region // Russia, $46.35^{\circ}\text{S}48.04^{\circ}\text{E}$, – 12 m above sea level URL: <https://meteoblue.com> (last visited 30.04.2025)
2. Smetanin V.I., Kasi Hunas. Features of desertification of lands in the Astrakhan region // Irrigated agriculture. 2025. № 3(50). P. 25-31. DOI: 10.35809/2618-8279-2025-3-4. EDN: QAQLNI
3. Volzhskaya HPP – power of the power plant and its technical characteristics, year of commissioning, location and construction URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Волжская_HPES. (accessed: 22.06.2026)
4. Agrochemical characteristics of soils of the Astrakhan region: Reference book / Yu.B. Salina. Astrakhan, 2020. 68 p.
5. Land degradation, desertification and sustainable land use: concepts and terms / G.S. Kust, O.V. Andreeva, I.S. Zonn [i dr.]; edited by G.S. Kust; Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Scientific Coordination

О.В. Андреева, И.С. Зонн [и др.]; под редакцией Г.С. Куста; Институт географии РАН, Научно-координационный центр по борьбе с опустыниванием и смягчению последствий засухи имени Н.Ф. Глазовского. М.: МАКС Пресс, 2024. 205 с.

6. Вайчулис Г.В., Быстрова И.В., Смирнова Т.С. Опустынивание земель южных регионов России. Возможные пути решения проблемы // Научные высказывания. 2021. № 2 (2). С. 29-31. URL: <https://nvjournal.ru/article/39-opustinivanie-zemel-yuzhnikh-regionov-rossii-vo>. (дата последнего посещения 30.04.2025 г)

7. Доклад «Об экологической ситуации в Астраханской области в 2023 году», г. Астрахань, 2024 г. URL: <https://nvjournal.ru/article/39-opustinivanie-zemel-yuzhnikh-regionov-rossii-vo>.

8. Долговременный мониторинг и сохранение колониальных водных птиц Северного Каспия в связи с многолетними колебаниями уровня Каспийского моря: монография / [Э.В. Рогачева и др.; отв. ред. Э.В. Рогачева, Н.А. Литвинова; Ин-т проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Рос. акад. наук, Астрах. гос. природ. биосфер. заповедник. М.: Астрах. гос. природ. биосфер. заповедник; Астрахань: Волга, 2005. 270 с.

9. Техничко-экономическое обоснование, уточненное в 1982 г. по замечаниям ГЭК Госплана СССР. Перевоска части стока северных рек в бассейн реки Волги. Москва. «Союзгипроводхоз». 1982.

10. Жезмер В.Б., Бубер А.Л. Соответствие современных показателей гидроэкологического режима Низовьев Волги основным требованиям нерестового цикла рыб Волго-Каспийского рыбопромыслового подрайона // Природообустройство. 2018. № 5. С. 21-30. EDN: YRRVAD

11. Катунин Д.Н., Хрипунов И.А., Алехина Р.П. Экологизация попусков воды на Нижнюю Волгу // Рыбохозяйственные исследования на Каспии: Результаты НИР за 2000 год. Астрахань: КаспНИРХ, 2001. С. 33-38.

12. Астраханский вододелитель на реке Волге (Астраханская область) URL: <https://cruiseinform.ru> (дата обращения: 22.06.2026)

13. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N74-ФЗ (ред. от 29.12.2025) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2026)

14. Сметанин В.И., П.В. Кононов. Изучение влагоспособности гидрогеля «Aquatis» как аккумулятора влаги в корневом слое почвы // Орошаемое земледелие. 2026. № 1(52). С. 47-52.

Информация об авторах

Владимир Иванович Сметанин – д-р техн. наук, профессор, ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»; 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 PИИЦ 479685; Scopus Author ID57209792752; WOS Research ID A-8909-2016; shevchenko.v.a@yandex.ru

Хунас Каси – канд., техн. наук, доцент, Астраханский государственный технический университет; ORCID iD: 0009-0005-0830-9699; hkaci@yandex.ru

Вклад авторов

В.И. Сметанин – подготовка текста рукописи, выполнение расчетов, формулировка выводов.

В.А. Шевченко – редактирование рукописи.

Хунас Каси – подготовка графических материалов.

Поступила в редакцию / Received 11.04.2026

Поступила после доработки и рецензирования / Received 02.09.2026

Принята к публикации / Accepted 12.09.2026

Center for Combating Desertification and Mitigating the Effects of Drought named after N.F. Glazovsky. Moscow: MAKS Press, 2024. 205, [1] p.; ISBN 978-5-317-07154-7

6. Vaichulis G.V., Bystrova I.V., Smirnova T.S. Desertification of the lands of the southern regions of Russia. Possible ways of solving the problem. 2021. № 2 (2). P. 29-31. URL: <https://nvjournal.ru/article/39-opustinivanie-zemel-yuzhnikh-regionov-rossii-vo>. (дата последнего посещения 30.04.2025 г)

7. Report “On the ecological situation in the Astrakhan region in 2023”, Astrakhan, 2024 URL: <https://nvjournal.ru/article/39-opustinivanie-zemel-yuzhnikh-regionov-rossii-vo>.

8. Long-term monitoring and conservation of colonial water birds of the Northern Caspian Sea in connection with long-term fluctuations of the Caspian Sea level: [monograph] / [E.V. Rogacheva et al.; guest editors E.V. Rogachev, N.A. Litvinova; A.N. Severtsov Institute of Problems of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Astrakhan State Natural Biospheres Reserve. Moscow; Astrakhan: Volga, 2005. 270, [1] p., [14] p. col. ill.; ill., tabl.; 21 cm.; ISBN 5-98066-029-1.

9. Feasibility study, specified in 1982 on the basis of the remarks of the State Examination Committee of the State Planning Committee of the USSR. “Soyuzgiprovodkhoz”. 1982.

10. Zhezmer V.B., Buber A.L. Compliance of modern indicators of the hydroecological regime of the lower Volga with the main requirements of the spawning cycle of fish in the Volga-Caspian fishing subregion. Prirodoobustroystvo. 2018. No 5. P. 21-30. EDN: YRRVAD

11. Katunin D.N., Khripunov I.A., Alyokhina R.P. Ecologization of water releases on the Lower Volga // Fishery research on the Caspian: Results of research for 2000. Astrakhan: Casp-NIRKh, 2001. P. 33-38.

12. Astrakhan water divider on the Volga River (Astrakhan region) URL: <https://cruiseinform.ru> (accessed: 22.06.2026)

13. Water Code of the Russian Federation dated 03.06.2006 No. 74-FZ (as amended on 29.12.2025) (with amendments and additions, effective from 01.03.2026)

14. Smetanin V.I., P.V. Kononov. Study of the moisture capacity of the hydrogel “Aquatis” as a moisture accumulator in the root layer of soil. // Irrigated agriculture. 2026. № 1(52). P. 47-52.

Information about the authors

Vladimir I. Smetanin, DSs (Tech), Professor; Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov”; ORCID iD: 0009-0004-0134-1234; smetanin2000@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 PИИЦ 479685; Scopus Author ID57209792752; WOS Research ID A-8909-2016; shevchenko.v.a@yandex.ru

Hunas Kasi, CSs (Eng), Associate Professor, Astrakhan State Technical University; ORCID iD: 0009-0005-0830-9699; hkaci@yandex.ru

Contribution of the authors

V.I. Smetanin – preparation of the text of the manuscript, performing calculations – formulation of conclusions,

V.A. Shevchenko – manuscript editing.

Hunas Kasi – preparation of graphic materials.

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

Оригинальная статья

УДК 630*431.1

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-107-112>



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ОПАДА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А.В. Евграфов^{1✉}, А.В. Куриленко², А.С. Гузалов³, Д.А. Филимонов⁴

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

¹ labpoliv@list.ru; ORCID: 0000-0002-2313-2191

² a.kurilenko@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3661-1121

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

⁴ filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0006-5484-5334

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению энергии активации (E) и константы скорости реакции (k) опада сосны обыкновенной *Pinus sylvestris*. Цель исследований – изучение процессов термического разложения опада сосны методом термогравиметрического изотермического анализа для определения его кинетических характеристик и параметров. Лесные горючие материалы, ЛГМ, относятся к органическому биотопливу, в котором, как правило, содержится большое количество летучих веществ, которое, по данным различных исследований, составляет от 80 до 85%. Большую часть соснового опада составляют: кора – (74%) и шишки – (9%). При этом он содержит в своем составе такие вещества, как кремний, смола и поэтому практически не разлагается. Самовозгорание в опаде хвои может возникать при экзотермических условиях за счет его саморазогрева. Полученные данные на практике могут использоваться для расчетов индукционного периода, до возникновения процессов самовозгорания и вынужденного зажигания. Таким образом, процесс термической деструкции ЛГМ является в основном химическим преобразованием данных элементов под воздействием температур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-16-00015 (URL: <https://rscf.ru/project/26-16-00015/>).

Ключевые слова: опад сосны, возгорание, термогравиметрический анализ, лесные пожары, энергия активации

Формат цитирования: Евграфов А.В., Куриленко А.В., Гузалов А.С., Филимонов Д.А. Экспериментальное определение энергии активации опада сосны обыкновенной изотермическим методом. Природообустройство. 2026;Т.19(4):107-112. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-107-112>

Scientific article

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ACTIVATION ENERGY OF SCOTTS PINE LITTER BY ISOTHERMAL METHOD

A.V. Evgrafov^{1✉}, A.V. Kurilenko², A.S. Guzalov³, D.A. Filimonov⁴

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

¹ labpoliv@list.ru; ORCID: 0000-0002-2313-2191

² a.kurilenko@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3661-1121

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

⁴ filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0006-5484-5334

Abstract. This article presents the results of experimental studies to determine the activation energy (E) and reaction rate constant (k) of Scots pine (*Pinus sylvestris*) litter. The objective of the study was

to investigate the thermal decomposition of pine litter using thermogravimetric isothermal analysis to determine its kinetic characteristics and parameters. Forest fuels (FFM) are organic biofuels that typically contain a high amount of volatile substances, which, according to various studies, range from 80 to 85%. The majority of pine litter consists of: bark – (74%) and cones – (9%). At the same time, it contains substances such as silicon and resin, and therefore it practically does not decompose. Self-ignition in pine needle litter can occur under exothermic conditions due to its self-heating. The obtained data can be used in practice to calculate the induction period before spontaneous combustion and forced ignition occur. Thus, the thermal degradation of FFM is primarily a chemical transformation of these elements under the influence of temperature.

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 26-16-00015 (URL: <https://rscf.ru/project/26-16-00015/>)

Keywords: pine litter, ignition, thermographic analysis, forest fires, activation energy

Form of citation: Evgrafov A.V., Kurilenko A.V., Guzalov A.S., Filimonov D.A. Experimental determination of the activation energy of Scotts pine litter by isothermal method. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):107-112. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-107-112>

Введение. Причинами возникновения возгораний лесных массивов являются как антропогенные, так и природные факторы – такие, как сухие грозы, самовозгорание лесных горючих материалов (ЛГМ). Пожароопасность ЛГМ определяется значением энергии активации (E) кДж/моль. Данный параметр характеризует начальную энергию, при которой столкновение частиц вещества приводит к началу химической реакции, в нашем случае – к возникновению тления или горения, то есть это энергетический барьер, после преодоления которого запускается механизм реакции. Для различных веществ E , как правило, изменяется в пределах от 40-120 кДж/моль. Чем меньше энергия активации, тем выше скорость реакции и тем более высока вероятность возникновения возгораний при более низких температурах [1-3].

Следует отметить, что запасы фитомассы хвои в воздушно-сухом состоянии составляют 1,0-5,4 т/га. При этом следует учитывать, что опад распределяется по территории неравномерно и наблюдается местами в достаточно больших количествах.

Таким образом, хвоя содержится в достаточно больших количествах и составляет значительное процентное соотношение в лесных горючих материалах [4]. При этом количество веток диаметром до 3 мм, которые являются активным проводником процесса горения, составляет для сосны 30-40% от фитомассы хвои. Опад сосны содержит в своем составе такие вещества, как кремний, смолы, и поэтому практически не разлагается [5]. Следует отметить, что данный ЛГМ по классификации относится к первой группе проводников горения и характеризуется способностью к быстрому воспламенению. Процесс самовозгорания в опаде хвои может возникать при экзотермических

условиях за счет его саморазогрева. После небольших осадков, порядка 3-5 мм, данный лесной горючий материал высыхает и становится снова пожароопасным через несколько часов. Также при относительной влажности воздуха 45% и ниже в хвойных насаждениях создаются условия для высокой пожарной опасности.

Цель исследований: изучение процессов термического разложения ЛГМ методом термогравиметрического анализа для определения их кинетических характеристик и параметров.

Материалы и методы исследований. Опад хвои сосны для проведения экспериментальных исследований был отобран в Брянской области (рис. 1).

По среднегодовым значениям большую часть соснового опада составляют хвоя (74%), кора (17%) и шишки сосны (9%) [6], поэтому для проведения исследований была отобрана только хвоя.

При классической методике определения кинетических параметров термического разложения вещества как в изотермических, так и в неизотермических условиях, используются различные термографические установки (ТГ), выпускаемые промышленностью, в которых измельченное исследуемое вещество массой 5-12 мг загружается в инертный тигель (как правило, из корунда, алюминия, платины, керамики). Далее контейнер с образцом разогревается до заданной температуры, при которой изменение массы образца фиксируется термовесами. При проведении опытов выполняется измерение температуры тигля, причем считается, что температура вещества равна температуре контейнера ввиду его незначительного веса. Следует отметить, что такие условия соответствуют скорее промышленным условиям термического разложения материалов.

В реальных условиях нагревание лесных горючих материалов (ЛГМ) происходит иначе. При этом необходимо учитывать температуру самого вещества, в нашем случае – лесного горючего материала, а также начало термического разложения (деструкции) материала. Признаками термической деструкции, как правило, является появление газообразных продуктов – таких, как CO_2 , NO_x , CH_4 . Поэтому применение стандартных методик является в данном случае не совсем корректным.

Как отмечено выше, процесс самовозгорания лесных горючих материалов происходит в изотермических условиях, поэтому для определения кинетических параметров – таких, как константа скорости реакции и энергия активации, был выбран режим с постоянной температурой в термографической установке, смонтированной на базе сушильного шкафа СНОЛ-3,5 (рис. 2). При этом масса навески измерялась в граммах и была определена из рекомендаций по исследованиям превращений веществ в твердом состоянии – в частности, ЛГМ [7].

В тигель (рис. 3) загружались образцы предварительно отобранного и высушенного опада сосны при температуре 25°C в помещении. Отбор проб производился в 2026 г. сразу после схода снегового покрова.

В ходе проведения исследований в экспериментальной ТГ-установке задавался изотермический режим при постоянных температурах 90 и 120°C . Предварительные результаты испытаний показали, что более низкие температуры не активируют термическую деструкцию образцов, а при более высоких температурах разложение происходит до установления изотермического режима. Установка выдерживалась

при заданных температурах в течение не менее 60 мин, вместе с тиглем, после чего в него загружался образец опада сосны. В ходе эксперимента с помощью термопар контролировались температуры воздуха в сушильном шкафу, тигля и вещества, которые при изотермическом режиме должны быть равны, а также фиксировалось появление газообразных продуктов термической деструкции, определяемых с помощью газоанализатора. Взвешивание образцов лесного горючего материала производилось до эксперимента и после его завершения для определения массы ЛГМ, подвергшейся термическому разложению, на аналитических весах ACZET CY-513 с точностью до $0,001$ г.

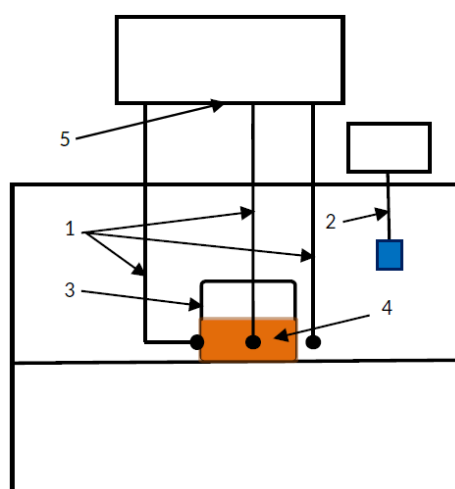


Рис. 2. Принципиальная схема термографической установки:

1 – термопары; 2 – пятикомпонентный газоанализатор; 3 – тигель из корунда 30×30 мм; 4 – опад сосны; 5 – регистратор температуры «ОВЕН»

Fig. 2. Schematic diagram of the thermographic installation, where:
1 – thermocouples; 2 – five-component gas analyzer;
3 – 30×30 mm corundum crucible;
4 – pine litter; 5 – OWEN temperature recorder



Рис. 1. Место отбора проб

Fig. 1. Photograph of the sampling site



Рис. 3. Фотография тигля из корунда 30×30 мм

Fig. 3. Photograph of a 30×30 mm corundum crucible

Эксперименты проводились в следующих вариантах:

1. Температура 90°C до прекращения выхода газообразных продуктов термической деструкции с целью определения общей массы реагирующих веществ в образце V_i' .

2. Температурный режим – 90°C до достижения максимальных показаний газоанализатора для определения массы прореагировавших веществ V_i за время τ .

Такие же опыты были проведены при температуре 120°C. Эксперименты проводились в трехкратной повторности.

Результаты и их обсуждение. Основой определения энергии активации является уравнение Аррениуса, которое в экспоненциальной форме записывается как

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

где k – константа скорости реакции; A – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная (8,341 Дж/моль К); T – абсолютная температура, К.

Существуют два способа экспериментального определения энергии активации: графический и аналитический [8, 9]. При аналитическом методе энергия активации веществ определяется по зависимости:

$$E = R \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{k_2}{k_1}, \quad (2)$$

где T_1, T_2 – температуры, при которых проводился эксперимент, °C; k_1, k_2 – константы скорости реакции при данных температурах.

Определить константу скорости реакции можно по математической зависимости:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = k \cdot (1 - \alpha)^n; \quad (3)$$

$$k = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \tau}\right) / (1 - \alpha)^n, \quad (4)$$

где α – степень разложения вещества; τ – время, с; n – порядок реакции.

Процесс термической деструкции летучих веществ, по данным ряда исследователей, является первым порядком реакции и описывается уравнением [10-12]:

$$\frac{\partial V_i}{\partial \tau} = k_i(T) \cdot (V_i' - V_i), \quad (5)$$

где $k_i(T)$ – константа скорости реакции выделения летучих веществ i ; V_i – масса выделившихся летучих веществ i за время τ , г; V_i' – эффективное значение летучих веществ i (общая масса летучих веществ в образце).

Степень разложения вещества определяется по уравнению:

$$\alpha = \frac{(M_0 - M_\tau)}{(M_0 - M_k)} = \frac{V_i}{V_i'}, \quad (6)$$

где M_0 – начальная масса образца, г; M_τ – масса образца через некоторый период времени, г; M_k – конечная масса образца, г.

Результаты экспериментальных исследований и расчета кинетических параметров опада хвой сосны представлены в таблице 1.

В таблице 2 приведена энергия активации некоторых пород древесины.

Из результатов анализа данных следует, что опад сосны обладает самой низкой энергией активации и является наиболее пожароопасным лесным горючим материалом

Таблица 1. Средние значения энергии активации и константы скорости реакции опада сосны

Table 1. Average values of activation energy and reaction rate constants of pine litter

№	Константа скорости реакции k_1 при 90°C, с ⁻¹	Константа скорости реакции k_2 при 120°C, с ⁻¹	Энергия активации E_0 , кДж/моль	Степень разложения α ,
1	$3,3 \cdot 10^{-12}$	$1,38 \cdot 10^{-11}$	56,764	$0 < \alpha \leq 0,44$

Таблица 2. Сравнительная энергия активации пород древесины на воздухе по модели Бройдо [13]

Table. 2. Comparative activation energy of wood species in air, according to the Broido model [13]

№	Порода древесины	Диапазон температур, °C	Энергия активации E_0 , кДж/моль	Степень разложения, α
1	Лиственница	174-329	98,14	$0 < \alpha \leq 0,43$
2	Сосна	144-319	86,67	$0 < \alpha \leq 0,38$
3	Ель	149-204	70,72	$0 < \alpha \leq 0,34$
4	Пихта	138-273	98,39	$0 < \alpha \leq 0,24$
5	Кедр	132-324	62,74	$0 < \alpha \leq 0,44$
6	Береза	153-319	115,20	$0 < \alpha \leq 0,45$
7	Осина	164-329	103,71	$0 < \alpha \leq 0,58$

Выводы

1. Опад хвой сосны содержится в достаточно больших количествах и составляет значительное процентное соотношение в лесных горючих материалах. Данный ЛГМ по классификации относится к первой группе проводников горения и характеризуется способностью к быстрому воспламенению.

2. При небольших осадках, порядка 3-5 мм, рассматриваемый лесной горючий материал высыхает и становится снова пожароопасным через несколько часов. Также при относительной влажности воздуха 45% и ниже в хвойных

насаждениях создаются условия высокой пожарной опасности.

3. Большую часть соснового опада составляют: кора – (74%) и шишки –(9%). При этом он содержит в своем составе такие вещества, как кремний, смола и поэтому практически не разлагается.

4. Самовозгорание в опаде хвой может возникать при экзотермических условиях за счет его саморазогрева. Полученное значение энергии активации 56,764 кДж/моль является достаточно небольшим и подтверждает высокую степень пожароопасности данного ЛГМ.

Список использованных источников

1. Braga R., Dulce M.A., Aquino F. Characterization and comparative study of pyrolysis kinetics of the rice husk and the elephant grass // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2013. № 11
2. Li L., Wang G., Wang S., Qin S. J Thermogravimetric and kinetic analysis of energy crop Jerusalem artichoke using distributed activation energy model // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2013. 13
3. Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment // *Fuel*. 2009. 10. 3.1
4. Лоскутов С.Р., Казарян Л.К., Петрунина Е.А., Анискина А.А. Термический анализ и пиролиз хвой сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* Ledeb.) // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2023. Т. 31, № 1. С. 49-59. DOI: 10.15372/KhUR2023438. EDN: LRWYBV
5. Гусев В.Г., Арцыбашев Е.С. Исследования Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства в области охраны лесов от пожаров // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2014. № 2. С. 56-73. EDN: SHRBQZ
6. Иванова Е.А., Исаева Л.Г. Динамика массы и состава древесного опада в сосняке Лапландского заповедника // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНИЦ РАН*. 2019. № 16. С. 211-215. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.043. EDN: CEYZEA
7. Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К. Термогравиметрическое и кинетическое исследование торфа и гидролизного лигнина // *Международный журнал экспериментального образования*. 2014. № 12. С. 20-27. EDN: TJYAEN
8. Микрюкова Е.Ю., Алишева Е.А. Экспериментальное определение энергии активации химической реакции в процессе изучения курса общей химии // *АНИ: педагогика и психология*. 2024. № 2 (47)
9. Lachter J., Bragg R.H., Close E. Graphical analysis of processes with multiple activation energies // *Journal of Applied Physics*. 1986. Vol. 60, № 5. Pp. 1841-1843. DOI: 10.1063/1.337230
10. Teng H., Lin H.-C., Ho J.-A. Thermogravimetric analysis on global mass loss kinetics of rice hull pyrolysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 36(1997)3974-3977
11. Nunn T.R., Howard J.B., Longwell J.P., Peters W.A. Product compositions and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood. *Industrial and engineering chemistry process design and development*. 24(1985)836-844
12. Lapuerta M., Hernandez J.J., Rodriguez J. Comparison between the kinetics of devolatilization of forestry and agricultural wastes from the middle-south regions of Spain. *Biomass and Bioenergy*. 31(2007)13-19

Reference

1. Braga R. Characterization and comparative study of pyrolysis kinetics of the rice husk and the elephant grass / R. Braga, M.A. Dulce, F. Aquino // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2013. № 11.
2. Li L. Thermogravimetric and kinetic analysis of energy crop Jerusalem artichoke using distributed activation energy model / L. Li, G. Wang, S. Wang, S. Qin J // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2013. No. 13.
3. Shen D.K. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment / D.K. Shen, S. Gu, K.H. Luo, A.V. Bridgwater, M.X. Fang // *Fuel*. 2009. No. 10. 3.1
4. Loskutov S.R., Kazaryan L.K., Petrunina E.A., Aniskina A.A.. Thermal analysis and pyrolysis of Scots pine needles (*Pinus sylvestris* Ledeb.) // *Chemistry for Sustainable Development*. 2023. Vol. 31, No. 1. P. 49-59. DOI: 10.15372/KhUR2023438. EDN: LRWYBV
5. Gusev V.G., Artsybashev E.S. Research of the St. Petersburg Research Institute of Forestry in the field of forest fire protection / V.G. Gusev, // *Transactions of the St. Petersburg Research Institute of Forestry*. 2014. No. 2. P. 56-73. EDN: SHRBQZ
6. Ivanova E.A., Isaeva L.G. Dynamics of the mass and composition of woody litter in the pine forest of the Lapland Nature Reserve // *Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KSC RAS*. 2019. No. 16. P. 211-215. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.043. EDN: CEYZEA
7. Maryandyshev P.A., Chernov A.A., V.K. Lyubov. Thermogravimetric and kinetic study of peat and hydrolytic lignin // *International journal of experimental education*. 2014. No. 12. P. 20-27. EDN: TJYAEN
8. Mikryukova Elena Yuryevna, Alisheva Evgeniya Andreevna / Experimental determination of the activation energy of a chemical reaction in the process of studying a general chemistry course // *ANI: pedagogy and psychology*. 2024. No. 2 (47),.
9. Lachter J., Bragg R.H., Close E. Graphical analysis of processes with multiple activation energies // *Journal of Applied Physics*. 1986. Vol. 60, No. 5. P. 1841-1843. DOI: 10.1063/1.337230.
10. H. Teng H.-C. Lin J.-A. Ho. Thermogravimetric analysis on global mass loss kinetics of rice hull pyrolysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 36 (1997) 3974-3977.
11. T.R. Nunn, J.B. Howard, J.P. Longwell, W.A. Peters. Product compositions and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood. *Industrial and engineering chemistry process design and development* 24 (1985) 836-844.
12. M. Lapuerta, J.J. Hernandez, J. Rodriguez. Comparison between the kinetics of devolatilization of forestry and agricultural wastes from the middle-south regions of Spain. *Biomass and Bioenergy* 31 (2007) 13-19.

13. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесобразующих пород Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2015. № 6. С. 17-30. DOI: 10.15372/SJFS20150602. EDN: VKGQAL

13. Loskutov S.R. Thermal analysis of wood of the main forest-forming species of Central Siberia / S.R. Loskutov, O.A. Shapchenkova, A.A. Aniskina // Siberian Forestry Journal. 2015. No. 6. P. 17-30. DOI: 10.15372/SJFS20150602. EDN: VKGQAL

Информация об авторах

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

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

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

Дмитрий Александрович Филимонов, канд. техн. наук; ORCID: 0009-0006-5484-5334; filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru

Information about the authors

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

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

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

Dmitry A. Filimonov, CSs (Tech), ORCID: 0009-0006-5484-5334, authorid: 1251247; filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru

Вклад авторов

А.В. Евграфов – общее научное руководство исследованиями, привлечение финансирования (руководитель гранта РНФ № 26-16-00015), утверждение окончательного текста статьи.

А.В. Куриленко – работа с источниками литературы по пожароопасности свойств ЛПМ, участие в анализе результатов и оформлении библиографического списка.

А.С. Гузалов – обработка первичных данных с газоанализатора и регистратора ОВЕН, участие в написании раздела «Материалы и методы».

Д.А. Филимонов – обеспечение работы измерительного оборудования, статистическая обработка результатов экспериментов, участие в визуализации данных и подготовке графических материалов.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Поступила в редакцию / Received 18.05.2026

Поступила после рецензирования / Received 23.06.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 23.06.2026

Contribution of the authors

A.V. Evgrafov – general scientific management of the research, fundraising (head of the RSF grant No 26-16-00015), approval of the final text of the article.

A.V. Kurylenko – work with literature sources on the fire hazard properties of FFM, participation in the analysis of the results and the design of the bibliographic list.

A.S. Guzalov – processing of primary data from the OWEN gas analyzer and recorder.

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

Оригинальная статья

УДК 630*524.4:528.88

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-113-123>



ОЦЕНКА ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ПОВЫДЕЛЬНОЙ ОСНОВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.В. Мироненко¹, В.А. Славский^{2✉}, Д.А. Литовченко³

^{1,2,3} Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Российская Федерация

¹ alexeymironenko66@gmail.com; ORCID: 0000-0002-9701-3822;

² slavskiyva@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-6579-0344;

³ timashchuk90@mail.ru; ORCID: 0000-0003-2973-7447

Аннотация: Представлена усовершенствованная методика мониторинга состояния лесных экосистем на основе анализа временных рядов вегетационных индексов (на примере индекса EVI) по данным дистанционного зондирования Земли. В данной работе использованы материалы спутниковой съемки Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м. Ключевая особенность – использование в качестве территориальной единицы при оценке состояния насаждений лесотаксационных выделов. Это существенно повысит значимость получаемых результатов и позволит принимать оперативные управленческие решения в области охраны, защиты и воспроизводства лесов. Методический подход базируется на применении статистического анализа при определении адаптивных пороговых значений вегетационных индексов, рассчитываемых индивидуально для каждого временного периода на основе t-распределения Стьюдента. Апробация методики на территории Пригородного лесничества Воронежской области (2041 выдел) выявила устойчивый негативный тренд: доля таксационных выделов с отрицательной динамикой состояния насаждений возросла с 12.6% (2020-2022 гг.) до 40.7% (2020-2025 гг.), тогда как доля участков с положительной динамикой сократилась с 27.7% (2020-2022 гг.) до 2.5% (2020-2025 гг.). Выявлено 203 выдела (9.9%), требующих первоочередного обследования, где снижение жизнеспособности насаждения превысило пороговое значение (критическое снижение EVI). Наиболее уязвимыми оказались дубовые низкоствольные насаждения (44%) и мягколиственные породы (37%). При верификации данных ДЗЗ с материалами натурного обследования выявлено высокое сходство полученных результатов. Отмечено, что снижение значений вегетационных индексов может быть связано как с деградационными процессами, так и с плановыми рубками ухода. Предложенный подход может быть интегрирован в региональные системы экологического мониторинга для раннего выявления участков с аномальной динамикой состояния растительности.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FZUR-2024-0002) по теме «Разработка технологических решений, направленных на повышение эффективности лесопожарного мониторинга и детализацию оценки последствий лесных пожаров в условиях Центральной лесостепи».

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, лесные экосистемы, EVI, Sentinel-2, лесотаксационные выделы, адаптивные пороговые значения, t-распределение Стьюдента, охрана окружающей среды

Формат цитирования: Мироненко А.В., Славский В.А., Литовченко Д.А. Оценка динамики состояния лесных экосистем на повывдельной основе с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Природообустройство. 2026;Т.19(4):113-123. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-113-123>

Original article

ASSESSMENT OF THE STATE OF FOREST ECOSYSTEMS ON A ROUTINE BASIS USING REMOTE SENSING DATA

A.V. Mironenko^{1✉}, V.A. Slavskiy², D.A. Litovchenko³

^{1,2,3} Voronezh state university of forestry and technologies named after G.F. Morozov; Voronezh, Russian Federation

¹ alexeymironenko66@gmail.com; ORCID: 0000-0002-9701-3822

² slavskiyva@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-6579-0344

³ timashchuk90@mail.ru; ORCID: 0000-0003-2973-7447

Abstract. This paper presents an improved methodology for monitoring forest ecosystem health based on the analysis of time series of vegetation indices (using the EVI index as an example) using Earth remote sensing data. This study utilizes Sentinel-2 satellite imagery with a spatial resolution of 10 m. A key feature is the use of forest inventory stands as a territorial unit for assessing forest health. This significantly increases the significance of the results obtained and enables prompt management decisions regarding forest conservation, protection, and restoration. The methodological approach utilizes statistical analysis to determine adaptive threshold values for vegetation indices, calculated individually for each time period using Student's t-distribution. Testing of the methodology in the Prigorodnoye Forestry of the Voronezh Region (2041 forest plots) revealed a persistent negative trend: the share of forest plots with negative dynamics in stand condition increased from 12.6% (2020-2022) to 40.7% (2020-2025), while the share of plots with positive dynamics decreased from 27.7% (2020-2022) to 2.5% (2020-2025). A total of 203 forest plots (9.9%) were identified as requiring priority inspection, where the decline in stand viability exceeded the threshold value (critical decrease in EVI). The most vulnerable were low-stem oak stands (44%) and softwood deciduous trees (37%). Verification of remote sensing data with in-situ survey materials revealed a high similarity between the obtained results. It was noted that the decrease in vegetation index values may be associated with both degradation processes and planned thinning. The proposed approach can be integrated into regional environmental monitoring systems for the early detection of areas with abnormal vegetation dynamics.

The work was carried out within the framework of the implementation of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FZUR-2024-0002) on the topic “Development of technological solutions aimed at increasing the efficiency of forest fire monitoring and detailing the assessment of the consequences of forest fires in the Central Forest-Steppe.”

Keywords: remote monitoring, forest ecosystems, EVI, Sentinel-2, forest inventory compartments, adaptive threshold values, Student's t-distribution, environmental protection

Format of citation: Mironenko A.V., Slavskiy V.A., Litovchenko D.A. Assessment of the state of forest ecosystems on a routine basis using Earth remote sensing data. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):113-123. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-113-123>

Введение. Лесные экосистемы играют ключевую роль в глобальном углеродном цикле, сохранении биоразнообразия лесных ресурсов и стабилизации климатических процессов. Однако в условиях постоянно возрастающего антропогенного прессинга и интенсификации климатических изменений, леса подвергаются масштабной деградации, выражающейся в снижении их продуктивности, усыхании и нарушении структуры древостоев. Оперативное отслеживание и регистрация текущих изменений в лесных насаждениях, а также прогнозирование состояния лесов и динамики основных таксационных характеристик лесного фонда является ключевой задачей проведения лесного мониторинга [1], что имеет первостепенное значение для своевременного выявления

негативных процессов и принятия обоснованных управленческих решений.

Следует отметить, что традиционные наземные методы таксации обеспечивают высокую точность локальных оценок, но ограничены по площади, трудоемки и не позволяют проводить непрерывный мониторинг на региональном и глобальном уровнях [2]. В связи с этим ведущую роль в мониторинге состояния лесов заняли методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые предоставляют широкие возможности для непрерывной оценки состояния растительного покрова. Ряд авторов отмечает высокую эффективность использования пространственной информации, получаемой на основе спутниковых мультиспектральных данных Sentinel-2 [3, 4, 5, 6 и др.].

Известно, что индексы вегетации, прежде всего NDVI и EVI, достоверно отражают изменения состояния и структуры насаждений [7], что делает их пригодными для диагностики фотосинтетической активности [8]. Однако NDVI имеет ряд ограничений, включая быструю насыщаемость в лесах с высокой сомкнутостью полога и повышенную чувствительность к атмосферным помехам [9]. В частности, значения NDVI не позволяют отличить отражательную способность деревьев от отражательной способности травы, даже с учетом кардинально разного объема фитомассы [10]. Кроме того, отмечается зависимость значений индекса NDVI от типа леса, а также от пространственного разрешения снимков [11]. В отличие от NDVI, EVI менее подвержен насыщению в сомкнутых древостоях и включает коррекцию атмосферного влияния, что делает его предпочтительным для анализа состояния лесных экосистем [12, 13].

Важно отметить, что данные лесоустройства – векторные слои лесотаксационных выделов – остаются недостаточно востребованными в системах спутникового мониторинга, хотя именно они являются основной учетной единицей лесного хозяйства. Использование выделов в качестве единиц анализа позволяет преодолеть разрыв между данными ДЗЗ и практическими потребностями лесоправления.

Еще одна методическая проблема связана с определением пороговых значений для выявления степени деградации насаждений. Традиционный подход, основанный на предположении о нормальности распределения изменений значений вегетационных индексов ($\mu \pm k\sigma$), не всегда корректен [14, 15], поскольку эмпирические распределения ΔEVI часто характеризуются асимметрией и относятся к классу субэкспоненциальных (т.е. модель имеет «тяжелые хвосты»). Это требует применения более гибких статистических моделей при выявлении нарушения лесного насаждения, рассчитываемых на основе статистического распределения, наилучшим образом описывающего эмпирические данные.

Учитывая вышесказанное, определена **цель исследования**: разработка и апробация методики мониторинга состояния лесного фонда, с применением временных рядов EVI на повыделной основе.

Материалы и методы исследований. Исследование проводилось на территории Животиновского участкового лесничества Пригородного лесничества Воронежской области, расположенного в лесостепной зоне. В качестве картографической основы использовались векторные

материалы лесоустройства (цифровые планшеты), предоставленные Министерством лесного хозяйства Воронежской области. Исходный векторный слой включал 2041 полигон (выдел) с атрибутивной информацией о таксационных характеристиках древостоя, на который впоследствии накладывались остальные тематические слои.

В качестве исходных пространственных данных использованы мультиспектральные снимки спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B (уровень обработки Level-2A, включающий атмосферную коррекцию). Отбор снимков осуществлялся в пределах вегетационного периода (август) 2020, 2022, 2023 и 2025 годов с допустимой облачностью не более 10-15%. Для каждого временного среза выполнялся расчет вегетационного индекса EVI с последующим извлечением средних значений по каждому выделу, методом зональной статистики. Для оценки динамики вычислялись разности $\Delta EVI = EVI_{t_2} - EVI_{t_1}$, где t_1 – базовый 2020 год, а t_2 – 2022, 2023 и 2025 соответственно.

Статистическая обработка выполнена на языке Python (с использованием библиотек SciPy и Scikit-learn [16, 17]). Для каждого интервала проводился анализ соответствия эмпирического распределения ΔEVI теоретическим моделям: нормальному, t-распределению Стьюдента, Коши, а также смесью нормальных распределений. Качество подгонки моделей оценивалось по информационному критерию Акаике (AIC). На основе наилучшей модели определялись пороговые значения, соответствующие 2,5% и 97,5% квантилям (95%-й интервал нормы), с последующим введением корректирующего коэффициента 0,7 [18].

Результаты и обсуждение. Общая динамика состояния растительности на исследуемой территории отражает реакцию лесных массивов на антропогенную нагрузку и климатические изменения. Для комплексной оценки состояния лесных экосистем принципиально важно отслеживать многолетние изменения количества их фитомассы, что достигается при проведении экологического мониторинга на дистанционной основе.

При долгосрочном наблюдении выявляются точки критического снижения продуктивности насаждений и способность экосистемы к восстановлению. В частности, анализ средних по участковому лесничеству значений EVI выявил устойчивый негативный тренд (табл. 1).

После относительной стабильности в период 2020-2022 гг., начиная с 2023 года фиксируется прогрессирующее снижение индекса: с 0,3206 в 2020 г. до 0,3009 в 2025 г. (общая отрицательная динамика составила –6,1%).

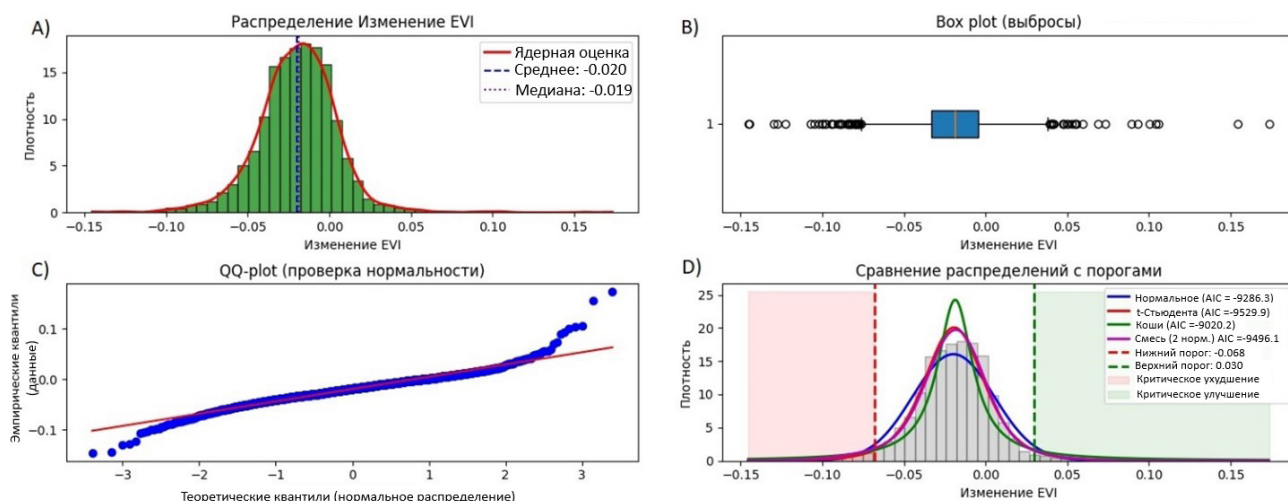
Таблица 1. Средние статистические значения EVI по Животиновскому участковому лесничеству за период 2020-2025 гг.

Table 1. Average statistical values of EVI for the Zhivotynovskoe district forestry for the period 2020-2025

Год	Среднее значение EVI	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент изменчивости, %
2020	0,3206	0,0926	28,8
2022	0,3259	0,0896	26,6
2023	0,3139	0,0883	28,1
2025	0,3009	0,0828	27,5

Наблюдаемое уменьшение абсолютных значений стандартного отклонения (с 0,0926 до 0,0828) происходит сонаправлено со снижением среднего индекса. При этом коэффициент изменчивости на протяжении всего периода удерживается в пределах 26,6-28,8%, что указывает на сохранение стабильной неоднородности состояния растительного покрова. Это свидетельствует о том, что негативные процессы носят масштабный (общетерриториальный) характер и затрагивают лесной массив относительно равномерно.

Для объективного разделения естественных колебаний вегетации и реальных деструктивных процессов, происходящих в лесном насаждении, необходимо надежное статистическое обоснование пороговых значений изменений вегетационных индексов. Такой подход позволяет выявить естественную реакцию древостоев, вызванную сезонными или климатическими факторами. С этой целью проведен комплексный статистический анализ изменений ΔEVI за период 2020-2025 гг. (рис. 1).

Рис. 1. Статистический анализ распределения изменений значений вегетационного индекса EVI (ΔEVI) за период 2020-2025 гг.

А – ядерная оценка плотности (для визуального сравнения с теоретическими распределениями и выбора наилучшей модели на основе критерия AIC);

В – диаграмма размаха (медиана –0,019, интерквартильный размах от –0,033 до –0,005);

С – Q-Q график для проверки нормальности распределения;

Д – гистограмма эмпирического распределения с теоретическими кривыми: нормальное (AIC= –9286,3), t-Стюдента (AIC= –9529,9), Коши (AIC= –9020,2), смесь двух нормальных (AIC= –9496,1). Вертикальные линии – пороговые значения критического ухудшения (–0,068) и улучшения (0,030) состояния растительности.

Fig. 1. Statistical analysis of the distribution of changes in the EVI vegetation index (ΔEVI) for the period 2020-2025

A – nuclear density estimation (for visual comparison with theoretical distributions and selection of the best model based on the AIC criterion);

B – range diagram (median –0.019, interquartile range from –0.033 to –0.005);

C – Q-Q schedule to check the normality of the distribution;

D is a histogram of the empirical distribution with theoretical curves: normal (AIC= –9286.3), t-Student's (AIC= –9529.9), Cauchy (AIC= –9020.2), a mixture of two normal (AIC= –9496.1). Vertical lines are the threshold values of critical deterioration (–0.068) and improvement (0.030) of vegetation condition.

Распределение t-Стьюдента демонстрирует наилучшее соответствие эмпирическим данным, обладая наименьшим информационным критерием Акаике ($AIC = -9529,9$) [19]. Это подтверждается характерным S-образным отклонением точек на Q-Q графике (рис. 1C) от теоретической прямой нормального распределения, что указывает на наличие «тяжелых хвостов». Наличие таких «хвостов» и выраженной эксцессивности распределения наглядно иллюстрируется диаграммой размаха (рис. 1B), где фиксируется значительное количество экстремальных выбросов. Сдвиг медианы в отрицательную область ($-0,019$) и асимметрия распределения в сторону критического порога ухудшения ($-0,068$, рис. 1D) свидетельствуют о преобладании деградиционных процессов над восстановительными на уровне отдельных пикселей (выделов) исследуемой территории.

Для того чтобы строго аргументировать неприменимость стандартных статистических методов и подтвердить аномальный характер данных, была проведена проверка на нормальность распределения. Тест Шапиро-Уилка [20] подтвердил статистически значимое отклонение эмпирических распределений от нормального для всех рассматриваемых периодов ($p < 0,001$). Сравнение критериев АИС (табл. 2) показывает безусловное преимущество t-распределения Стьюдента.

На основе параметров аппроксимирующих t-распределений рассчитаны адаптивные пороги выявления изменений индекса EVI, что может считаться критическим ухудшением состояния насаждений. Использование классического подхода ($\mu \pm 2\sigma$) без учета «тяжелых хвостов» распределения дало бы для 2025 года заниженный по модулю порог ($0,030$), что привело бы к ложноположительному пропуску существенной части мелкомасштабных нарушений растительного покрова.

Классификация состояния насаждений проводилась по следующей схеме:

Критическое ухудшение: $\Delta EVI < - (K)$;

Умеренное ухудшение: $-(K) \leq \Delta EVI < -(Y)$;

Стабильное состояние: $-(Y) \leq \Delta EVI \leq + (Y)$;

Умеренное улучшение: $+(Y) < \Delta EVI \leq + (K)$;

Критическое улучшение: $\Delta EVI > + (K)$;

где, (K) – критический порог; (Y) – умеренный порог.

Поскольку негативный тренд во времени нарастает (из-за засухи или распространения вредителей), распределение «размывается». Адаптивный порог гибко подстраивается под меняющуюся дисперсию значений вегетационных индексов и форму распределения конкретного периода. Это позволяет отделять естественный «фоновый шум» колебаний вегетации от реальных аномальных нарушений (вырубок, пожаров, усыхания древостоя).

Для детального понимания происходящих процессов важно определить не только общую тенденцию, но и пространственные масштабы и структуру изменений. Это позволяет локализовать наиболее уязвимые участки леса и выявить конкретные очаги деградации, скрытые внутри общих усредненных показателей. С этой целью классификация изменений ΔEVI с использованием рассчитанных порогов позволила оценить динамику состояния лесного фонда (табл. 3).

Анализ динамики распределения площадей по категориям состояния (табл. 3) подтверждает резкую деградацию растительного покрова Животиновского участкового лесничества. За пятилетний период доля выделов со снижением индекса EVI выросла более чем в три раза: с 12,6% (2020-2022 гг.) до 40,7% (2020-2025 гг.). Напротив, доля насаждений с положительным трендом значений индексов вегетации катастрофически сократилась – с 27,7% до 2,5%. Доля стабильных выделов, достигнув пика в 2023 году (61,3%), к 2025 году снизилась до 56,7% за счет их трансформации в категорию умеренного ухудшения. К 2025 году выявлено 203 выдела критического снижения EVI (9,9% от общей выборки). В разрезе преобладающих пород наибольший объем нарушений приходится на дуб низкоствольный – 89 выделов (43,8%), осину – 42 (20,7%) и берёзу – 36 (17,7%).

По классам возраста критическому ухудшению состояния наиболее подвержены средневозрастные насаждения (III-IV классы) – 89 выделов (43,8%) и приростающие древостои – 51 выдел (25,1%); на долю молодняков пришлось 13,8% (28 выделов), спелых и перестойных – 17,2% (35 выделов).

Таблица 2. Сравнение качества аппроксимации распределений ΔEVI (AIC)

Table 2. Comparison of the quality of approximation of ΔEVI distributions (AIC)

Период	Нормальное	t-распределение Стьюдента	Коши	Смесь нормальных
2020-2022	-9998,2	-10208,2	-9713,4	-10154,3
2020-2023	-9356,8	-9534,9	-8999,5	-9343,9
2020-2025	-9286,3	-9529,9	-9020,2	-9496,1

Таблица 3. Распределение выделов по категориям изменения ΔEVI , шт. (%)Table 3. Distribution allocations by categories of ΔEVI change, pcs. (%)

Категория изменения	2020-2022 гг.	2020-2023 гг.	2020-2025 гг.
Критическое ухудшение	68 (3,3%)	169 (8,3%)	203 (9,9%)
	(K) = -0,042	(K) = -0,045	(K) = -0,052
Умеренное ухудшение	190 (9,3%)	405 (19,8%)	629 (30,8%)
	(Y) = -0,021	(Y) = -0,0225	(Y) = -0,026
Всего ухудшение	258 (12,6%)	574 (28,1%)	832 (40,7%)
Стабильное состояние	1219 (59,7%)	1252 (61,3%)	1158 (56,7%)
Умеренное улучшение	418 (20,5%)	161 (7,9%)	35 (1,7%)
	(Y) = 0,021	(Y) = 0,0225	(Y) = 0,026
Критическое улучшение	146 (7,2%)	54 (2,6%)	16 (0,8%)
	(K) = 0,042	(K) = 0,045	(K) = 0,052
Всего улучшение	564 (27,7%)	215 (10,5%)	51 (2,5%)

Пространственный анализ (рис. 2) показал, что участки с критическим ухудшением состояния растительности (красный цвет) формируют как крупные очаговые скопления в центральной и восточной частях Животиновского участкового лесничества Пригородного лесничества, так и фрагментированные мелкоконтурные выделы на западе. Подавляющая часть исследуемой

территории находится в зоне фоновых изменений (желтый цвет), что согласуется с ранее сделанным выводом о масштабном характере общеклиматического стресса.

Важно подчеркнуть, что снижение значений EVI может быть обусловлено не только деградационными процессами (повреждение болезнями и вредителями, пирогенное воздействие

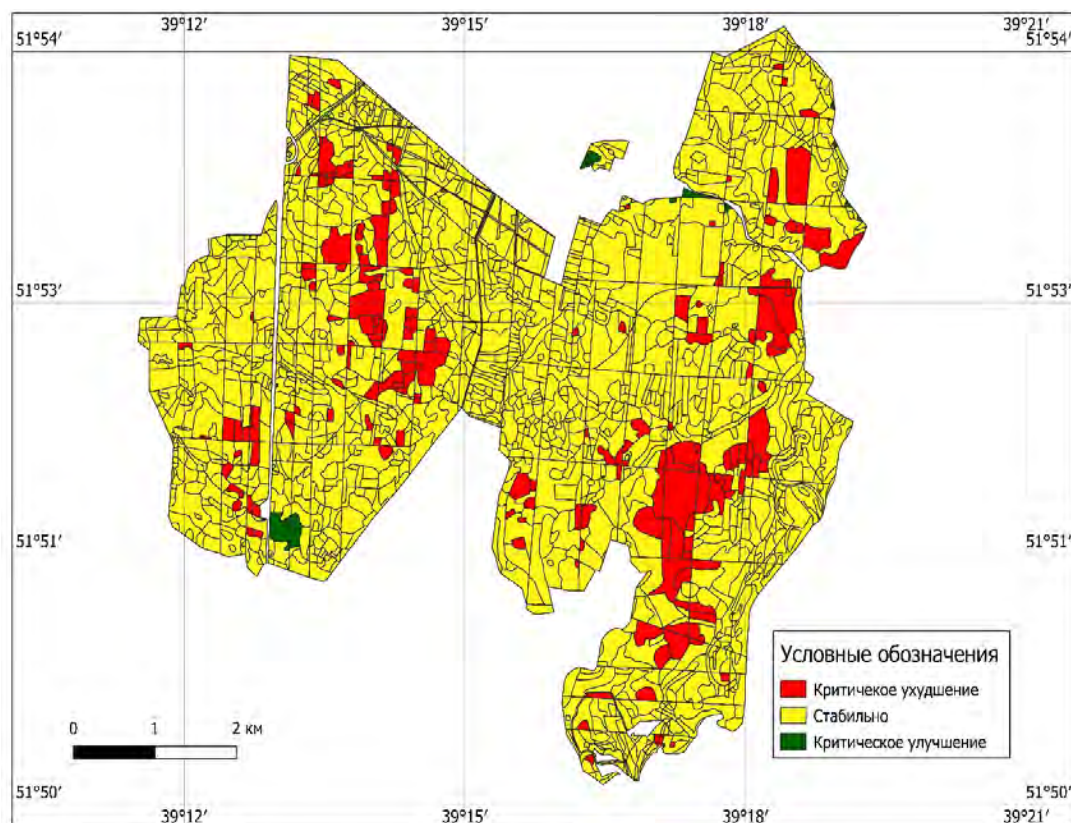


Рис. 2. Пространственное распределение участков с критическим изменением ΔEVI за период 2020-2025 гг. (красный – критическое ухудшение, зелёный – критическое улучшение, жёлтый – фоновые изменения)

Fig. 2. Spatial distribution of areas with critical changes in ΔEVI for the period 2020-2025 (red – critical deterioration, green – critical improvement, yellow – background changes)

и т.д.), но и плановыми лесохозяйственными мероприятиями – например рубками ухода, назначенными при лесоустройстве.

В рамках данного исследования мы выполнили верификацию результатов, полученных с использованием ДЗЗ по материалам натурного обследования. Из 203 участков с выявленным критическим снижением EVI, мы остановились на 5 выделах, требующих первоочередного натурного обследования – имеющих наибольшее изменение значения вегетационного индекса. При этом лесные участки, в которых за последние 5 лет были проведены рубки ухода исключались из анализа. Сравнение результатов натурного обследования (табл. 4) выполнено на основе материалов последнего лесоустройства территории Пригородного лесничества (2012 г), с учетом актуализации состояния и структуры лесных участков, проведенной авторами в 2019 г.

Результаты верификации показали, что все обследованные участки находятся в фазе активного распада древостоя или имеют высокую степень захламленности валежной древесины, что полностью коррелирует с зафиксированным снижением EVI.

Обсуждение. Разработанная методика, основанная на использовании t-распределения Стьюдента для определения адаптивных порогов EVI, подтверждает вывод о ненормальном распределении изменений индекса в лесных экосистемах, что согласуется с работами, указывающими на высокую вариабельность спутниковых данных [21]. Выявленное снижение среднего значения EVI подтверждают тенденции деградации лесов, отмеченные в исследованиях по мониторингу Sentinel-2 в схожих климатических условиях [22].

В отличие от классического подхода ($\mu \pm 2\sigma$), предложенный метод позволяет более точно отделить естественные изменения, происходящие в насаждениях от антропогенных или климатически обусловленных нарушений, что критически важно для выделов с низкой исходной биомассой [23]. Так, J. Qi (et al.) [24] подробно проанализировали ограничения классического порогового подхода ($\mu \pm 2\sigma$) при выявлении аномалий в динамике спектральных характеристик растительности. Авторы отметили, что такой способ даёт приемлемые результаты лишь при краткосрочном мониторинге, но приводит к ложным

Таблица 4. Верификация таксационных показателей древостоя на обследованных участках с критическим снижением индекса EVI на основе актуализированных материалов лесоустройства (Животиновское участковое лесничество Пригородное лесничество)

Table 4. Verification of forest stand taxation indicators in surveyed areas with a critical decrease in the EVI index based on updated forest management materials (Zhivotynovskoe district forestry Suburban forestry)

Квартал/выдел	Источник информации	Таксационные показатели древостоя				
		состав	полнота	запас сыр., м ³ /га	запас сух., м ³ /га	запас валежа, м ³ /га
22/18	материалы л/у*	4Яов3Днп2Лп1Кло	0,9	250	0	20
	натурное обслед.	6Лп4Кло+Днп	0,65	130	180	30
	Δ (абсолютное/%)		0,25/28	120/48	180/-	10/50
22/26	материалы л/у*	4Яов3Кло2Днп1Лп	0,6	180	10	0
	натурное обслед.	3Днп4Кло2Лп1Ос	0,5	150	70	20
	Δ (абсолютное/%)		0,1/17	30/17	60/700	20/-
22/30	материалы л/у*	3Днп3Яов2Кло2Лп	0,7	240	20	0
	натурное обслед.	4Днп3Кло3Лп	0,55	150	100	30
	Δ (абсолютное/%)		0,15/21	90/37	80/500	30/-
61/6	материалы л/у*	6Днп2Яов2Лп+Кло	0,7	250	20	30
	натурное обслед.	5Днп4Лп1Кло	0,65	210	60	50
	Δ (абсолютное/%)		0,05/7	40/16	40/300	20/67
68/29	материалы л/у	5Ос4Олч1Днп+Яов	0,5	190	0	10
	натурное обслед.	4Ос4Олч1Днп1Лп	0,4	140	50	40
	Δ (абсолютное/%)		0,1/20	50/26	50/-	30/400

* – материалы лесоустройства 2012 г, с актуализацией состояния насаждения, проведенной в 2019 г.

срабатываниям при длительных наблюдениях, поскольку не учитывает «тяжёлые хвосты» используемых моделей распределения и нелинейный характер шумов, возникающих из-за внешних факторов экосистемы. С аналогичными проблемами столкнулись и S. Miguel (et al.) [25]: применение классического подхода для оценки состояния лесов Испании привело к систематическим ошибкам при выделении участков деградации.

Полученные результаты указывают на высокую чувствительность установленных адаптивных пороговых значений к локальным изменениям, обеспечивая более точную оценку состояния лесного фонда по сравнению с традиционными методами. Использование индекса EVI в нашем исследовании позволило нивелировать влияние почвенного фона и атмосферной дымки. Это согласуется с методологическими подходами, предложенными при использовании данного индекса для долгосрочного анализа динамики антропогенно измененных ландшафтов [26] и высокоточного дешифрирования состояния древостоев [27].

В условиях климатического стресса (засухи) низкоствольные порослевые дубравы вследствие поражения хроническими болезнями (опенком, мучнистой росой и т.д.) подвержены усыханию, что, как показано в нашей работе, моментально отражается на EVI. Выявленная тенденция согласуется с результатами О.Н. Воробьева (с соавт.) [28], проводившими исследования в условиях Среднего Поволжья.

A.R. Ives (et al.) [29] в своих исследованиях пришли к выводу, что без учёта данных о лесохозяйственных мероприятиях и корректного анализа пространственно-временной автокорреляции, интерпретация изменений EVI может приводить к ложным данным о деградации насаждений. При этом, отмечается необходимость наземной верификации для разделения естественных и антропогенных причин изменений вегетационного индекса [30, 31].

Таким образом, полученные нами результаты не только согласуются с существующими научными данными, но и дополняют их, предлагая адаптированную методику для оперативного выявления деградирующих лесных участков с учётом региональных особенностей. При этом уникальность методики, ориентированной на повыдельную основу, сложно переоценить для принятия оперативных управленческих решений в лесном хозяйстве. Дальнейшее развитие методики предполагает интеграцию слоев фактических рубок и данных государственного лесного реестра для автоматического разделения антропогенных и деградационных нарушений.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана и апробирована методика мониторинга лесных экосистем, основанная на анализе временных рядов EVI по спутниковым данным Sentinel-2 с использованием в качестве единицы анализа лесотаксационных выделов и применением адаптивных пороговых значений, рассчитанных на основе t-распределения Стьюдента.

Основные выводы:

1. Методическая новизна. Статистически доказано ($p < 0,001$, критерий AIC), что распределение изменений EVI в лесных экосистемах значительно отличается от нормального и наилучшим образом аппроксимируется t-распределением Стьюдента. Использование классического подхода ($\mu \pm 2\sigma$) приводит к систематическим ошибкам. Предложенный метод расчета адаптивных порогов обеспечивает более надежное выделение аномалий.

2. Динамика состояния лесного фонда. За период 2020-2025 гг. на исследуемой территории зафиксирована существенная трансформация лесной растительности. Среднее значение EVI снизилось с 0,3206 до 0,3009 (–6,1%). Доля участков с отрицательной динамикой возросла до 40,7%, тогда как доля участков с положительной динамикой сократилась до 2,5%.

3. Участки, требующие первоочередного внимания. Идентифицировано 203 участка критического снижения EVI (9,9% от общего количества выделов), которые должны быть обследованы в первую очередь. В их структуре преобладают дубовые низкоствольные насаждения (43,8%) и мягколиственные породы (38,4%), по возрасту доминируют средневозрастные насаждения (43,8%).

4. Снижение значений EVI может быть обусловлено как негативными процессами, так и плановой хозяйственной деятельностью (рубки ухода, санитарные рубки). В связи с этим проведена верификация полученных результатов на территории выделов с критическим ухудшением состояния по материалам натурного обследования. При уточнении причин изменения состояния выявлено, что все обследованные участки находятся в фазе активного распада древостоя, что полностью коррелирует с зафиксированным снижением EVI. Основные причины изменения индекса EVI при ухудшении состояния насаждений – снижение сомкнутости полога (полноты) древостоя; высокая степень захламливаемости лесного участка валежной древесиной; массовое усыхание насаждений и накопление запаса сухостоя.

5. Практические рекомендации. Для организации системы оперативного реагирования предлагается использовать адаптивные пороги (для 2025 г. – порог 0,048) с целью выявления выделов с критическим ухудшением состояния и оперативного назначения на них целевых лесохозяйственных мероприятий. Кроме того, следует внедрить ежегодное обновление цифровых карт

состояния растительности на основе предложенной методики.

Предложенный подход может быть рекомендован для интеграции в региональные системы экологического мониторинга как инструмент раннего выявления участков с аномальной динамикой, требующих наземного обследования.

Список использованных источников

1. Положение о лесном мониторинге № МГ-1-17-6/287 от 29.11.95 г. Федеральная служба лесного хозяйства России // <https://docs.cntd.ru/document/9017780>
2. Славский В.А., Матвеев С.М. Некоторые аспекты закладки пробных площадей при проведении государственной инвентаризации лесов // *Лесотехнический журнал*. 2021. Т. 11, № 1(41). С. 56-63. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/5
3. Živaljević B., Sutanto S.J., Paparrizos S., Mesaroš M., Mimić G. Within-season crop yield prediction in the Vojvodina Province (Serbia) using Sentinel-2 satellite vegetation indices // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2026. Volume 43. 102192. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2026.102192>
4. Son N.-T., Chen Ch.-F., Cheng Y.-S., Toscano P., Chen C., Chen Sh., Tseng K., Syu Ch.-H., Guo H.-Y., Zhang Yi. Field-scale rice yield prediction from Sentinel-2 monthly image composites using machine learning algorithms // *Ecological Informatics*. 2022. Volume 69, 101618. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101618>
5. Bueechi E., Reuß F., Piki M., Homolova L., Lukas V., Trnka M., Dorigo W. Making optimal use of limited field-scale data for crop yield forecasting using transfer learning and Sentinel-1 and 2 data // *Smart Agricultural Technology*. 2025. Volume 12, 101567. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101567>
6. Черниковский Д.М. Оценка возможностей применения материалов спутниковой съемки Sentinel-2 для определения преобладающих древесных пород при таксации лесов // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2025. № 252. С. 188-210. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.188-210.
7. Барталев С.А., Лупян Е.А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 1. С. 197-214.
8. Ховратович Т.С., Барталев С.А., Кашницкий А.В. Возможности детектирования рубок леса на основе изменения оценок проективного покрытия леса по данным Landsat-OLI и Sentinel 2 // *Цифровые технологии в лесном секторе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 26-27 марта 2020 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова*. Санкт-Петербург: 2020. С. 157-159.
9. Li Q., Zhang H., Gui J., Xu S., Shen Q., Lin S., Huang H. Decoupling of structural and functional forest recovery: heterogeneity in post-fire normalized difference vegetation index (NDVI) and net primary productivity (NPP) trajectories across China (2000-2015) // *Ecological Indicators*, Volume 183, 2026, 114684. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2026.114684>
10. Gitelson A.A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. // *Journal of Plant Physiology*. 2004. Volume 161, Issue 2, P. 165-173. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176>
11. Martinez A. de la Iglesia, Labib S.M. Demystifying normalized difference vegetation index (NDVI) for greenness exposure assessments and policy interventions in urban greening. // *Environmental Research*. 2023. Volume 220, 115155. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115155>
12. Crespo-Antia J.P., Gazol A., Pizarro M. Matching Vegetation Indices and Tree Vigor in Pyrenean Silver Fir Stands

References

1. Regulations on forest monitoring No MG-1-17-6/287 of 29.11.95 Federal Forestry Service of Russia // <https://docs.cntd.ru/document/9017780>
2. Slavsky V.A., Matveev S.M. Some aspects of laying sample plots during the state inventory of forests. 2021. V. 11, No 1(41). P. 56-63. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/53.
3. Živaljević B., Sutanto S.J., Paparrizos S., Mesaroš M., Mimić G. Within-season crop yield prediction in the Vojvodina Province (Serbia) using Sentinel-2 satellite vegetation indices // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2026. Volume 43. 102192. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2026.102192>
4. Son N.-T., Chen Ch.-F., Cheng Y.-S., Toscano P., Chen C., Chen Sh., Tseng K., Syu Ch.-H., Guo H.-Y., Zhang Yi. Field-scale rice yield prediction from Sentinel-2 monthly image composites using machine learning algorithms // *Ecological Informatics*. 2022. Volume 69, 101618. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101618>
5. Bueechi E., Reuß F., Piki M., Homolova L., Lukas V., Trnka M., Dorigo W. Making optimal use of limited field-scale data for crop yield forecasting using transfer learning and Sentinel-1 and 2 data // *Smart Agricultural Technology*. 2025. Volume 12, 101567. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101567>
6. Chernikhovskiy D.M. Assessment of the possibilities of using Sentinel-2 satellite imagery materials for determining the prevailing tree species in forest taxation // *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2025. № 252. P. 188-210. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.188-210.
7. Bartalev S.A., Lupyan E.A. Research and development of the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences on the development of satellite monitoring methods of vegetation cover. 2013. V. 10, No 1. P. 197-214.
8. Khovratovich T.S., Bartalev S.A., Kashnitsky A.V. Possibilities of detecting logging based on changes in the estimates of projective forest coverage according to Landsat-OLI and Sentinel 2 // *Digital technologies in the forest sector: materials of the All-Russian scientific and technical conference, St. Petersburg, March 26-27, 2020 / S.M. Kirov St. Petersburg State Forest Technical University*. St. Petersburg: 2020. P. 157-159
9. Li Q., Zhang H., Gui J., Xu S., Shen Q., Lin S., Huang H. Decoupling of structural and functional forest recovery: heterogeneity in post-fire normalized difference vegetation index (NDVI) and net primary productivity (NPP) trajectories across China (2000-2015) // *Ecological Indicators*, Volume 183, 2026, 114684. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2026.114684>
10. Gitelson A.A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. // *Journal of Plant Physiology*. 2004. Volume 161, Issue 2, P. 165-173. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176>
11. Martinez A. de la Iglesia, Labib S.M. Demystifying normalized difference vegetation index (NDVI) for greenness exposure assessments and policy interventions in urban greening. // *Environmental Research*. 2023. Volume 220, 115155. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115155>
12. Crespo-Antia J.P., Gazol A., Pizarro M. Matching Vegetation Indices and Tree Vigor in Pyrenean Silver Fir Stands // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 23. Art. 4564. DOI: 10.3390/rs16234564.

// Remote Sensing. 2024. Vol. 16, No. 23. Art. 4564. DOI: 10.3390/rs16234564

13. Miura T., Huete A.R., Yoshioka H., Holben B.N. An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction // Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 78, No. 3. P. 284-298. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00223-1.

14. Verbesselt J., Hyndman R., Newnham G., Culvenor D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114, No. 1. P. 106-115. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.014

15. Тарасов А.В., Шихов А.Н., Шабалина Т.В. Распознавание нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам Sentinel-2 с помощью сверточных нейронных сетей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021, Т. 18, № 3. С. 51-64. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-51-64.

16. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // Nature Methods. 2020. Vol. 17, No. 3. P. 261-272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

17. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. P. 2825-2830.

18. Royston P.J. An extension of Shapiro-Wilk's W-test to skewed distributions // Biometrika. 1982. Vol. 69, No. 2, P. 427-430.

19. Araújo M.L.T.M., Silva R.M.S., Santos J.M.C. Model selection and model misspecification in time series: The case of heavy-tailed distributions // Journal of Time Series Analysis. 2017, 38(3), P. 417-438.

20. Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // Biometrika. 1965. Vol. 52, No. 3/4. P. 591-611. DOI: 10.2307/2333709

21. Pelc-Mieczkowska R. The Application of Sentinel-2 Data for Automatic Forest Cover Changes Assessment – Białowieża Primeval Forest Case Study // Civil and Environmental Engineering Reports. 2021. Vol. 31, No. 4. P. 148-166. DOI: 10.2478/ceer-2021-0054

22. Wu L., Liu X., Liu M., Zhou B. Online Forest Disturbance Detection at the Sub-Annual Scale Using Spatial Context From Sparse Landsat Time Series // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. P. 1-14. Art. No. 4501214. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3145675

23. Chen C., Xu Y., Zhang T., Jiang C. Detection of Forest Disturbances with Different Intensities Using Landsat/Sentinel Time Series Based on Adaptive Charts // Forests. 2023. Vol. 15, No. 1. Article 19. DOI: 10.3390/f15010019

24. Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., So-rooshian S. A modified soil adjusted vegetation index // Remote Sensing of Environment. 1994. Vol. 48, No. 2. P. 119-126. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.

25. Miguel S., Ruiz-Benito P., Rebollo P., Viana-Soto A., Mihai M.C., García-Martín A., Tanase M. Forest disturbance regimes and trends in continental Spain (1985-2023) using dense Landsat time series // Environmental Research. 2024. Vol. 262. Article 119802. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119802.

26. Иванов М.А., Гафуров А.М. Анализ изменений землепользования в Среднем Поволжье по данным Landsat для оценки потенциала возврата заброшенных пахотных земель в сельскохозяйственный оборот // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 2., С. 186-201. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-186-201.

27. Пушкин А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В. Оценка возможностей использования спектрального вегетационного индекса EVI для дешифрирования лесных насаждений по материалам космической съемки // Труды БГТУ.

13. Miura T., Huete A.R., Yoshioka H., Holben B.N. An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction // Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 78, No. 3. P. 284-298. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00223-1.

14. Verbesselt J., Hyndman R., Newnham G., Culvenor D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114, No. 1. P. 106-115. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.014

15. Tarasov A.V., Shikhov A.N., Shabalina T.V. Recognition of forest cover disturbances from Sentinel-2 satellite images using convolutional neural networks // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2021. Т. 18, No 3. P. 51-64. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-51-64.

16. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // Nature Methods. 2020. Vol. 17, No. 3. P. 261-272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

17. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. P. 2825-2830.

18. Royston P.J. An extension of Shapiro-Wilk's W-test to skewed distributions // Biometrika. 1982. Vol. 69, No. 2, P. 427-430.

19. Araújo M.L.T.M., Silva R.M.S., Santos J.M.C. Model selection and model misspecification in time series: The case of heavy-tailed distributions // Journal of Time Series Analysis. 2017, 38(3), P. 417-438.

20. Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // Biometrika. 1965. Vol. 52, No. 3/4. P. 591-611. DOI: 10.2307/2333709

21. Pelc-Mieczkowska R. The Application of Sentinel-2 Data for Automatic Forest Cover Changes Assessment – Białowieża Primeval Forest Case Study // Civil and Environmental Engineering Reports. 2021. Vol. 31, No. 4. P. 148-166. DOI: 10.2478/ceer-2021-0054

22. Wu L., Liu X., Liu M., Zhou B. Online Forest Disturbance Detection at the Sub-Annual Scale Using Spatial Context From Sparse Landsat Time Series // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. P. 1-14. Art. No. 4501214. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3145675

23. Chen C., Xu Y., Zhang T., Jiang C. Detection of Forest Disturbances with Different Intensities Using Landsat/Sentinel Time Series Based on Adaptive Charts // Forests. 2023. Vol. 15, No. 1. Article 19. DOI: 10.3390/f15010019

24. Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., So-rooshian S. A modified soil adjusted vegetation index // Remote Sensing of Environment. 1994. Vol. 48, No. 2. P. 119-126. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.

25. Miguel S., Ruiz-Benito P., Rebollo P., Viana-Soto A., Mihai M.C., García-Martín A., Tanase M. Forest disturbance regimes and trends in continental Spain (1985-2023) using dense Landsat time series // Environmental Research. 2024. Vol. 262. Article 119802. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119802.

26. Ivanov M.M., Petrov A.A., Sidorov V.V. Analysis of land use changes in the Middle Volga region according to Landsat data for assessing the potential of the return of abandoned arable lands to agricultural circulation. 2025. Т. 22, № 2., С. 186-201. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-186-201.

27. Pushkin A.A., Sidelnik N.Ya., Kovalevsky S.V. Assessment of the possibilities of using the spectral vegetation index EVI for deciphering forest plantations based on space imagery. Series 1: Forestry, nature management and processing of renewable resources. 2020. No 1, P. 5-10

28. Vorobyov O.N., Kurbanov E.A., Sha D., Lezhnin S.A., Van D., Dregunov D.M. Monitoring and forecast of the dynamics of the ground cover of the Middle Volga region based on satellite

Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 1, С. 5-10.

28. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Ша Д., Лежнин С.А., Ван Д., Дрегунов Д.М. Мониторинг и прогноз динамики наземного покрова Среднего Поволжья по спутниковым данным в QGIS MOLUSCE // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 5. С. 176-193. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-176-193

29. Ives A.R., Zhu L., Wang F., Zhu J., Morrow C.J., Radeloff V.C. Statistical inference for trends in spatiotemporal data // Remote Sensing of Environment. 2021. Vol. 266. Article 112678. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112678.

30. Алексеев А.С., Черниковский Д.М. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 2, С. 11-28. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28.

31. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Лежнин С.А., Губаев А.В., Дрегунов Д.М., Тарасова Д.В. Пространственно-временной анализ лесного покрова Средней Волги с использованием ландшафтных индексов и данных спутника Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 1. С. 144-159. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-144-159

32. Johnson A., Brown B., Davis C. Forest age structure and vegetation index dynamics under climate stress: a multi-site analysis // Remote Sensing of Environment. 2021. Vol. 265. Article 112678. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112678.

33. Иванов А.В., Смирнов П.Л., Козлов Д.Е. Динамика вегетационных индексов в лесах Центральной России (2018-2023 гг.): анализ по данным Sentinel-2 // Лесоведение. 2023. № 4. С. 45-58.

34. Петров Н.С., Васильева М.К., Новиков А.А. Оценка деградации лесных экосистем Среднего Поволжья на основе временных рядов EVI // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 2. С. 112-125.

data in QGIS MOLUSCE. 2023. Т. 20, No 5. P. 176-193. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-176-193

29. Ives A.R., Zhu L., Wang F., Zhu J., Morrow C.J., Radeloff V.C. Statistical inference for trends in spatiotemporal data // Remote Sensing of Environment. 2021. Vol. 266. Article 112678. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112678

30. Alekseev A.S., Chernikhovsky D.M. Identification of damage to coniferous plantations based on a comprehensive analysis of the results of remote sensing of the Earth and ground surveys. Forest Journal. 2024. No 2, P. 11-28. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28.

31. Vorobyov O.N., Kurbanov E.A., Lezhnin S.A., Gubaev A.V., Dregunov D.M., Tarasova D.V. Spatial-temporal analysis of the forest cover of the Middle Volga using landscape indices and data of the Landsat satellite. 2023. V. 20, No 1. P. 144-159. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-144-159

32. Johnson A., Brown B., Davis C. Forest age structure and vegetation index dynamics under climate stress: a multi-site analysis // Remote Sensing of Environment. 2021. Vol. 265. Article 112678. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112678.

33. Ivanov A.V., Smirnov P.L., Kozlov D.E. Dynamics of vegetation indices in the forests of Central Russia (2018-2023): analysis based on Sentinel 2 data. 2023. № 4. P. 45-58.

34. Petrov N.S., Vasilyeva M.K., Novikov A.A. Assessment of degradation of forest ecosystems of the Middle Volga region on the basis of EVI time series. 2024. V. 21, No 2. P. 112-125.

Информация об авторах

Алексей Викторович Мироненко, канд. сельхоз. наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ORCID: 0000-0002-9701-3822; РИНЦ ID: 159531; alexeymironenko66@gmail.com

Василий Александрович Славский, докт. сельхоз. наук, профессор кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ORCID: 0000-0002-6579-0344; РИНЦ ID: 437732; slavskiyva@yandex.ru

Дарья Андреевна Литовченко, канд. биолог. наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ORCID: 0000-0003-2973-7447; Scopus: 57192711518; РИНЦ ID: 745766; WOS Research ID: T-9721-2019; timashchuk90@mail.ru.

Information about the authors

Alexey V. Mironenko, Ph.D. in Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry, Forest Inventory and Forest Management, ORCID: 0000-0002-9701-3822; РИНЦ ID: 159531; alexeymironenko66@gmail.com.

Vasily A. Slavskiy, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Forestry, Forest Inventory and Forest Management, ORCID: 0000-0002-6579-0344; РИНЦ ID: 437732; slavskiyva@yandex.ru

Daria A. Litovchenko, Ph.D. biologist. Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, ORCID: 0000-0003-2973-7447; Scopus: 57192711518; РИНЦ ID: 745766; WOS Research ID: T-9721-2019; timashchuk90@mail.ru

Критерии авторства /

Мироненко А.В., Славский В.А., Литовченко Д.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Мироненко А.В., Славский В.А., Литовченко Д.А. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Поступила в редакцию / Received 04.08.2026

Одобрена после рецензирования / Approved 15.09.2026

Принята к публикации / Accepted 20.09.2026

Criteria of authorship

Mironenko A.V., Slavsky V.A., Litovchenko D.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they summarized and wrote a manuscript.

Mironenko A.V., Slavsky V.A., Litovchenko D.A. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

УДК 630*266:639.2.03: 630*431.2: (470.3/4)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-124-134>



ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТЬ ЛЕСОВ К ПОЖАРАМ В РЕГИОНАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ЗА 2016-2023 ГОДЫ

О.А. Ивченко^{1✉}, А.В. Тютин², М.А. Козаченко³, О.Б. Сокольская⁴, К.Е. Панкин^{5✉}

^{1, 2, 3, 4, 5} Саратовской государственной университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; г. Саратов, Российская Федерация

¹olgalexan607@mail.ru; ORCID0000-0003-0710-5123,

²aleksandartiutin@yandex.ru, ORCID0000-0002-5982-8983

³lesfak-saratov@mail.ru; ORCID0000-0002-9165-0759,

⁴sokolskaya.olg@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1723-1289>

⁵texmexium@mail.ru; ORCID0000-0002-3023-1411

Аннотация. Цель исследований: моделирование коэффициента пожарной опасности лесов в регионах четырех Федеральных округов Европейской части РФ: Центрального, Северо-западного, Приволжского и Южного – как численное выражение предрасположенности лесного фонда к пожарам и сопоставлению его с числом лесных пожаров для выявления степени влияния природных условий на лесопожарную обстановку. В работе представлен подход к оценке предрасположенности лесов к пожарам в четырех федеральных округах Европейской части Российской Федерации: Центральном, Северо-западном, Южном и Приволжском – в 2016-2023 гг. Для этого был обоснован и вычислен коэффициент пожарной опасности лесов региона на основе климатических и лесорастительных особенностей. Полученные значения коэффициента пожарной опасности регионов были сопоставлены с количеством лесных пожаров в них. Выявлен линейный характер корреляции между исследуемыми параметрами. Обнаруженные отклонения от линейной связи как в большую, так и в меньшую стороны, объясняются влиянием антропогенной нагрузки на лесной фонд регионов и эффективностью противопожарных мероприятий.

Ключевые слова: лесные пожары, пожарная опасность в лесах, лесопожарная обстановка, моделирование, коэффициент пожарной опасности лесов

Формат цитирования: Ивченко О.А., Тютин А.В., Козаченко М.А., Сокольская О.Б., Панкин К.Е. Предрасположенность лесов к пожарам в регионах Европейской части Российской Федерации за 2016-2023 годы. Природообустройство. 2026;Т.19(4):124-134. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-124-134>

Original article

PREDISPOSITION OF FORESTS TO FIRES IN THE REGIONS OF THE EUROPEAN PART OF THE RUSSIAN FEDERATION FOR 2016-2023

O.A. Ivchenko^{1✉}, A.V. Tiutin², M.A. Kozachenko³, O.B. Sokolskaya⁴, K.E. Pankin^{5✉}

^{1, 2, 3, 4, 5} Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov; Saratov, Russian Federation

¹olgalexan607@mail.ru; ORCID0000-0003-0710-5123

²aleksandartiutin@yandex.ru, ORCID0000-0002-5982-8983

³lesfak-saratov@mail.ru; ORCID0000-0002-9165-0759

⁴sokolskaya.olg@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1723-1289>

⁵texmexium@mail.ru; ORCID0000-0002-3023-1411

Abstract. The purpose of the research is to model the fire hazard coefficient for forests in the regions of four federal districts of the European part of the Russian Federation: the Central, Northwestern, Volga, and Southern districts – as a numerical expression of the forest fund's predisposition to fires – and to compare it with the number of forest fires in order to identify the extent to which natural conditions influence the forest fire situation. The paper presents an approach to assessing the predisposition of forests to fires in four Federal Districts of the European part of the Russian Federation – Central, Northwestern, Southern and Volga from 2016-2023. For this purpose, the fire hazard coefficient of the region's forests was

substantiated and calculated, based on climatic and forest-growing features. The obtained values of the fire hazard coefficient of the regions were compared with the number of forest fires in them. The linear nature of the correlation between the studied parameters was found. The revealed deviations from the linear relationship both up and down are explained by the influence of the anthropogenic load on the forest fund of the regions and the effectiveness of fire prevention measures.

Keywords: forest fires, forest fire hazard, forest fire situation, modeling, forest fire hazard coefficient

Format of citation: Ivchenko O.A., Tiutin A.V., Kozachenko M.A., Sokolskaya O.B., Pankin K.E. Predisposition of forests to fires in the regions of the European part of the Russian Federation for 2016-2023. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):124-134. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-124-134>

Введение. Мониторинг лесопожарной обстановки в регионах Российской Федерации (РФ) – важная составляющая деятельности отрасли лесного хозяйства. Российская Федерация относится к территориям, богатым лесами и лесными культурами, которые занимают около 46,7% территории страны, большая часть которых сформирована хвойными породами деревьев (80%). Ежегодно на территории РФ регистрируются от 35 до 40 тыс. лесных пожаров, большая часть из которых происходит в Сибири. В Европейской части РФ регистрируется 3-5 тыс. пожаров ежегодно.

Мониторинг лесопожарной обстановки включает в себя целый комплекс мероприятий, начиная с классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды [1], наблюдение за изменением состояния погоды, расчет величины комплексного показателя пожарной опасности и присвоение класса пожарной опасности по условиям погоды с последующим введением противопожарного режима (в том числе особого) в лесах регионов.

Лесистость территории страны возрастает с запада на восток. Наиболее богата лесами Сибирь – территория страны, располагающаяся восточнее Уральских гор. Здесь средняя лесистость по федеральным округам составляет 76,7%. Именно поэтому все основные подходы к профилактике лесных пожаров, противопожарной защите лесов и тушению лесных пожаров были разработаны именно для Сибири. Это нашло свое отражение в работе [1], в основе которой – исследования древесно-кустарниковой растительности, а также шкала В.Г. Нестерова по оценке комплексного показателя пожарной опасности [1].

Парадокс ситуации заключается в том, что пожарная обстановка в лесах практически никогда не соответствует лесопожарной обстановке, что происходит по множеству причин, сочетающих природные условия и антропогенное воздействие. В большинстве своем природные условия только подготавливают лесные массивы

к возникновению пожара. В определенных случаях, в теплое время года, происходит снижение количества влаги в растениях и почве, что отражается в постепенном повышении класса пожарной опасности по условиям погоды. Тем не менее высокий класс пожарной опасности не является причиной лесных пожаров, так как сам по себе это не источник зажигания для лесных горючих материалов. Для этого необходимо другое природное явление – сухая гроза, электрические разряды которой могут осуществить поджог. В регионах Сибири действием молний объясняют возникновение лесных пожаров в малолюдных местах, расположенных на значительном удалении (100 и более км) от населенных пунктов [2-4]. Для объяснения природного происхождения лесных пожаров в Европейской части Российской Федерации такая версия не подходит, так как высокая грозовая нагрузка характерна только для регионов Северного Кавказа. В противоположность Сибири регионы Европейской части РФ имеют большую плотность населения, а леса подвергаются большей антропогенной нагрузке ввиду ведения сельского хозяйства, строительства, развития рекреации и туризма.

Человеческий фактор является спорным для прогнозирования, так как не каждый акт неосторожного обращения с огнем вызывает лесной пожар. Кроме того, в последние десятилетия накоплены данные о том, что для многих регионов шкала В.Г. Нестерова неадекватно оценивает уровни пожарной опасности в лесах [5-8]. Это требует разработки региональных шкал классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды.

Многолетние наблюдения за погодой и пожарным состоянием лесов привели к введению в действие региональных классов пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды на территории [9]. Анализ указанного документа показал, что из 13 регионов, представленных в документе, индивидуальные шкалы разработаны только для 4 регионов Европейской части РФ: Архангельская, Мурманская, Новгородская

области и Республика Коми, что составляет только 5% от числа регионов, входящих в ее состав. Важные составляющие борьбы с лесными пожарами – это выявление предрасположенности лесов регионов к лесным пожарам и влияние на эту предрасположенность климатических и лесорастительных условий.

Цель исследований: моделирование коэффициента пожарной опасности лесов в регионах четырех Федеральных округов Европейской части РФ: Центрального, Северо-западного, Приволжского и Южного – как численное выражение предрасположенности лесного фонда к пожарам и сопоставлению его с числом лесных пожаров для выявления степени влияния природных условий на лесопожарную обстановку.

Материалы и методы исследований. Объектом исследований явились климатические, погодные, лесорастительные условия, а также статистика лесных пожаров в регионах четырех Федеральных округов Европейской части РФ: Центрального (ЦФО), Северо-Западного (СЗФО), Приволжского (ПривФО) и Южного (ЮФО).

Для поиска природных факторов, влияющих на возникновение лесных пожаров в регионах Европейской части РФ, была собрана и проанализирована следующая информация:

- число лесных пожаров за период 2016-2023 гг. [10];
- сведения о лесистости и о типе лесорастительной зоны [11];
- сведения о типе климатической зоны [11];
- число дней пожароопасного сезона и средняя температура теплого сезона [11];
- количество осадков и средней относительной влажности воздуха [11].

Для определения предрасположенности лесов регионов к пожарам необходимо все влияющие факторы свести к одной цифре – коэффициенту пожарной опасности лесов региона:

$$K_{\text{по}} = \frac{L \cdot t_{\text{ср}} \cdot N_{\text{ТПГ}} \cdot K_{\text{ЛРЗ}} \cdot K_{\text{КлЗ}}}{\varphi \cdot \Sigma}, \quad (1)$$

где L – лесистость региона, %; $t_{\text{ср}}$ – средняя температура теплого периода года, °C; $N_{\text{ТПГ}}$ – длительность теплого периода года, день; $K_{\text{ЛРЗ}}$ – коэффициент лесорастительной зоны, преобладающей в регионе; $K_{\text{КлЗ}}$ – коэффициент климатической зоны; j – средняя относительная влажность воздуха в течение теплого периода года, %; Σ – средняя сумма осадков в течение теплого периода года, мм.

Результаты и их обсуждение. Предрасположенность лесов к пожарам носит вероятностный характер и обусловлена совокупностью природных факторов. Первичными являются те факторы, которые способствуют росту и развитию лесов. Оценить пригодность региона

к росту лесов можно по такому параметру, как лесистость – отношению площади лесного фонда к общей площади региона. Впрочем, лесистость региона может быть обусловлена антропогенным воздействием на нее. Следует отметить, что лесистость не всегда связана с природными условиями, так как в последние 200-500 лет естественная лесистость ряда регионов Европейской части РФ в значительной степени изменилась. Так, в XXI в. большая часть территории Саратовской области (56%) располагается в степной зоне, и только 44% – в лесостепной [11]. Лесистость региона составляет 6,5%. Тем не менее в XVI-XVII вв. лесистость региона составляла 30% [8], а преобладающей породой являлся дуб черешчатый (*Quercus robur* L., 1753) [11]. Причиной снижения площади лесного фонда стала массовая вырубка лесов на строительные нужды и ведение сельского хозяйства. Аналогичная ситуация сложилась во Владимирской области, где дубовые и липовые леса были вырублены еще в XIX в. и в настоящее время представлены отдельными рощами и перелесками. Тем не менее даже в степных регионах (Астраханская, Волгоградская области, Республика Калмыкия и т.п.) в целях ведения сельского хозяйства и защиты от суховея создаются лесные культуры в виде лесозащитных полос, а также пойменные леса, предотвращающие эрозию и размыв почвенного покрова, что ведет к увеличению, хотя и медленному, лесного фонда.

На рост и развитие древовидных растений определенным образом будут влиять такие факторы, как длительность, средняя температура, средняя относительная влажность воздуха и среднее количество осадков теплого периода года (ТПГ). На рисунках 1-4 представлены результаты влияния перечисленных факторов на лесистость регионов ЕЧ РФ, входящих в состав четырех федеральных округов Европейской части РФ (ЦФО, СЗФО, ПривФО и ЮФО).

Анализ полученной информации показывает, что влияние отдельных природных факторов на лесистость регионов имеет неоднозначный характер. Наилучшие лесорастительные условия заключены в довольно узком диапазоне условий: длительность – 140-200 дней; средняя температура – 13-21°C; средняя относительная влажность воздуха – 60-75%; количество осадков – 350-550 мм. Это свидетельствует о комплексном характере влияния условий погоды на лесорастительные условия. Проследить влияние этих условий можно, получив распределение их по лесорастительным зонам: таежной (ТЗ), хвойно-широколиственных лесов (Х-ШЛЛ), лесостепной (ЛСЗ)

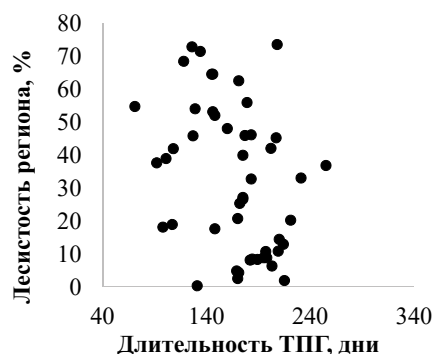


Рис. 1. Лесистость регионов ЕЧ РФ от длительности ТПГ

Fig. 1. Forest cover in the regions of the European part of the Russian Federation (EP of RF) vs the duration of the warm season (WS)

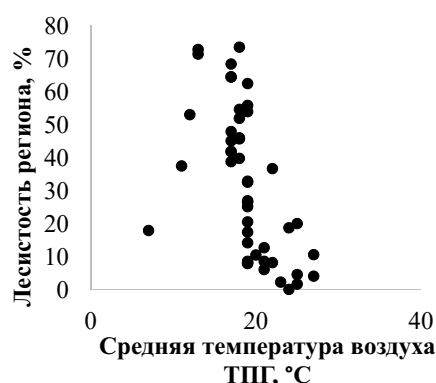


Рис. 2. Лесистость регионов ЕЧ РФ от средней температуры ТПГ

Fig. 2. Forest cover in the regions of the EP of the Russian Federation vs average temperature of WS

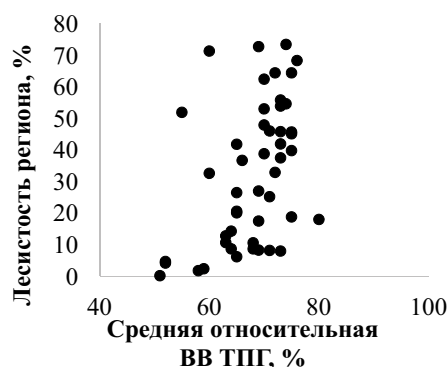


Рис. 3. Лесистость регионов ЕЧ РФ от средней относительной влажности воздуха (ВВ) в течение ТПГ

Fig. 3. Forest cover in the regions of the EP of the Russian Federation vs average relative air humidity during WS

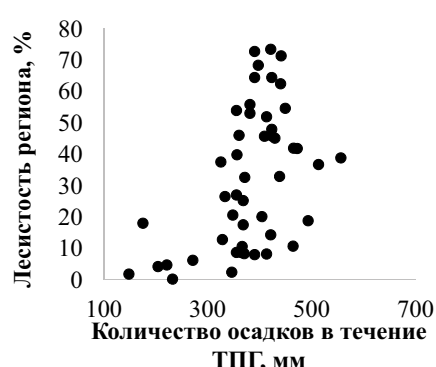


Рис. 4. Лесистость регионов ЕЧ РФ от среднего количества осадков в ТПГ

Fig. 4. Forest cover in the regions of the EP of the Russian Federation vs average amount of precipitation during WS

и степной (СтЗ). Результаты распределения представлены на рисунках 5-8.

Из представленных результатов следует, что климатические факторы разнонаправленно влияют на лесистость и тип лесорастительной зоны. Рост длительности ТПГ и его средней температуры ведет к переходу от таежной зоны к степной. Средняя относительная влажность воздуха и количество осадков в том же ряду снижаются. Наибольший разброс значений количества осадков наблюдается в регионах, граничащих с Северным Кавказом, где осуществляется учет осадков, выпавших в горных районах (Республика Адыгея и Краснодарский край). Выразить этот комплекс условий позволяет распределение лесистости по лесорастительным и климатическим зонам (рис. 9, 10).

Для восприятия информации все разнообразие лесорастительных зон было объединено в 4 группы: таежную, хвойно-широколиственных лесов, лесостепную и степную. Аналогичная

процедура была проведена для климатических зон, которые были объединены в шесть групп: арктическую (А или АрК), морскую (М и МрК), умеренно-континентальную (УК или УКК), субтропическую (СТК или СТ), континентальную (КК или К) и засушливую (ЗЗ или З).

На рисунке 9 прослеживается четкая линейная зависимость лесистости региона от его принадлежности типу лесорастительной зоны. Как видим, наибольшую лесистость имеет таежная зона (50-75%), а наименьшую – степная (2-10%), то есть наблюдается плавный переход от одного типа лесорастительной зоны к другой. Так, нижняя граница лесистости таежной зоны близка с верхней границей лесистости зоны хвойно-широколиственных лесов, и т.д. Есть и исключения: например, Республика Башкортостан официально отнесена к лесостепной зоне, хотя ее лесистость составляет 39,8% и сопоставима с зоной хвойно-широколиственных лесов. Такой же является ситуация и в Краснодарском крае,

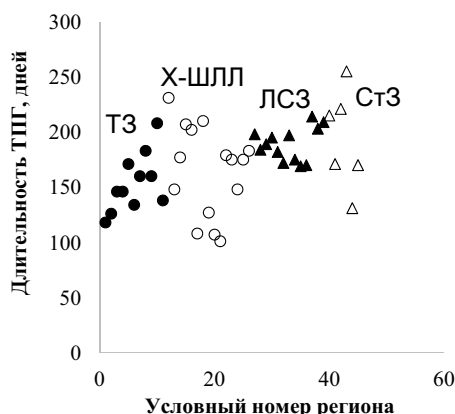


Рис. 5. Распределение длительности теплого периода года по лесорастительным зонам регионов ЕЧ РФ

Fig. 5. Distribution of warm period duration by forest vegetation zones of the regions of the EP of the Russian Federation

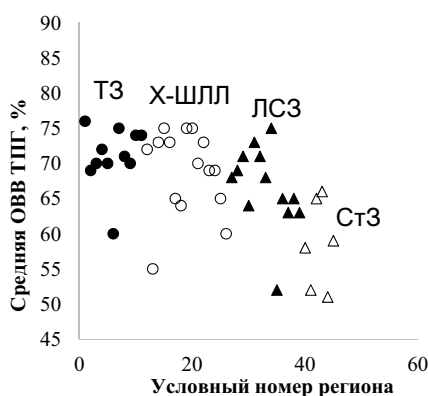


Рис. 7. Распределение средней относительной влажности воздуха (ОВВ) ТПГ по лесорастительным зонам регионов ЕЧ РФ

Fig. 7. Distribution of warm mean relative air humidity (ARH) over forest-growing zones of the regions of the EP of the Russian Federation

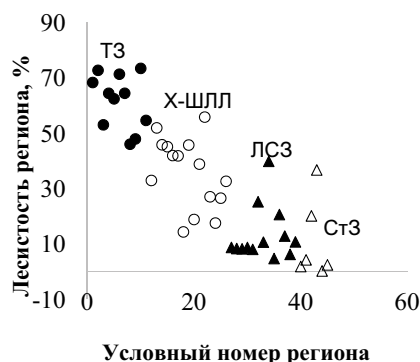


Рис. 9. Распределение лесистости регионов Европейской части РФ в зависимости от типа лесорастительной зоны

Fig. 9. Forest cover in the regions of the EP of the Russian Federation vs type of vegetation zone

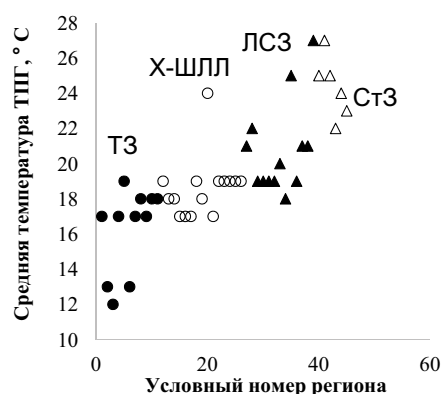


Рис. 6. Распределение средней температуры теплого периода года по лесорастительным зонам регионов ЕЧ РФ

Fig. 6. Distribution of warm period average temperature by forest vegetation zones of the regions of the EP of the Russian Federation

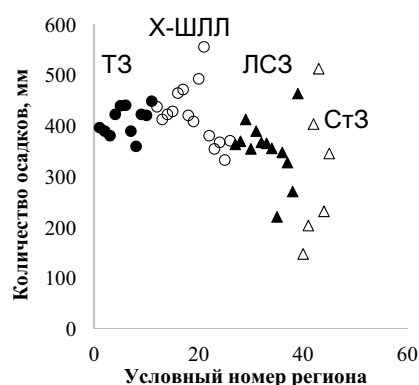


Рис. 8. Распределение среднего количества осадков в течение теплого периода года по лесорастительным зонам регионов ЕЧ РФ

Fig. 8. Distribution of average precipitation during the warm period of the year by forest vegetation zones of the regions of the EP of the Russia Federation

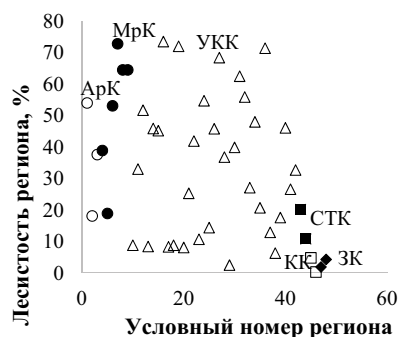


Рис. 10. Распределение лесистости регионов Европейской части РФ в зависимости от типа климатической зоны

Fig. 10. Forest cover in the regions of the EP of the Russian Federation vs type of climate zone

официально отнесенном к степной зоне, однако его лесистость составляет 20,1%, что более характерно для лесостепной зоны. Объясняется это учетом лесного фонда предгорий Кавказа.

Климатические зоны Европейской части РФ более, чем лесорастительные, разнообразны (рис. 10). Регионы Северо-Западного ФО обладают арктическим, субарктическим, арктическим умеренным, умеренным и морским климатом. Регионы Центрального и Приволжского ФО обладают преимущественно умеренно-континентальным климатом. Регионы Южного ФО характеризуются преимущественно континентальным, теплым, субтропическим и засушливым типами климата.

Возникновение и развитие лесных пожаров всегда подчиняются законам природы, однако найти управляющие факторы не всегда представляется возможным, так как их влияние не всегда является очевидным. Основным опорным параметром при исследовании стали сведения о числе лесных пожаров, произошедших в регионах за исследуемый период. Однако официальные сведения далеко не всегда отражают реальную картину обстановки с пожарами [12]. Например, по данным ФГУП «Авиалесоохрана» [10], в Курской области за 7 лет произошло только 16 лесных пожаров, а в Тульской области – ни одного. Есть также сведения о том, что в Саратовской области за 2016 г. произошло 9 лесных пожаров, хотя за другие годы в том же временном диапазоне происходило от 75 до 110 лесных пожаров.

Таким образом, необходимо искать наиболее общие подходы к оценке обстановки относительно пожаров и к поиску управляющих факторов. Лесные пожары характеризуются двумя численными параметрами: количеством за определенный период (год) и площадью лесных угодий, уничтоженных или поврежденных в результате лесных пожаров за тот же период. В данной работе анализу подвергается только число лесных пожаров.

Существует ряд предположений того, с чем может быть связана ситуация относительно лесных пожаров в регионах. Так, способствовать возникновению лесных пожаров могут следующие факторы:

– *Лесистость региона* – чем больше лесов в регионе, тем больше лесных пожаров.

– *Лесорастительная зона* – чем больше хвойных пород, тем выше пожарная опасность [1].

– *Длительность теплого периода года (ТПГ)* – чем более длителен пожароопасный сезон, тем больше пожаров.

– *Средняя температура воздуха ТПГ* – чем выше данная температура, тем выше предрасположенность лесов к пожарам.

– *Климат* – чем более засушлив климат, тем выше предрасположенность лесов к пожарам.

Противодействовать формированию высоких классов лесопожарной обстановки могут такие факторы, как:

– *Количество осадков в течение ТПГ* – чем больше осадков в регионе в теплый период года, тем меньше лесных пожаров.

– *Средняя относительная влажность воздуха* – чем она выше, тем меньше должно быть лесных пожаров.

Для проверки вышеприведенных утверждений приведем распределение числа лесных пожаров в зависимости от влияющих факторов: длительности, средней температуры, средней относительной влажности воздуха и среднего количества осадков ТПГ. Результаты представлены на рисунках 11-14.

Так же, как и в случае с лесистостью регионов, максимальное число лесных пожаров наблюдается в лесах, произрастающих в довольно узких диапазонах условий. Длительность ТПГ составляет 130-210 дней, средняя температура ТПГ – 17-25°C, средняя относительная влажность воздуха – 65-80%, сумма осадков – 350-500 мм. Это связано с особенностями учета погодных данных и регистрации числа лесных пожаров. Например, пожароопасный сезон может состоять из двух и более периодов повышенной и пониженной пожарной опасности в лесах. Кроме того, лесопожарная обстановка в регионах меняется год от года с колебаниями частоты возникновения лесных пожаров и горимости лесов от низкой до чрезвычайной степеней [6].

Для численного моделирования величины коэффициента пожарной опасности региона (см. уравнение 1) проблему вызывает определение численных значений коэффициентов влияния лесорастительной и климатической зон. Согласно работе [1] хвойные леса являются более пожароопасными и им присваиваются I класс природной пожарной опасности, хвойным молоднякам присваивается более высокий Ia класс. Тем не менее природная пожарная опасность является показателем более тяжелых последствий от пожаров в лесах такого типа, но никак не частоты возникновения пожаров в них. Аналогичная ситуация складывается относительно класса пожарной опасности по условиям погоды, коэффициент которой может меняться в течение ТПГ в широком

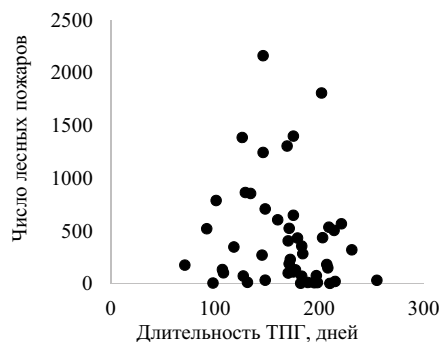


Рис. 11. Число лесных пожаров
в регионах Европейской части РФ
от длительности ТПГ

Fig. 11. The number of forest fires
in the regions of the EP of the Russian Federation
vs WS duration

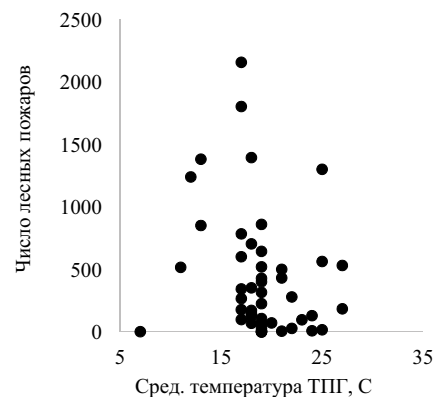


Рис. 12. Число лесных пожаров
в регионах Европейской части РФ
от средней температуры ТПГ

Fig. 12. The number of forest fires
in the regions of the EP of the Russian
Federation vs WS average temperature

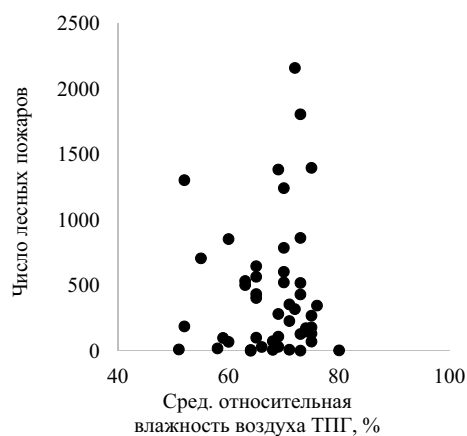


Рис. 13. Число лесных пожаров
в регионах Европейской части РФ
от средней относительной
влажности воздуха ТПГ

Fig. 13. The number of forest fires
in the regions of the EP of the Russian Federation
vs average relative air humidity of WS

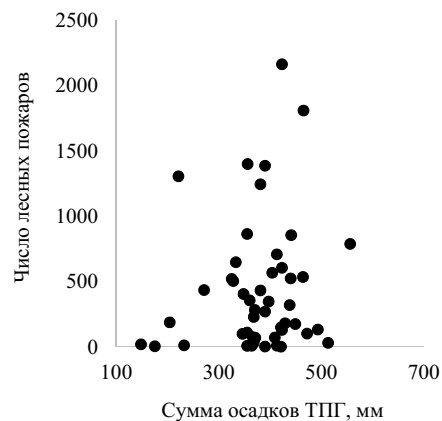


Рис. 14. Число лесных пожаров в регионах
Европейской части РФ от среднего
количества осадков в течение ТПГ

Fig. 14. The number of forest fires in the regions
of the EP of the Russian Federation vs average
amount of precipitation of WS

диапазоне значений. Выходом из сложившейся ситуации может стать выявление распределения лесных пожаров по указанным выше зонам (рис. 15, 16).

Представленные результаты показывают, что наиболее серьезная лесопожарная обстановка наблюдается в таежных регионах. У регионов с хвойно-широколиственными лесами и лесостепью примерно одинаковые данные, но в 2 раза меньше в сравнении с регионами таежной зоны. Наименьший «вклад» – от степной зоны.

В случае распределения лесных пожаров в зависимости от типа климата наибольший «вклад» делают регионы с морским климатом (Архангельская Калининградская, Ленинградская, Мурманская области, Республика Карелия и т.п.). Регионы, обладающие умеренно-континентальным, теплым, субтропическим

и континентальными типами климата, делают примерно равный «вклад» в общую лесопожарную обстановку, но в 2 раза меньший в сравнении с регионами морского типа климата. Если выразить суммарное количество лесных пожаров в зависимости от типа лесорастительной и климатической зоны (в долях от единицы), то получаются значения искомых коэффициентов (табл. 1, 2).

Полученные коэффициенты влияния лесорастительной и климатической зон позволяют вычислить коэффициент пожарной опасности лесного фонда каждого региона. Его физический смысл заключается в том, что он численно показывает природную предрасположенность лесов к пожарам. Для выявления влияния природной составляющей на лесопожарную обстановку необходимо сопоставить значение коэффициента

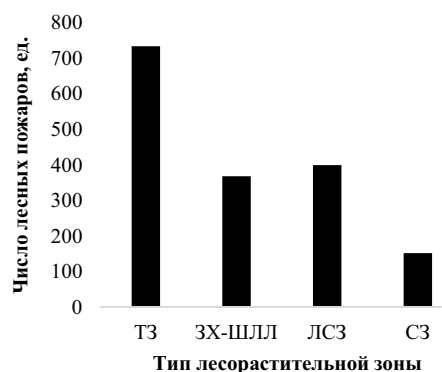


Рис. 15. Распределение числа лесных пожаров по лесорастительным зонам Европейской части РФ

Fig. 15. Distribution of the number of forest fires by forest vegetation zones of the EP of the Russian Federation

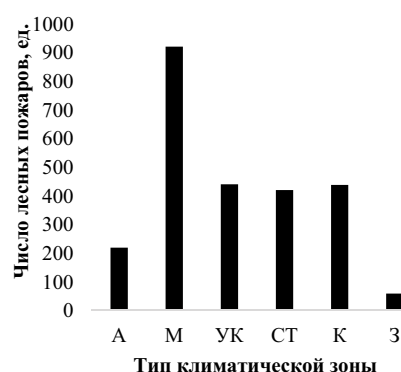


Рис. 16. Распределение числа лесных пожаров по климатическим зонам Европейской части РФ

Fig. 16. Distribution of the number of forest fires in regions of the EP of the Russian Federation by climate zones

Таблица 1. Коэффициенты влияния типа лесорастительной зоны (ЛРЗ) регионов Европейской части РФ

Table 1. Coefficients of influence of the type of forest vegetation zone (FVZ) of the regions of the EP of the Russian Federation

Тип ЛРЗ	Таежная зона	Зона хвойно-широколи- ственных лесов	Лесостепная зона	Степная зона
$K_{ЛРЗ} / K_{FVZ}$	1	0.5	0.54	0.21

Таблица 2. Коэффициенты, присвоенные климатическим зонам регионов Европейской части РФ

Table 2. Coefficients assigned to climatic zones of the regions of the EP of the Russian Federation

Тип климата	Арктиче- ский	Морской	Умеренно-кон- тинен-тальный	Субтропи-че- ский	Контин- тальный	Засушли-вый
$K_{КЛЗ} / K_{Clim}$	0.24	1	0.48	0.46	0.48	0.063

пожарной опасности лесов регионов с числом лесных пожаров в них за исследуемый период. Полученная зависимость (рис. 17) должна иметь линейный характер.

Такой подход имеет ряд особенностей. Во-первых, линейная зависимость не будет исходить из начала координат, так как

в отсутствие лесов (лесистость – 0%) такой модельный подход теряет свой смысл ($K_{ПО} = 0$), то есть нет лесов – нет и лесных пожаров. Обратная же ситуация весьма вероятна, то есть леса на территории региона есть, а лесных пожаров в них может не быть. Во-вторых, линейная зависимость делит пространство возможностей

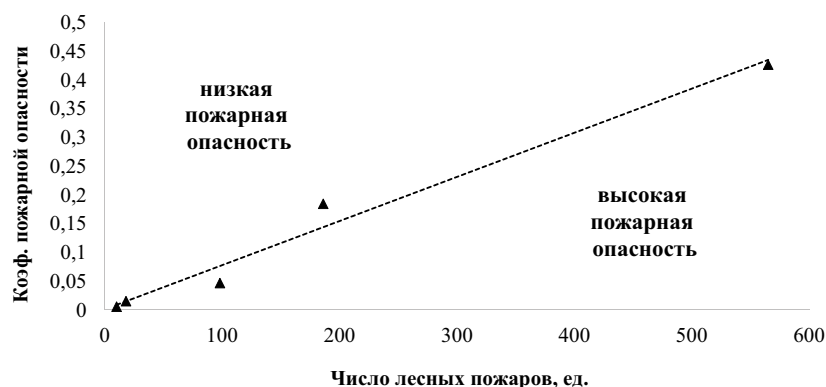


Рис. 17. Графическое представление predisposition лесного фонда регионов к пожарам

Fig. 17. Graphical representation of predisposition of the forest fund of the regions to fires

на две части: выше линии и ниже нее. В область выше линии попадут регионы, в которых лесных пожаров происходит меньше, чем это обусловлено природой, а в нижнюю область попадут регионы с аномально высокой лесопожарной обстановкой. Последняя отражает уровень антропогенной нагрузки на лесной фонд регионов. Следует отметить, что такой модельный поход дает высокий уровень корреляции: $> 0,94$.

На рисунках 18-21 представлены результаты такого сопоставления для регионов четырех Федеральных округов, входящих в состав Европейской части РФ.

Результаты сопоставления показывают, что они имеют облачный характер. Тем не менее, в расчет коэффициента пожарной опасности лесов заложено линейное уравнение, значит, и связь между числом лесных пожаров и коэффициентом пожарной опасности предполагается как линейная. На рисунках 18-21 представлены линейные линии тренда. Наиболее четкое представление о линейности характера такой связи

можно получить из данных рисунка 20 для регионов Южного федерального округа. Из общего линейного тренда выпадает только Республика Адыгея, лесных пожаров в которой происходит меньше, чем выявленная предрасположенность к ним. Фактически (рис. 17) это результаты моделирования регионов Южного федерального округа без включения в него данных для Республики Адыгея.

Для ЦФО наихудшая ситуация относительно лесных пожаров наблюдается в Воронежской и Московской областях, наилучшая – в Костромской и Ярославской областях. Для СЗФО наихудшая ситуация наблюдается в Ленинградской и Псковской областях, а также в Республике Коми, а наилучшая – в Архангельской и Новгородской областях. Наиболее сложная ситуация с лесными пожарами в ПривФО, где наихудшая ситуация наблюдается в Самарской, Саратовской, Оренбургской и Ульяновской областях, а также в Республике Башкирия, наилучшая – в Кировской области и Удмуртской Республике.

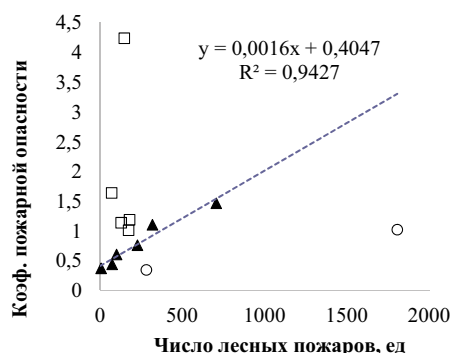


Рис. 18. Число лесных пожаров в регионах ЦФО от коэффициента пожарной опасности региона

Fig. 18. The number of forest fires in the regions of CFD vs fire hazard coefficient

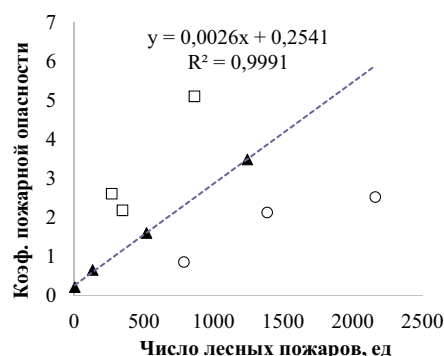


Рис. 19. Число лесных пожаров в регионах СЗФО от коэффициента пожарной опасности региона

Fig. 19. The number of forest fires in the regions of NWFD vs fire hazard coefficient of the region

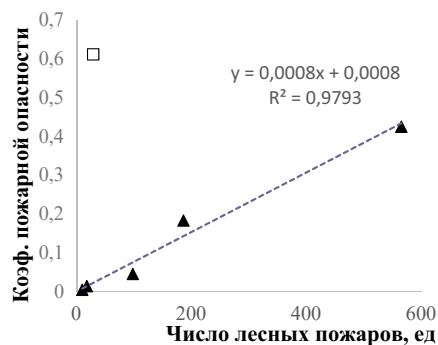


Рис. 20. Число лесных пожаров в регионах ЮФО от коэффициента пожарной опасности региона

Fig. 20. The number of forest fires in the regions of SFD vs fire hazard coefficient

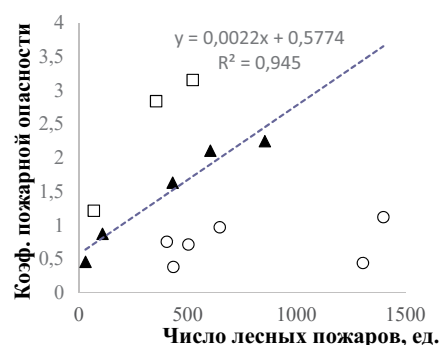


Рис. 21. Число лесных пожаров в регионах ПривФО от коэффициента пожарной опасности региона

Fig. 21. The number of forest fires in the regions of VFD vs fire hazard coefficient

Выводы

В результате проведенной работы количественно оценена предрасположенность лесов к пожарам в регионах четырех Федеральных округов Европейской части РФ: Центрального, Северо-западного, Южного и Приволжского. Указанный параметр показывает «вклад» природных условий в возможную лесопожарную обстановку

Список использованных источников

1. Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды: приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 5 июля 2011 г. № 287. Электронный ресурс. <https://docs.cntd.ru/document/902289183>
2. Иванов В.А., Зверева Д.В. Иванова Г.А. и др. Антропогенная пожарная опасность лесов Среднесибирского подтаежно-лесостепного района // Хвойные бореальной зоны. 2023. № 5. С. 390-398. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-5-390-398 EDN: KWOBPQ
3. Иванова Г.А., Иванов В.А., Мусохранова А.В. и др. Лесные пожары и причины их возникновения на территории Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2023. № 6. С. 6-16. DOI: 10.15372/SJFS20230602 EDN: WLJLIC
4. Плотнокова А.С., Мелехова И.С. Шкала природной пожарной опасности лесных экосистем. Обзор современных российских методических подходов // Вопросы лесной науки. 2021. № 2. С. 1-13. DOI: 10.31509/2658-607x-202142-2 EDN: AMVVAC
5. Котельников Р.В., Мартынюк А.А. Методические подходы к оценке эффективности региональных шкал пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии имени С.М. Кирова. 2023. № 246. С. 162-176. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.246.162-176 EDN: STZOLS
6. Иванов В.А., Горошко А.А., Бакшеева Е.О. и др. Региональные шкалы пожарной опасности по условиям погоды для лесов Амурской области // Хвойные бореальной зоны. 2020. № 1-2. С. 34-42. EDN: ZJVPUV
7. Шур Ю.З., Нешатаев В.Ю., Степченко А.А. и др. Региональные шкалы оценки природной пожарной опасности лесов // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2020. № 2. С. 59-69. DOI: 10.21178/2079-6080.2020.2.59 EDN: LWLCCU
8. Козаченко М.А., Удалова О.Г., Ивченко О.А. и др. Процессы пожарного созревания лесных горючих материалов в лесах Саратовского лесничества Саратовской области // Успехи современного естествознания. 2021. № 9. С. 5-12. DOI: 10.17513/use.37678 EDN: XMQDTP
9. О применении региональных классов пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство лесного хозяйства, от 9 октября 2013 г. № 288
10. Сайт ФБУ «Авиалесоохрана» <https://aviales.ru/>
11. Лесные планы регионов, входящих в Центральный, Северо-Западный, Южный и Приволжский федеральные округа
12. Котельников Р.В., Мартынюк А.А. Математическая оценка достоверности информации о лесных пожарах // Известия вузов. Лесной журнал. 2023. № 3. С. 21-34. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-21-34-1036-2023-3-21-34 EDN: XYVEYI

в лесах. Заложенный в применяемую математическую модель линейный характер зависимости подтвержден результатами сопоставления численного коэффициента пожарной опасности лесного фонда регионов с числом лесных пожаров, а отклонения от него показывают эффективность мер противопожарной профилактики в регионах.

References

1. Order of the Federal Forestry Agency of July 5, 2011 No. 287 "On approval of the classification of natural forest fire hazard and the classification of forest fire hazard depending on weather conditions." – Electronic resource. <https://docs.cntd.ru/document/902289183>
2. Ivanov V.A., Zvereva D.V., Ivanova G.A. et al. Anthropogenic Fire Hazard of Forests in the Central Siberian Subtaiga-Forest-Steppe Region // Conifers of the Boreal Zone. 2023. No. 5. P. 390-398 DOI: 10.53374/1993-0135-2023-5-390-398. EDN: KWOBPQ
3. Ivanova G.A., Ivanov V.A., Musokhranova A.V. et al. Forest Fires and Their Causes in Central Siberia // Siberian Forestry Journal. 2023. No. 6. P. 6-16. DOI: 10.15372/SJFS20230602 EDN: WLJLIC
4. Plotnikova A.S., Melekhova I.S. Natural Fire Hazard Scale of Forest Ecosystems by. Review of Modern Russian Methodological Approaches // Voprosy lesnoy nauki, 2021, No. 2, P. 1-13. DOI: 10.31509/2658-607x-202142-2 EDN: AMVVAC
5. Kotelnikov R.V., Martynyuk A.A. Methodological approaches to assessing the effectiveness of regional fire hazard scales in forests depending on weather conditions // Bulletin of the S.M. Kirov St. Petersburg Forest Engineering Academy, 2023, No. 246, P. 162-176. EDN: STZOLS. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.246.162-176
6. Ivanov V.A., Goroshko A.A., Baksheeva E.O. et al. Regional scales of fire danger based on weather conditions for forests of the Amur region // Conifers of the boreal zone, 2020, No. 1-2, P. 34-42. EDN: ZJVPUV
7. Shur Yu.Z., Neshataev V.Yu., Stepchenko A.A. et al. Regional scales for assessing the natural fire danger of forests // Transactions of the St. Petersburg Research Institute of Forestry, 2020, No. 2, P. 59-69. DOI: 10.21178/2079-6080.2020.2.59 EDN: LWLCCU
8. Kozachenko M.A., Udalova O.G., Ivchenko O.A. et al. Fire maturation processes of forest combustible materials in the forests of the Saratov forestry of the Saratov region // Advances in modern natural science. 2021. No. 9. P. 5-12. DOI: 10.17513/use.37678 EDN: XMQDTP
9. ORDER of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation Federal Forestry Agency dated October 9, 2013 No. 288 "On the Application of Regional Fire Hazard Classes in Forests Depending on Weather Conditions"
10. Website of the Federal Budgetary Institution "Avialesokhrana" <https://aviales.ru/>
11. Forest plans of the regions included in the Central, Northwestern, Southern, and Volga Federal Districts.
12. Kotelnikov R.V., Martynyuk A.A. Mathematical Assessment of the Reliability of Information on Forest Fires // News of Higher Education Institutions. Forestry Journal, 2023, No. 3, P. 21-34. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-21-34 EDN: XYVEYI

Информация об авторах

Ольга Александровна Ивченко, канд. с.-х. наук, доцент, ORCID: 0000-0003-0710-5123, SPIN-код: 5833-6637, AuthorID: 989459; olgalexan607@mail.ru

Александр Васильевич Тютин, старший преподаватель, ORCID: 0000-0002-5982-8983, SPIN-код: 4849-6554, AuthorID: 916478; aleksandartiutin@yandex.ru

Максим Анатольевич Козаченко, канд. с.-х. наук, доцент, ORCID: 0000-0002-9165-0759, SPIN-код: 8431-3942, AuthorID: 624821; lesfak-saratov@mail.ru

Ольга Борисовна Сокольская, док. с.-х. наук, профессор, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1723-1289>; SPIN: 1374-9543, AuthorID: 671736, sokolskaya.olg@yandex.ru

Кирилл Евгеньевич Панкин док. с.-х. наук, профессор, доцент, ORCID: 0000-0002-3023-1411, SPIN-код: 2009-4743, AuthorID: 115018; texmexium@mail.ru

About the authors

Olga A. Ivchenko, CSs (Agro), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-0710-5123, SPIN-code: 5833-6637, AuthorID: 989459; olgalexan607@mail.ru

Aleksandr V. Tiutin, senior lecturer, ORCID: 0000-0002-5982-8983, SPIN-code: 4849-6554, AuthorID: 916478; aleksandartiutin@yandex.ru

Maksim A. Kozachenko, CSs (Agro), associate Professor, ORCID: 0000-0002-9165-0759, SPIN-code: 8431-3942, AuthorID: 624821; lesfak-saratov@mail.ru

Olga B. Sokolskaya, DSs (Agro), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1723-1289>; SPIN: 1374-9543, AuthorID: 671736, sokolskaya.olg@yandex.ru

Kirill E. Pankin, DSs (Agro), associate Professor, ORCID: 0000-0002-3023-1411, SPIN-code: 2009-4743, Author ID: 115018; texmexium@mail.ru

Критерии авторства

Ивченко О.А., Тютин А.В., Козаченко М.А., Сокольская О.Б., Панкин К.Е. Выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of authors

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

Поступила в редакцию / Received 16.01.2026

Поступила после рецензирования / Received 05.09.2026

Принята к публикации / Accepted for publication 07.09.2026

Criteria of authorship

O.A. Ivchenko, A.V. Tiutin, M.A. Kozachenko, O.B. Sokolskaya, K.E. Pankin 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

УДК 630*232.32

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-135-142>



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫРАЩИВАНИЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ

Е.М. Рунова¹, А.В. Денисенко²

^{1,2} Братский государственный университет – БрГУ; г. Братск, Российская Федерация

¹ runova0710@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6178-4038

² anneta-anneta20@mail.ru, ORCID: 0009-0002-7999-1726

Аннотация. Цель работы – исследование влияния технологического процесса выращивания сосны обыкновенной в лесных питомниках на качество посадочного материала, а также рост и развитие сеянцев. Рассмотрены две технологии выращивания сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с закрытой корневой системой в двух питомниках Республики Бурятия, в АУ РБ «Лесресурс» и ООО «Леса Сибири». Питомники имеют разную оснащенность, материалы покрытия теплиц, территориальность места нахождения, степень набивки торфяного кома, поливные системы, температурный режим, площади самих питомников; применяются кассеты разного типа, а также разным является подход по внесению минеральных удобрений. Были изучены способы и сроки подготовки семян к посеву семян *Pinus sylvestris* L., воздействие разных минеральных удобрений в вегетативный период развития сеянцев сосны обыкновенной, оборудование для внесения удобрений, агротехнические уходы, мероприятия по борьбе с вредителями и болезнями. По общепринятым методикам проведено определение качества семян, энергии их прорастания. Установлено, что семена обладают высокой энергией прорастания: за 7 дней прорастание составило 87-94%. Для сравнения эффективности технологий выращивания сеянцев в каждой теплице были определены морфометрические показатели 200 сеянцев и определены основные статистические показатели замеров. Проведенный сравнительный анализ морфометрических параметров сеянцев *Pinus sylvestris* L. в различных тепличных комплексах выявил статистически значимые различия в структуре биомассы и в показателях роста. Сеянцы ООО «Леса Сибири» характеризуются повышенной морфометрической однородностью ($CV < 11\%$), что свидетельствует о стабильных условиях культивирования и отработанной агротехнике. В отличие от них сеянцы АУ РБ «Лесресурс» демонстрируют существенное превосходство в развитии корневой системы при меньшем объеме ячеек посадочных кассет. Данное свойство можно объяснить комплексом агротехнических факторов: применением стимуляторов роста, оптимизацией сроков посева и более плотной набивкой кассет.

Ключевые слова: сеянцы, закрытая корневая система, сосна обыкновенная, удобрения, торф, семена

Формат цитирования: Рунова Е.М., Денисенко А.А. Сравнительный анализ различных технологий выращивания сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с закрытой корневой системой. Природообустройство. 2026;Т.19(4):135-142. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-135-142>

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT TECHNOLOGIES FOR GROWING THE COMMON PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) WITH A CLOSED ROOT SYSTEM

Е.М. Runova^{1✉}, A.A. Denisenko²

^{1,2} Bratsk State University – BrSU; Bratsk, Russian Federation

¹ runova0710@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6178-4038

² anneta-anneta20@mail.ru; ORCID: 0009-0002-7999-1726

Abstract. The article discusses two technologies for growing Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with a closed root system in two nurseries in the Republic of Buryatia: Lesresurs and Lesa Sibiri. The nurseries have different equipment, greenhouse cover materials, location, peat ball size, irrigation systems, temperature conditions, nursery area, use of different types of cassettes, and approaches to applying mineral fertilizers. The methods and timing of seed preparation for sowing *Pinus sylvestris* L. seeds, the effect of various mineral

fertilizers on the vegetative development of Scots pine seedlings, the equipment for applying fertilizers, agricultural practices, and measures to control pests and diseases were studied. The quality of the seeds and their germination energy were determined using standard methods. It was found that the seeds have a high germination energy, with a 7-day germination rate of 87-94%. To compare the effectiveness of seedling cultivation technologies, the morphometric indicators of 200 seedlings were determined in each greenhouse, and the main statistical indicators of the measurements were identified. A comparative analysis of the morphometric parameters of *Pinus sylvestris* L. seedlings in various greenhouse complexes revealed statistically significant differences in the biomass structure and growth indicators. The seedlings of Lesa Sibiri LLC are characterized by increased morphometric uniformity ($CV < 11\%$), which indicates stable cultivation conditions and well-established agricultural practices. In contrast, the seedlings of Lesresurs AU RB demonstrate a significant advantage in the development of the root system with a smaller volume of planting cassettes. This property can be explained by a complex of agrotechnical factors: the use of growth stimulants, the optimization of sowing dates, and the denser packing of cassettes.

Keywords: seedlings, closed root system, Scots pine, fertilizers, peat, seeds

Citation format: Runova E.M., Denisenko A.A. Comparative analysis of different technologies for growing the common pine (*Pinus sylvestris* L.) with a closed root system. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(4):135-142. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-135-142>

Введение. В современных условиях интенсификации лесного хозяйства и возрастающих требований к эффективности лесовосстановления, особенно на фоне деградации лесов и климатических изменений, традиционные технологии с использованием посадочного материала с открытой корневой системой (ОКС) зачастую демонстрируют свою недостаточную эффективность. Высокий уровень технологий выращивания сеянцев с закрытой корневой системой (ЗКС) является одним из ключевых факторов обеспечения устойчивого лесовосстановления и повышения продуктивности лесных экосистем. Многочисленные исследования подтверждают эффективность и преимущества сеянцев с ЗКС [1-19].

В рамках федерального проекта «Сохранение лесов», в соответствии Государственной программой Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства» и национального проекта «Экология», во всех регионах нашей страны актуальными являются сохранение и воспроизводство леса. Вместе с тем возникает необходимость в создании новых интенсивных методов выращивания посадочного материала в самых разных климатических условиях.

Цель исследований: изучение влияния технологического процесса выращивания сосны обыкновенной в лесных питомниках на качество посадочного материала, рост и развитие сеянцев.

Материалы и методы исследований. Исследования и сравнительная характеристика технологических процессов выращивания сеянцев сосны обыкновенной выполнялись одновременно в двух питомниках Республики Бурятия: АУ РБ «Лесресурс» и ООО «Леса Сибири». Исследования проводились в течение вегетационного периода 2025 г. и включали в себя сравнительный анализ

посевого материала, субстратов для выращивания сеянцев, комплекса удобрений и других химикатов, а также технологических особенностей выращивания сеянцев: от предварительной подготовки теплиц до выхода готового посадочного материала. Для подтверждения влияния технологических особенностей на рост и развитие сеянцев в каждой теплице был произведен замер морфометрических показателей по 200 сеянцев с применением общепринятых методик и статистической обработкой полученных результатов при использовании пакета программ Excel 2013 и STATISTICA. Объектом исследований явились сеянцы сосны обыкновенной в различных тепличных комплексах Республики Бурятия, а также технологический процесс их выращивания.

Результаты и их обсуждение. Исследования проводились в теплицах различной конструкции и оснащения. В АУ РБ «Лесресурс» каркас теплицы – металлический, покрытие – сотовый поликарбонат толщиной 10 мм, фундамент – бетон, крыша двухскатная. Размер первой теплицы: длина – 31,2 м, ширина – 8,8 м (274,56 м²); размер второй теплицы больше: длина – 31,8 м, ширина – 9,6 м (305,28 м²). В теплицах АУ РБ «Лесресурс» для проветривания сделаны оконные проемы распашного типа. До 15 июня включительно в ночное время суток все теплицы закрываются во избежание перепада температуры и стресса сеянцев.

В тепличном комплексе ООО «Леса Сибири» теплицы – туннельного типа, каркас металлический, покрытие пленочное, проветривание – боковое рулонного типа, фундамент отсутствует. Полив тепличного комплекса осуществляется из реки Селенга. Предварительно наполняются



а)



б)

Рис. 1. Теплицы АУ РБ «Лесресурс»:

а) – внешний вид теплицы; б) – рамочное размещение кассет в тепличном комплексе

Fig. 1. Greenhouses of the Lesresurs AU RB:

а) – appearance of the greenhouse, б) – frame placement of the cassettes in the greenhouse complex of the Lesresurs AU RB

емкости объемом 25000 л при помощи насосной станции, происходит распределение воды в подвесную поливную рельсовую поливочная рампу «Mosa». Размеры теплиц: ширина – 9,6 м, длина – 50 м (1440 м²). Кассеты размещались

на металлических поддонах, в каждый поддон входило по 20 кассет; сверху кассет в качестве мульчирования использовался вермикулит вспученный марки ВВТ-100, ГОСТ 12865-67 (рис. 2).

В тепличном комплексе АУ РБ «Лесресурс» использовались кассеты РЖЛ-81 (параметры кассет представлены в таблице 1). В двух теплицах размещалось 233 рамки, на каждой – 15 кассет; общее количество сеянцев сосны обыкновенной составляет 283095 тыс. шт. Затенение выполнено затеняющей сеткой, полив теплиц осуществляется распылителями форсуночного типа, расположенными на металлических балках. Поливные форсунки расположены на каждом ряду, где расставлены рамки. Распыление – капельное («имитация дождя»); в качестве мульчирования использовался вермикулит мелкой фракции 0-10 мм.

В таблице 1 представлена характеристика семенного материала, использованного в исследованиях. Методика предусматривала проращивание в нейтральной среде без применения

**Рис. 2. Теплица туннельного типа
ООО «Леса Сибири»****Fig. 2. Tunnel-type greenhouse of 'Lesa Sibiri' LLC**

**Таблица 1. Характеристики кассет и семенного материала
для выращивания сосны обыкновенной с закрытой корневой системой**

Table 1. Specifications of cassettes and seed material for growing Scots pine with a closed root system

№	Характеристики кассет	Тепличный комплекс	Семенной материал	Технологический процесс
1	Внешние габариты: 38,5 × 38,5 × 7,3 см. Размер ячейки: 4,1 × 4,1 × 7,3. Количество ячеек – 81. Объем ячейки – 85 см ³ . Количество сеянцев на 1 м ² – 549 шт.	АУ РБ «Лесресурс»	Республика Бурятия, Джидинское лесничество, Джидинское участковое лесничество, лесосеменной район, 21; семена 1 класса.	Ручной способ. Кассеты наполняют торфом, проливают водой и уплотняют утаптыванием на специальных поддонах.
2	К-100 Air Block. Внешние габариты: 38,5 × 38,5 × 10,0 см, количество ячеек – 100 Объем ячейки – 85 см ³ . Количество сеянцев на 1 м ² – 676 шт.	ООО «Леса Сибири»	Иркутская область, Голоустненское лесничество, Малоголустненское участковое лесничество, Булунчукская дача, лесосеменной район, 21, семена 1 класса.	Автоматическая линия высевы семян сосны обыкновенной.

стимуляторов роста с использованием обычной воды. Такой подход позволил получить объективные данные о физиологических характеристиках семян и исключить влияние внешних факторов на показатели прорастания. Энергия прорастания характеризует дружность всходов, что крайне важно для получения выровненного посадочного материала в теплице. В АУ РБ «Лесресурс» после 7 дней энергия прорастания составила 87%. В тепличном комплексе ООО «Леса Сибири» семена были заложены на проращивание 27 апреля с последующим контролем 3 мая. Финальная всхожесть достигла 94%. В таблице 1 приведена характеристика кассет и семенного материала.

В таблице 2 представлены рецепты торфяного субстрата, используемые в лесных питомниках.

По выбору торфяного субстрата есть различия начиная от диапазона кислотности, наличия агроперлита, а также состава макро- и микроэлементов в торфе.

В торфе, используемом в АУБ «Лесресурс», отсутствует агроперлит, но содержится комплексное удобрение Pg Mix, в состав которого входят: N общий – 12%, нитратный N-NO₃ – 7%, аммиачный N-NH₄ – 5%, P₂O₅ – 14%, K₂O – 24%, Mg – 1,3%, MgO – 2%; микроэлементы S – 5,6%, SO₃ – 14%, B – 0,03%, Cu – 0,15%, Fe – 0,09%, Mn – 0,16%, Mo – 0,2%, Zn – 0,04%; кислотность составляет 4,0-4,5 pH (несколько высока). Полив сеянцев сосны обыкновенной осуществляется из скважины, и даже после оттаивания воды кислотность – pH 11,66, то есть вода имеет щелочную реакцию, вследствие чего кислотность торфяного субстрата понижается при поливе.

В ООО «Леса Сибири» использовали торфяной субстрат верховой низкой степени разложения до 15%, рецепт – 9КМУ/1/0,25, фракции – 0-10 мм, в состав которого входила известковая мука, КМУС-1 – комплексное порошкообразное минеральное удобрение с микроэлементами, предназначенное для заправки субстратов, в состав которого входят: N – 12%, P₂O₅ – 14%,

K₂O – 23%, MgO – 2%, S – 4,5%; микроэлементы: Fe (ЭДТА) – 0,09%, Zn – 0,04%, Cu – 0,15%, Mn – 0,16%, Mo – 0,2%, B – 0,03%; агроперлит составляет 10%, кислотность торфа – pH 4,2-4,8 (немного ниже, чем в АУ РБ «Лесресурс», но это объясняется тем, что кислотность воды в реке Селенга по замерам составляет 7,64 pH, то есть она практически нейтральная).

В технологическом процессе ручной набивки кассет для уплотнения использовали метод штабелирования с установкой пустых кассет сверху в качестве дополнительной нагрузки, затем повторно засыпали торфом. Далее набитые кассеты перемещали на деревянные поддоны, проводили первичное увлажнение методом поверхностного полива, а затем выполняли повторное дозированное добавление торфа с последующим формированием посадочных лунок пресс-маркером. На завершающем этапе осуществляли ручной высев семян сосны обыкновенной в лунки с последующей засыпкой торфяно-вермикулитной смесью и перемещением в теплицы (рис. 3а).

Посев сосны в тепличном комплексе ООО «Леса Сибири» осуществлялся с помощью автоматической линии по высеву семян хвойных пород (рис. 3б). Автоматическая линия посева семян сосны обыкновенной включает в себя подготовку субстратов, а именно разрыхление спрессованных торфяных или почвенных брикетов большого объема в модуле «Распаковщик». Разрыхленная смесь автоматически транспортируется из распаковщика в миксер, затем происходит смешивание торфа и смачивающего реагента, готовая смесь выгружается в приемные бункеры основных модулей линии. Заполнение кассет происходит при помощи подачи торфяного субстрата в ячейки кассет K-100 Air Block, затем происходит формирование лунок с помощью специального валика путем создания углублений в заполненных ячейках для последующего посева. Высев семян осуществляется с помощью точечного высевающего барабана, который захватывает семена и размещает их в лунках. Нанесение укрывного

Таблица 2. Рецепты торфяного субстрата, используемые для выращивания

Table 2. Peat substrate recipes used for cultivation

№	Тепличный комплекс	Рецептура состава	Фасовка
1	АУ РБ «Лесресурс»	Торфяной питательный субстрат фракции 0-10 мм, рецепт 4с/1/5,2 ГОСТ Р 51661.4-2000, верховой нейтрализованный торф резной и фрезерный, кислотность pH – 4,0-4,5, содержание комплексного удобрения Pg Mix – не более 1 кг/м ³ , смачивающий реагент – 0,1 л/м ³ , без добавления агроперлита.	Биг-бэйл, 5,2 м ³
2	ООО «Леса Сибири»	Торфяной питательный субстрат фракции 0-10 мм, рецепт 9КМУ/1/0,25, верховой низкой степени разложения до 15%, резной и фрезерный, кислотность pH – 4,2-4,8, смачивающий реагент – 0,1 л/м ³ , перлит – 10%.	Кипа, 250 л



а)



б)

Рис. 3. Технологический процесс посева сосны обыкновенной:

- а) – ручная набивка кассет в тепличном комплексе «Лесресурс»;
б) – автоматическая линия для посева семян сосны обыкновенной в ООО «Леса Сибири»

Fig. 3. The technological process of sowing Scots pine:

- а) - Manual filling of cassettes in the greenhouse complex of the «Lesresurs»;
б) - automatic line for sowing Scots pine seeds of «Lesa Sibiri» LLC

слоя торфа сверху семян происходит из специального бункера, вермикулит подается автоматически из модуля, находящегося у посевной линии наверху. Полив проводится путем орошения кассет из насосной станции, подключенной заранее к посевной линии.

В ходе эксплуатации автоматической линии посева хвойных пород выявлены системные недочеты: неэффективная система полива; вода распределяется поверхностно; отсутствует полное промачивание субстрата. Одним из недостатков автоматической линии является также недостаточное уплотнение торфяного кома в ячейке кассеты, в связи с чем создается нарушение однородности водно-воздушного режима.

В таблице 3 приведены сведения об удобрениях, которые использовались в течение вегетационного периода.

В тепличном комплексе АУ РБ «Лесресурс» применялась технология фертигации с соблюдением 14-дневного интервала, при которой предварительный полив чистой водой предшествовал внесению удобрений через форсунки поливной системы в соответствии с агротехническими нормативами.

В конце вегетационного сезона были произведены морфометрические замеры сеянцев сосны обыкновенной, исследованы были 200 экз., взятых с разных мест тепличного комплекса. Статистический анализ морфометрических показателей сеянцев *Pinus sylvestris* выявил следующие средние значения: высота надземной части – $16,1 \pm 3,2$ см ($CV = 19,9\%$); длина корневой системы – $10,6 \pm 1,7$ см ($CV = 16,0\%$); диаметр

корневой шейки – $2,46 \pm 0,4$ мм ($CV = 16,3\%$); масса сеянца – $57,8 \pm 9,1$ г ($CV = 15,7\%$).

Выявлено, что соотношение надземной части сеянцев к подземной составляет 1,5 : 1 и соответствует оптимальным параметрам для посадочного материала, умеренный коэффициент вариации (15-20%) свидетельствует о стабильных условиях культивирования. Наблюдается положительная корреляция: между высотой сеянца и диаметром корневой шейки ($r = 0,82$); между массой растения и длиной корневой системы ($r = 0,79$).

Полученные статистические параметры подтверждают эффективность применяемой агротехники и соответствие сеянцев стандартам качества для лесовосстановительных работ. Относительно низкие показатели вариабельности морфометрических характеристик указывают на однородность партии и оптимальные условия выращивания.

В тепличном комплексе ООО «Леса Сибири» применялась иная система удобрений по сравнению с технологией, используемой в питомнике АУ РБ «Лесресурс». В таблице 4 приведена характеристика удобрений, применяемых в ООО «Леса Сибири».

В конце периода выращивания были сделаны замеры 200 сеянцев сосны обыкновенной (табл. 5). Средние значения сеянцев ООО «Леса Сибири»: высота – $10,88 \pm 1,15$ см (надземная часть); $10,34 \pm 0,82$ см (корневая система); $2,09 \pm 0,15$ мм (корневая шейка); $53,4 \pm 2,8$ г (биомасса). В таблице 5 представлены статистические данные двух тепличных комплексах.

Таблица 3. Удобрения, используемые в тепличном комплексе АУ РБ «Лесресурс» в 2025 г.

Table 3. Fertilizers used in the greenhouse complex of the AU RB «Lesresurs» in 2025

Наименование	Квалификация	Состав	Норма внесения
Калия перманганат	Антисептическое средство	KMnO ₄	1 мл/10 л
Карбамид	минеральное удобрение	N – 46%, P – 0%, K – 0%	20 г/м ²
Акварин 5	минеральное удобрение	N – 18%, P ₂ O ₅ 1-8%, K ₂ O – 18%, Mg – 1,5%, Сера, S + микроэлементы: Fe (ДТПА) – 0,054%, Zn (ЭДТА) – 0,014%, Cu (ЭДТА) – 0,01%, Mn (ЭДТА) – 0,042%, Mo – 0,004%, B – 0,02%.	1 кг/1000 л
Акварин 13	минеральное удобрение	N – 13%, P ₂ O ₅ 41%, K ₂ O – 13%; микроэлементы: Fe (ДТПА) – 0,054%, Zn (ЭДТА) – 0,014%, Cu (ЭДТА) – 0,01%, Mn (ЭДТА) – 0,042%, Mo – 0,004%, B – 0,02%.	1 кг/1000 л
Акварин 16	минеральное удобрение	N – 6%, P ₂ O ₅ 12%, K ₂ O – 36%, MgO – 2%, S – 4%; микроэлементы: Fe (ДТПА) – 0,054%, Zn (ЭДТА) – 0,014%, Cu (ЭДТА) – 0,01%, Mn (ЭДТА) – 0,042%, Mo – 0,004%, B – 0,02%.	1 кг/1000 л
Сульфат калия	минеральное удобрение	N – 0%, P – 0%, K – 52%	34 г/м ²
Биомикариза	биофунгицид	живые споры, мицелий и споры штаммов эндомикоризного гриба	4кг/800 л

Таблица 4. Система удобрений и средств защиты в тепличном комплексе «Леса Сибири»

Table 4. Fertilizer and pesticide system in the greenhouse complex of «Lesa Sibiri»

Наименование	Квалификация	Состав	Норма внесения
Калия перманганат	Антисептическое средство	KMnO ₄	1 мл/10 л
Акварин 5	Минеральное удобрение	N – 18%, P ₂ O ₅ – 18%, K ₂ O – 18%, Mg – 1,5%, S + микроэлементы Fe, Zn, Cu, Mn, Mo, B	1 кг/1000 л
Фитоспорин-М	Биофунгицид	Живые бактерии <i>Bacillus subtilis</i>	100 г/10 л
Суперфосфат	Минеральное удобрение	Азот – 6%, фосфор – 26%	34 г/м ²
Ракус	Фунгицид	Эпоксиконазол, ципрконазол	10 мл/10 л
Акварин 16	Минеральное удобрение	N – 6%, P ₂ O ₅ – 12%, K ₂ O – 36%, MgO – 2%, S – 4% + микроэлементы Fe, Zn, Cu, Mn, Mo, B	1 кг/1000 л
Сульфат калия	Минеральное удобрение	N – 0%, P – 0%, K – 52%	34 г/м ²
Биомикориза	Биофунгицид	Живые споры и мицелий <i>Glomus intradices</i>	8 кг/1600 л

Таблица 5. Сравнительный статистический анализ
морфометрических показателей сеянцев

Table 5. Comparative statistical analysis of morphometric indicators of seedlings

Показатель	ООО «Леса Сибири»	АУ РБ «Лесресурс»
Высота надземной части, см	10,88 ± 1,15	16,08 ± 3,20
Длина корневой системы, см	10,34 ± 0,82	10,63 ± 1,70
Диаметр корневой шейки, мм	2,09 ± 0,15	2,46 ± 0,40
Масса, г	53,4 ± 2,8	57,8 ± 9,1
Коэффициент вариации, %	8,9-10,6	15,7-19,9

Проведенный сравнительный анализ морфометрических параметров семян *Pinus sylvestris* в различных тепличных комплексах выявил статистически значимые различия в структуре биомассы и показателях роста. Сеянцы ООО «Леса Сибири» характеризуются повышенной морфометрической однородностью ($CV < 11\%$), что свидетельствует о стабильных условиях культивирования и отработанной агротехнике. В отличие от этого сеянцы АУ РБ «Лесресурс» демонстрируют существенное превосходство в развитии корневой системы при меньшем объеме ячеек посадочных кассет. Данное свойство можно объяснить комплексом агротехнических факторов: применением стимуляторов роста, оптимизацией сроков посева, дифференцированным внесением стартовых доз азотных удобрений.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

В результате анализа установлено, что в АУ РБ «Лесресурс», несмотря на меньшую

глубину посадочной емкости (7,3 см против 10 см) и меньшую степень автоматизации производственного процесса, сеянцы демонстрируют превосходство по ключевым морфометрическим показателям: высота больше высоты сеянцев ООО «Леса Сибири» на 47,8%; толщина стволика больше на 17,8%; масса сеянцев больше на 8,2%. Данное отличие можно объяснить особенностями состава торфа, системой удобрений с оптимальным соотношением макро- и микроэлементов и особенностями агротехнических приемов в разных тепличных комплексах, а также технологией наполнения кассет с большей плотностью торфяного кома.

Автоматизированное наполнение (ООО «Леса Сибири») кассет вследствие погрешностей настройки оборудования привело к недостаточным плотности и объему торфяного субстрата. В дальнейшем в тепличном комплексе было закуплено дополнительное оборудование – смеситель для торфа SIDLOV CM10-2100X970, который обеспечил более высокую плотность торфа за счет его перемешивания и смачивания.

Список использованных источников

1. Якимов Н.И., Поплавская Л.Ф., Сероглазова Л.М. Влияние состава субстрата на рост и развитие сеянцев сосны с закрытой корневой системой // Труды БГТУ. № 1. Лесное хозяйство, 2004. С. 189-192
2. Якимов Н.И. Агротехника выращивания лесного посадочного материала с закрытой корневой системой // Труды БГТУ. № 1. Лесное хозяйство, 2006. С. 207-210.
3. Носников В.В., Селищева О.А., Юренин А.В. [и др.] Опыт применения гумата калия в составе торфяного субстрата при выращивании сеянцев сосны и ели с закрытой корневой системой // Лесное хозяйство: материалы 89-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3-18 февраля 2025 г. Минск: БГТУ, 2025. С. 360-365.
4. Сеньков А.О. Адаптация сеянцев сосны обыкновенной с закрытой корневой системой на сплошных вырубках средней подзоны тайги: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2005. 19 с.
5. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Клишина Л.И. [и др.] Морфометрические параметры сеянцев сосны с открытой и закрытой корневой системой // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. Т. 4. С. 52-67.
6. Сахнов В.В., Пурыев А.С. Совершенствование технологий выращивания посадочного материала хвойных пород для целей лесовосстановления и лесоразведения в различных почвенно-климатических условиях // Проблемы воспроизводства лесов в Российской Федерации. Пушкино: ВНИИЛМ, 2015. С. 135-142.
7. Казаков В.И., Проказин Н.Е., Лобанова Е.Н., Чукарина А.В. Влияние росторегулирующих препаратов на рост сеянцев сосны в степной зоне // Развитие идей Г.Ф. Морозова при переходе к устойчивому лесопользованию: матер. междунар. науч.-техн. юбилейной конф. (20-21 апреля 2017, ВГЛТУ). Воронеж, 2017 С. 160-162. DOI: 10.24419/LHL.2304-3083.2019.3.03 EDN: UUFUGS
8. Родин А.Р., Грибков В.В., Никитина А.В. Оптимальные соотношения надземной биомассы посадочного материала и корневых систем хвойных пород // Лесохозяйственная информация. 1974. № 15. С. 13-14.

References

1. Yakimov N.I. Influence of the substrate composition on the growth and development of pine seedlings with a closed root system / N.I. Yakimov, L.F. Poplavskaya, L.M. Seroglazova // Proceedings of BSTU. No. 1. Forestry, 2004. P. 189-192
2. Yakimov N.I. Agrotechnics of Growing Forest Planting Material with a Closed Root System / N.I. Yakimov // Proceedings of BSTU. No. 1. Forestry, 2006, P. 207-210.
3. V.V. Nosnikov, O.A. Selishcheva, A.V. Yurenin [et al.] The experience of using potassium humate as part of a peat substrate in the cultivation of pine and spruce seedlings with a closed root system // Forestry: materials of the 89th Scientific-technical conference of the faculty, researchers and postgraduates (with international participation), Minsk, February 3-18, 2025. Minsk: BSTU, 2025. P. 360-365.
4. Senkov A.O. Adaptation of seedlings of Scots pine with a closed root system on continuous cuttings of the middle taiga subzone: Abstract of the dissertation. ... Candidate of Agricultural Sciences. Arkhangelsk, 2005. 19 p.
5. Sakhnov V.V., Puryaev A.S. Improving the technologies of growing coniferous planting material for reforestation and afforestation purposes in various soil and climatic conditions // Problems of Forest Reproduction in the Russian Federation. Pushkino: VNIILM, 2015. P. 135-142.
6. Kazakov V.I., Prokazin N.E., Lobanova E.N., Chukarina A.V. Influence of growth-regulating preparations on the growth of pine seedlings in the steppe zone // Development of G.F. Morozov's ideas in the transition to sustainable forest management: materials of the international scientific and technical conference, anniversary conf. (April 20-21, 2017, VGLTU). Voronezh, 2017 P. 160-162. DOI: 10.24419/LHL.2304-3083.2019.3.03 EDN: UUFUGS
7. Rodin A.R., Gribov V.V., Nikitina A.V. Optimal ratios of above-ground biomass of planting material and root systems of coniferous species // Lesokhozyaystvennaya informatsiya. 1974. No. 15. P. 13-14.
8. Gof A.A., Zhigulin E.V., Zalesov S.V., and Opletayev A.S. The experience of creating forest crops with seedlings with a closed root system on the burnt areas of the Altai Territory

9. Гоф А.А., Жигулин Е.В., Залесов С.В., Оплетев А.С. Опыт создания лесных культур сеянцами с закрытой корневой системой на гарях Алтайского края // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 12-2 (90). С. 125-130. DOI: 10.23670/IRJ.2019.90.12.073 EDN: ZMBMPW
10. Залесов С.В., Лобанов А.Н., Луганский Н.А. Рост и производительность сосняков искусственного и естественного происхождения. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2002. 112 с.
11. Грибов С.Е., Ганжа Н.В. Лесоводственно-экономическая оценка лесных культур, созданных различным видом посадочного материала // Молочно хозяйственный вестник. 2015. 1(17). С. 14-22. EDN: TNZYWL
12. Бобринев В.П., Пак Л.Н. Эффективность выращивания лесных культур крупномерным посадочным материалом в Восточном Забайкалье // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 2 (58). EDN: VVRYAB
13. Рунова Е.М., Денисенко А.В. Технологические аспекты выращивания сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с закрытой корневой системой // Леса России хозяйство в них. 2025. № 1 (92). С. 53-61. DOI: 10.51318/FRET.2025.92.1.006 EDN: PFGJKG
14. Проказин Н.Е., Бартевев И.М., Казаков В.И., Лобанова Е.Н. Особенности роста сеянцев сосны при лесовосстановлении горельников в лесостепной зоне // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7, № 2(26). С. 91-96. DOI: 10.12737/article_5967e9ddbc1144.25242725 EDN: PFGJKG
15. Маленко А.А., Чичкарев А.С., Завалишин С.И., Маленовских А.А., Курсикова Е.С. Выращивание лесных культур сосны с закрытой корневой системой в условиях степи на юге Западной Сибири. Текст: электронный // Лесохозяйственная информация. 2023. № 3. С. 103-116. DOI: Ю.24419/1III.2304-3083.2023.3.08 EDN: SXRAQR
16. Проказин Н.Е., Бартевев И.М., Родин С.А., Казаков В.И., Лобанова Е.Н. Динамика приживаемости и роста культур сосны обыкновенной на горельнике в лесостепной зоне // Современная лесная наука: проблемы и перспективы: матер. Всероссийской научно-практической конференции (20-22 декабря 2017). Воронеж: Истоки, 2017. С. 335-339
17. Родин С.А., Суворов В.И., Казаков В.И. Эколого- и ресурсосберегающая технология и комплекс машин для создания лесных культур // Результаты опытных и научно-исследовательских работ в ОЛХ «Русский лес». Серпухов: 1999. С. 17-19.
18. Граник А.М., Крук Н.К. Рост лесных культур сосны обыкновенной в зависимости от сроков посадки и вида посадочного материала // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. Минск: БГТУ, 2018. № 2 (210). С. 85-90
19. Мочалов Б.А., Бобушкина С.В. Влияние вида кассет на размеры сеянцев сосны с закрытыми корнями и их рост в культурах на Севере // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 5 (335). С. 65-70. EDN: RFKXTZ

Информация об авторах

Елена Михайловна Рунова, д-р с.-х. наук, профессор; ORCID: 0000-0001-6178-4038; SPIN-код: 5662-5260, AuthorID: 423869, runova0710@mail.ru

Анна Викторовна Денисенко, аспирант; SPIN-код: 8793-4969, AuthorID: 1253626; anneta-anneta20@mail.ru

Критерии авторства

Рунова Е.М., Денисенко А.В. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Статья поступила в редакцию / Received 22.11.2025

Одобрена после рецензирования / Received 23.08.2026

Принята к публикации / Accepted 07.09.2026

International Research Journal. 2019. No. 12-2 (90). P. 125-130. DOI: 10.23670/IRJ.2019.90.12.073

10. Zalesov S.V., Lobanov A.N., Lugansky N.A. Growth and Productivity of Artificial and Natural Pine Forests. Ekaterinburg: Ural State Forestry University, 2002. 112 p.

11. Gribov S.E., Ganja N.V. Forestry and Economic Assessment of Forest Cultures Created by Different Types of Planting Material // Dairy Farming Bulletin. 2015. 1(17). С. 14-22. EDN: TNZYWL

12. Bobrinev V.P., Pak L.N. Efficiency of Growing Forest Crops with Large-sized Planting Material in Eastern Transbaikalia // Izvestiya of the Orenburg State Agrarian University. 2016. No. 2 (58). EDN: VVRYAB

13. Runova E.M., Denisenko A.V. Technological Aspects of Growing Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seedlings with a Closed Root System // Forests of Russia, their forestries. 2025. No. 1 (92). P. 53-61. DOI: 10.51318/FRET.2025.92.1.006 EDN: PFGJKG

14. N.E. Prokazin, I.M. Bartenev, V.I. Kazakov, E.N. Lobanova Peculiarities of the growth of pine seedlings in the reforestation of burn areas in the forest-steppe zone // Forestry engineering journal. 2017. Vol. 7, No. 2(26). P. 91-96. DOI: 10.12737/article_5967e9ddbc1144.25242725 EDN: PFGJKG

15. A.A. Malenko, A.S. Chichkarev, S.I. Zavalishin, A.A. Malenovskikh, and E.S. Kursikova. Growing Pine Forest Crops with a Closed Root System in the Steppe Conditions of Southern Western Siberia. Text: electronic // Forestry Information. 2023. No. 3. P. 103-116. DOI: Ю.24419/1III.2304-3083.2023.3.08 EDN: SXRAQR

16. N.E. Prokazin, I.M. Bartenev, S.A. Rodin, V.I. Kazakov, and E.N. Lobanova. Dynamics of the Survival and Growth of Scots Pine Cultures on Burned Lands in the Forest-Steppe Zone // Modern Forest Science: Problems and Prospects: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (December 20-22, 2017). Voronezh: Istoki, 2017, P. 335-339

17. Rodin S.A. Environmental and resource-saving technology and a set of machines for creating forest crops / S.A. Rodin, V.I. Suvorov, and V.I. Kazakov // Results of experimental and research work at the Russian Forest Research Institute. Serpukhov, 1999. P. 17-19.

18. Granik A.M. Growth of Scots pine forest crops depending on the planting time and type of planting material / A.M. Granik, N.K. Kruk // Proceedings of BSTU. Ser. 1, Forestry, environmental management and processing of renewable resources. Minsk: BSTU, 2018. No. 2 (210). P. 85-90

19. Mochalov B.A., Bobushkina S.V. Influence of the type of cassettes on the size of pine seedlings with closed roots and their growth in cultures in the North // Bulletin of higher educational institutions. Forest journal. 2013. No. 5 (335). P. 65-70. EDN: RFKXTZ

Information about the authors

Elena M. Runova, DSs (Agro), Professor; ORCID: 0000-0001-6178-4038; SPIN-код: 5662-5260, AuthorID: 423869, runova0710@mail.ru

Anna V. Denisenko, Postgraduate Student; anneta-anneta20@mail.ru

Authorship criteria

Runova E.M., Denisenko A.V. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they summarized and wrote a manuscript, have copyright for the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

УДК 630*23:630*434(571.620)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-143-148>



АНАЛИЗ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛИСТВЕННОЙ НА ПЛОЩАДЯХ, ПРОЙДЕННЫХ ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ, НА ПРИМЕРЕ ПАДАЛИНСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА ХАБАРОВСКОГО КРАЯ

Л.Ю. Острошенко^{1✉}, Н.Е. Голобородько²

^{1,2} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приморский государственный аграрно-технологический университет»; г. Уссурийск, Российская Федерация

¹ OstroshenkoV@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5379-556X

² yariy.ruso@mail.ru

Аннотация. В статье приведены данные оценки успешности естественного восстановления лиственницы Каяндера (*Larix cajandery* Mayr.) на площадях, пройденных лесными пожарами на территории Падалинского лесничества Хабаровского края. Изучение последствий пожаров выявило разнообразие типов гарей, формирующихся после лесных пожаров в данном регионе. Выделяются участки с сохранившимся жизнеспособным древостоем, разреженные гари, территории с погибшим древостоем и полностью выгоревшие участки. Гари с жизнеспособным древостоем и разреженные гари занимают небольшие площади. На этих участках наблюдаются достаточное количество семян и успешное возобновление лиственницы, что исключает необходимость дополнительных лесовосстановительных мероприятий, за исключением выборочных санитарных рубок. Для эффективного восстановления территорий, затронутых лесными пожарами, требуется комплексный подход к возобновлению лиственницы, включающий в себя стимулирование естественного возобновления, посев семян, а в некоторых случаях – высадку сеянцев. На разреженных гарях, характеризующихся значительной площадью и недостаточным количеством семян, а также на участках с погибшим древостоем и полностью выгоревших территориях отмечается активное возобновление второстепенными лиственными породами и незначительное присутствие хвойных. Здесь целесообразно запроектировать меры, направленные на восстановление площадей хозяйственно-ценной древесной породой – лиственницей.

Ключевые слова: лиственница Каяндера, естественное восстановление, лесные пожары, горельник, редина, жизнедеятельный древостой, санитарные рубки

Формат цитирования: Острошенко Л.Ю., Голобородько Н.Е. Анализ естественного восстановления лиственницы на площадях, пройденных лесными пожарами, на примере Падалинского лесничества Хабаровского края. Природообустройство. 2026;Т.19(4):143-148. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-143-148>

Original article

ANALYSIS OF NATURAL RESTORATION OF LARCH IN AREAS SUBJECTED TO FOREST FIRES USING THE EXAMPLE OF THE “PADALINSKOE FORESTRY” OF THE Khabarovsk REGION

L.Yu. Ostroshenko^{1✉}, N.Ev. Goloborod'ko²

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «State Agrarian-Technological University»; Ussuriysk, Rossiyskaya Federatsiya

¹ OstroshenkoV@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5379-556X

² yariy.ruso@mail.ru

Abstract. The article presents the data on the assessment of the success of natural restoration of the Cajander larch (*Larix cajandery* Mayr.) in the areas subjected to forest fires in the territory of the Padalinskjt forestry of the Khabarovsk region. The study of the consequences of fires revealed a variety of types of burnt areas formed after forest fires in this region. There are areas with surviving viable stands, sparse burnt areas, areas with dead stands, and completely burnt areas. Burnt areas with viable stands and sparse burnt areas occupy small areas. These areas contain a sufficient number of seeds and successful regeneration of larch, which eliminates the need for additional forest restoration measures, with the exception of selective sanitary felling. For effective restoration of areas affected by forest fires, a comprehensive approach to larch

regeneration is required, including stimulation of natural regeneration, sowing seeds, and in some cases planting seedlings. In sparse burnt-out areas, characterized by a significant area and an insufficient number of seeds, as well as in areas with dead trees and completely burnt-out areas, active regeneration by secondary deciduous species and an insignificant presence of conifers is observed. Here it is advisable to plan measures aimed at restoring areas with economically valuable tree species – larch.

Keywords: Cajander larch, natural restoration, forest fires, burnt area, sparse area, viable stand, sanitary felling

Format of citation: Ostroshenko L.Y., Goloborod'ko N.E. Analysis of natural restoration of larch in areas subjected to forest fires using the example of the "Padalinskoe forestry" of the Khabarovsk region. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):143-148. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-143-148>

Введение. Лес – это неотъемлемая часть национального богатства Российской Федерации, представляющая собой ценный ресурс с высокой продуктивностью и качественной древесиной. Значимость леса в экономике страны неуклонно возрастает [1, 2]. Роль леса в природной среде является чрезвычайно многогранной. В регионах Дальнего Востока, подверженных влиянию муссонного климата, лес играет важнейшую роль в смягчении негативных последствий обильных летних осадков – таких, как тайфуны. Он способствует снижению риска наводнений, защищает почву от эрозии и выполняет разнообразные защитные, эстетические, рекреационные и оздоровительные функции [3]. Лесная флора Дальнего Востока отличается своим разнообразием и уникальностью. На территории, включающей в себя Хабаровский и Приморский края, Амурскую, Сахалинскую, Камчатскую и Магаданскую области, произрастает свыше 4000 видов сосудистых растений, принадлежащих почти 800 родам и 160 семействам. В лесах этого обширного региона насчитывается более 500 видов деревьев и кустарников, обладающих значимой хозяйственной ценностью. В этих лесах проводятся лесохозяйственные мероприятия, работы по восстановлению лесов и защите от вредителей, обеспечивается их охрана и защита от пожаров, осуществляется сбор дикорастущих ягод, грибов, лекарственного и технического сырья, а также ведется охотничий промысел [4-6]. Все эти работы выполняются и на территории арендуемого лесного участка ООО «Востокэкспорт» Верхнекурского участкового лесничества КГУ «Падалинское лесничество» Хабаровского края. Леса арендуемого лесного участка – хвойные. Главная древесная порода – лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr). Повышенная антропогенная и активная грозовая деятельность, наблюдаемая в регионе, приводит к возникновению лесных пожаров. По данным учета лесного фонда на 1 января 2023 г., объем гарей на арендуемой территории составлял 2199 га [7], что, соответственно, обусловило увеличение фонда лесовосстановления. Ограниченные масштабы работ

по искусственному лесовосстановлению (ежегодная посадка на площади 30 га) и мероприятий, направленных на стимулирование естественного восстановления лесных массивов (100 га в год), стали причиной того, что на значительной части гарей происходит возобновление посредством малоценных лиственных пород (таких, как осина, рябинник, ольха и ива) либо наблюдается процесс опустынивания. Данная ситуация негативно влияет на функциональные возможности лесов в регионе. В связи с этим существует острая необходимость разработки комплекса мер, ориентированных на восстановление лиственных насаждений на участках, подвергшихся воздействию лесных пожаров.

Цель исследований: анализ процессов формирования различных типов гарей на территориях, пострадавших от лесных пожаров, изучение закономерностей естественного возобновления лесных массивов древесными породами, а также разработка эффективных мероприятий, способствующих успешному возобновлению лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.).

Материалы и методы исследований. Объектом исследований явились горельники и гари, расположенные на территории арендуемого лесного участка ООО «Востокэкспорт» Верхнекурского участкового лесничества КГУ «Падалинское лесничество» Хабаровского края.

С целью исследования процессов восстановления лесных массивов на территориях, затронутых пожарами, нами было осуществлено предварительное обследование насаждений. В рамках данного обследования проводилась идентификация типов горельников и гарей, образующихся на месте пожаров.

На основе результатов предварительного обследования был произведен отбор наиболее репрезентативных участков, на которых впоследствии были заложены 6 пробных площадей. Размер каждой пробной площади варьировался в пределах от 0,5 до 1,0 га. Информация о расположении и характеристиках данных площадей представлена в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика пробных площадей, заложённых на горельниках и гарях лесных участков, арендуемых ООО «Востокэкспортлес» в Верхнекурском участковом лесничестве КГУ «Падалинское лесничество»
Table 1. Characteristics of test plots laid on burnt forest areas and burned-out forest plots leased by ООО Vostokexportles in the Verkhnekursky district forestry of the KGU Padalinskoye forestry

№ пробной площади размер, га	Место- положение	Тип горельника (гари) – площадь, га	Характеристика подроста / Characteristics of undergrowth						Характеристика подлеска
			состав	возраст, лет	категория высоты	густота, кол-во, тыс. шт/га	хар-ка раз- мещения по площади	состояние	
1/1,0	кв. № 148 выдел № 21	Гарь с уничтоженным древостоем – 24,4 га	5Ос5Бб	4 (1-9)	мелкий	редкий	равномерно	сомнительный	обильный
2/0,5	кв. № 175 выдел № 24	Горельник с жизнедеятельным древостоем – 48,2 га	6Лп2Е1П 1Бб	6 (1-12)	мелкий	средняя	равномерно	жизнестойкий (здоровый)	редкий (Sp) равномерно
3/1,0	кв. № 179 выдел № 12	Горельник – редица –14,1 га	9Лп1Бб	5 (1-10)	мелкий	средняя	равномерно	жизнестойкий (здоровый)	редкий (Sp) равномерно
4/1,0	кв. № 179 выдел № 11	Горельник – редица – 82,7 га Burnt areas - sparse areas – 82,7 ha	1Лп4Ос3Бб 2Бж 1Л4Ас3Вв 2Ву	7 (1-14)	средний	густой	равномерно	жизнестойкий (здоровый) viable (healthy)	обильный (cop2) abundant
5/1,0	кв. № 174 выдел № 5	Гарь с усохшим древостоем – 28,4 га	1Лп6Ос2Бб 1Бж	6 (1-12)	средний	густой	куртинами	жизнестойкий (здоровый)	обильный (cop2) abundant
6/1,0	кв. № 187 выдел № 2	Контроль – не трону- тое пожаром насажд. 4Лп3Е2П1Б – 41,2 га	8Лп1Е1П 8Л1S1F	14 (2-29)	крупный	средняя	равномерно	жизнестойкий (здоровый)	редкий (Sp) куртинами

На экспериментальных участках, организованных в шахматном порядке с плотностью 15-20 шт., были заложены учетные площадки размером 20 м² (4 × 5 м). На этих площадках с использованием общепринятых методик изучались существующая древесина, кустарниковая и травянистая растительность; оценивались видовой состав, численность, а также средние значения высоты и диаметра растений.

Класс бонитета и полнота древостоя до момента пожара определялись на основе данных таксационного описания. На основании информации об учетных площадках составлялась общая характеристика для каждого экспериментального участка. Полученные данные впоследствии для удобства анализа и сравнения пересчитывались на площадь в 1 га.

Весь цифровой материал по каждой пробной площади подвергали статистической обработке в прикладной программе Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Естественное восстановление лесных массивов на территориях, затронутых пожарами, определяется рядом факторов включая тип и размер гари, присутствие источников семян, а также состояние подлесочного яруса и почвенного покрова.

Подлесок, характеризующийся высотой от 0,5 до 1,2 м, отличается значительным разнообразием видового состава с преобладанием лиственных пород деревьев. В отдельных локациях отмечается произрастание кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel). Степень проективного покрытия составляет в среднем 56%.

Напочвенный покров также является разнообразным; зачастую он равномерно распределен по площади, но встречается и куртинами.

В целом подрост является жизнеспособным. Однако в составе преобладают осина и береза, что объясняется биологическими и экологическими особенностями данных древесных пород.

Анализ статистических данных убедительно демонстрирует, что разнообразие лесорастительных условий, формирующихся на различных типах гарей, оказывает значительное воздействие на количественные и качественные характеристики естественного восстановления лиственничных насаждений. Различия в почвенных условиях, освещенности и влажности, свойственные гарям разного происхождения и возраста, приводят к существенным вариациям в густоте подроста лиственницы, его видовом составе и скорости роста.

Таким образом, успешное возобновление лиственницы напрямую зависит от комплекса факторов, определяемых конкретными лесорастительными условиями на гарях. Точность показателей подроста по высоте – в пределах 3,1-3,4; достоверность – 29,6-33,6. Показатель существенности различий составляет больше трех. Различия по высоте подроста на пробных площадях и на контроле статистически существенны, что свидетельствует о достоверности полученных данных (табл. 2).

Результативность естественного восстановления леса на территориях, затронутых лесными пожарами, характеризуется значительной вариативностью.

Участок гари с полностью уничтоженным древостоем (пробная площадь № 1), расположенный в непосредственной близости от населенного пункта Унакта, неоднократно подвергался воздействию лесных пожаров. Количество подроста на данном участке невелико и не превышает 1,7 тыс. экз. на 1 га. В видовом составе преобладают осина и береза белая (*Betula alba*, пом. rej.) – древесные породы, обладающие высокой скоростью заселения гарей, однако не представляющие значительной хозяйственной ценности. На подобных территориях рекомендуется

создание лесных культур лиственницы путем предварительной подготовки почвы.

Из данных литературы известно, что лесной пожар, обуславливающий формирование горельников-редин, является обычно беглым. Огонь не повреждает древостой, уничтожает захламленность в лесу и минерализует почву, обеспечивая хорошее возобновление леса [8-11].

На горельниках с жизнедеятельным древостоем (пробная площадь № 2) лиственница возобновляется удовлетворительно.

Самосев демонстрирует жизнестойкость и равномерное распределение по территории.

Процесс восстановления лесного массива на участках, подвергшихся пожарам и представляющих собой редкие леса, в значительной степени определяется размером пострадавшей территории и присутствием источников семян. Ограниченная площадь гари и близость зрелого древостоя на участке № 3 способствовали успешному возобновлению популяции лиственницы.

На подобных участках, пострадавших от пожаров, целесообразно сосредоточиться на мерах, направленных на предотвращение повторных возгораний. К таким мерам относятся: проведение профилактической работы с населением, включающей в себя разъяснительные беседы; создание и поддержание минерализованных полос, служащих барьером для распространения огня; проведение выборочных санитарных рубок с удалением сухостойных деревьев в объеме 10-16 куб. м на 1 га.

Увеличение площади горельника и несопадение лесного пожара с годом семеношения лиственницы (определено по данным отчетности Падалинского лесничества) на пробной площади № 4 способствовало снижению налета семян. Уменьшение количества семян привело к активному разрастанию лиственных пород деревьев (таких, как осина, ива и береза) на выгоревшем участке. Эти породы характеризуются способностью к быстрому возобновлению и росту.

Таблица 2. Вычисление статистических показателей по высоте подроста лиственницы, см

Table 2. Calculation of indicators for the height of larch undergrowth, cm

№ п/п	Статистические показатели	Номер пробной площади					
1	Среднее значение (M)	46,1	55,6	25,9	68,9	83,9	169,7
2	Среднее квадратическое отклонение (δ)	8,4	10,2	4,7	12,6	14,3	31,0
3	Коэффициент изменчивости (вариации) ©, %	18,3	18,4	18,2	18,3	17,1	18,3
4	Точность опыта (ε)	3,3	3,4	3,3	3,3	3,1	3,4
5	Ошибка среднего значения (m _M)	± 1,5	± 1,9	± 0,9	± 2,3	± 2,6	± 5,1
6	Достоверность (t _m)	29,9	29,6	29,8	30,0	32,1	33,6
7	Существенность различий (t)	16,4	21,2	28,2	9,3	6,9	–

Участок гари под номером 5, характеризующийся иссохшим древостоем, возник вследствие продолжительных низовых пожаров в летний период. Эти пожары привели к полному уничтожению существовавшего подлеска, травянистой и кустарниковой растительности, а также лесной подстилки. Интенсивное выгорание лесной подстилки стало причиной массового усыхания значительной части древостоя на данной территории. Согласно данным лесничества объем сухостойной древесины оценивается в 120 куб. м на 1 га. Сохранили жизнеспособность лишь отдельные, наиболее крупные экземпляры деревьев с толстой корой, обладающие большей устойчивостью к воздействию огня.

В результате пожаров были уничтожены существующий подрост, кустарники, травянистая растительность и лесная подстилка.

На горельниках-рединах и с усохшим древостоем целесообразным является проведение (согласно ст. 62 Лесного кодекса) комбинированного восстановления лиственницы, которое подразумевает подсев семян и посадку сеянцев.

При подсеве семян целесообразно использовать сеялку «Гулимор-1». Ее применение позволяет осуществлять посев мелких семян хвойных пород – в частности, лиственницы. Благодаря использованию указанной сеялки снижаются денежные и трудовые затраты, сокращается время, необходимое для посева семян; отпадает необходимость таких дорогостоящих мероприятий, как содержание питомника, выращивание посадочного материала и закладка лесных культур. Полевые работы по проведению посевов данной сеялкой не требуют дополнительной подготовки почвы. Посев семян возможен на протяжении всего вегетационного периода в площадки, гребни плужных борозд, бульдозерные полосы, а также на участках без предварительной подготовки почвы. Легкость сеялки позволяет пройти с ней ко всем участкам лесовосстановления.

В зависимости от санитарного и лесопатологического состояния насаждений задачами комбинированного лесовосстановления являются посев, посадка леса и предотвращение распространения инфекций стволовых вредителей, которые активно заселяют ослабленный огнем сухостой. На горельниках-рединах и усохших насаждениях (менее 40%) необходимо проводить выборочные санитарные рубки, когда вырубаются строго погибшие, заселенные вредителями или поврежденные пожаром деревья.

Здоровые и жизнеспособные деревья (особенно главные породы) оставляют на корню

как источники семян. Количество оставляемых семенных деревьев составляет от 15 до 30 шт. на 1 га. В оставляемой части насаждений проводится обработка пустых участков разрешенными биопрепаратами для защиты выживших деревьев и молодого подроста. На освободившихся после выборки сухостоя участках активно проводится минерализация почвы. Если усохших насаждений более 40%, проводят сплошные санитарные рубки.

В процессе изучения естественного лесовосстановления на участке, избежавшем воздействия лесного пожара и находящемся в непосредственной близости от исследуемых территорий, обнаружено наличие подроста различных размеров: от небольшого до крупного. Подрост характеризуется высокой плотностью, устойчивостью и равномерным распределением по всей площади. В связи с благоприятными условиями для возобновления леса проведение дополнительных мероприятий не является необходимым.

Полученные данные позволяют предположить, что до возникновения лесных пожаров процесс лесовосстановления в насаждениях, пострадавших от огня, также протекал успешно и соответствовал установленным требованиям.

Выводы

Изучение последствий лесных пожаров выявило разнообразие типов гарей, формирующихся в регионе. Среди них выделяются участки с сохранившимся жизнеспособным древостоем, редкостойные горельники, зоны с погибшими деревьями, а также полностью выгоревшие территории, где древесная растительность уничтожена.

На небольших площадях, где присутствуют жизнеспособные деревья и обеспечено достаточное семеношение, лиственница успешно восстанавливается естественным путем. В таких местах нет необходимости в дополнительных лесовосстановительных мероприятиях, за исключением выборочной санитарной рубки для удаления поврежденных деревьев.

Для эффективного восстановления лесных территорий, пострадавших от пожаров, рекомендуется комплексный подход, включающий в себя содействие естественному возобновлению лиственницы, посев семян, а в некоторых случаях – посадку сеянцев.

На обширных редкостойных горельниках, где недостаточно семян, а также на участках с усохшим древостоем и гарях с полностью уничтоженными деревьями наблюдается активное развитие второстепенных лиственных пород.

Хвойные породы – такие, как лиственница даурская (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) и ель аянская (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carrière), возобновляются в незначительном количестве.

Список использованных источников

1. Dobrynin D., Jarlebring N.Y., Mustalahti I. et al. The forest environmental frontier in Russia: Between sustainable forest management discourses and 'wood mining' practice // *Ambio*. 2021. Vol. 50. Pp. 2138-2152. DOI: 10.1007/s13280-021-01643-6
2. Morkovina S., Ivanova A., Tretyakov A. Economic Evaluation of Alternatives for the Use of Forest Resources // *Actual directions of scientific researches of the XXI century theory and practice*. 2023. Vol. 11, № 1. Pp. 101-116. DOI: 10.34220/2308-8877-2023-11-1-101-116
3. Razjigaeva N., Grebennikova T., Ganzey L. et al. Recurrence of extreme floods in southern Sakhalin Island as evidence of paleo-typhoon variability in the northwestern Pacific since 6.6 ka // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2020. Vol. 556. Pp. 109901. DOI: 10.1016/j.palaeo.2020.109901
4. Виноградова Ю.К., Антонова Л.А., Дарман Г.Ф. и др. Черная книга флоры Дальнего Востока: инвазионные виды растений в экосистемах Дальневосточного федерального округа. М.: КМК, 2021.
5. Ковалев А.П., Громыко О.С. Освоение и состояние лесов Дальнего Востока // *Природообустройство*. 2023. № 1. С. 115-121. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-115-121
6. Сухомиров Г.И. Ресурсы охотничьего и природного плодово-ягодного хозяйства на Дальнем Востоке // «ЭКО»: Всероссийский экономический журнал. 2014. № 9 (483). С. 107-117
7. Лесохозяйственный регламент Падалинского лесничества управления лесами Правительства Хабаровского края: утв. приказом управления лесами Правительства Хабаровского края от 15 ноября 2018 г. № 917П. Хабаровск, 2023. 190 с.
8. Гайсин И.К. Послепожарные изменения в светлехвойных лесах Башкирского заповедника // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2025. № 1. С. 98-114. DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-98-114
9. Надпорожская М.А., Павлов Б.А., Мишин Д.М. и др. Влияние лесных пожаров на формирование подзолов // *Биосфера*. 2020. Т. 12, № 1-2. С. 32-44. DOI: 10.24855/BIOSFERA.V12I1.525
10. Тимченко Н.А., Ткаченко К.Г., Юст Н.А. и др. Пост-пирогенное восстановление лиственницы Гмелина в Амурской области // *Сибирский лесной журнал*. 2024. С. 68-77. DOI: 10.15372/SJFS20240609
11. Утюк В.О., Иванисова Н.В. Естественное возобновление древостоя после низовых пожаров в Ростовской области // *Тимирязевский биологический журнал*. 2023. № 1. С. 68-72. DOI: 10.26897/2949-4710-2023-1-68-72

Информация об авторах

Людмила Юрьевна Острошенко, канд. биол. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-5379-556X; Scopus: 57188728263; PIIID: 731567; WOSResearcherID: CAH-1621-2022; OstroschenkoV@mail.ru

Николай Евгеньевич Голобородько, обучающийся; yariy.ruso@mail.ru

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в разработку концепции статьи, проведение теоретических и эмпирических исследований, а также в написание текста рукописи.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Поступила в редакцию / Received 12.01.2026

Поступила после доработки и рецензирования / Received 23.08.2026

Принята к публикации / Accepted 25.08.2026

Целесообразным является проектирование мер, направленных на восстановление площадей хозяйственно-ценной древесной породой – лиственницей.

References

1. Dobrynin D., Jarlebring N.Y., Mustalahti I. et al. The forest environmental frontier in Russia: Between sustainable forest management discourses and 'wood mining' practice // *Ambio*. 2021. Vol. 50. pp. 2138-2152. DOI: 10.1007/s13280-021-01643-6
2. Morkovina S., Ivanova A., Tretyakov A. Economic Evaluation of Alternatives for the Use of Forest Resources // *Actual directions of scientific researches of the XXI century theory and practice*. 2023. Vol. 11, no. 1. pp. 101-116. DOI: 10.34220/2308-8877-2023-11-1-101-116
3. Razjigaeva N., Grebennikova T., Ganzey L., et al. Recurrence of extreme floods in southern Sakhalin Island as evidence of paleo-typhoon variability in the northwestern Pacific since 6.6 ka // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2020. Vol. 556. pp. 109901. DOI: 10.1016/j.palaeo.2020.109901
4. Vinogradova Yu.K., Antonova L.A., Darman G.F. et al. The Black Book of the Flora of the Far East: Invasive Plant Species in the Ecosystems of the Far Eastern Federal District // Moscow: KMK. 2021.
5. Kovalev A.P., Gromyko O.S. Development and state of the forests of the Far East. 2023. № 1. C. // *Prirodobustroystvo*. 2023. № 1. P. 115-121. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-115-121.
6. Sukhomirov G.I. Resources of hunting and natural fruit and berry farming in the Far East // *All-Russian Economic Journal «EKO»*. 2014. № . 9 (483). P. 107-117.
7. Forestry regulations of the Padalinsky forestry of the Forest Management of the Government of the Khabarovsk Territory: approved by the Order of the Forest Management of the Government of the Khabarovsk Territory of 15.11.2018 No 917P. Khabarovsk, 2023. 190 p.
8. Gaisin I.K. Post-fire changes in the light coniferous forests of the Bashkir Reserve // *Bulletin of Universities. Forest Journal*. 2025. № 1. P. 98-114. DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-98-114.
9. Nadporozhskaya M.A., Pavlov B.A., Mirin D.M. et al. The influence of forest fires on the formation of podzols // *Biosfera*. 2020. V. 12. № 1-2. P. 32-44. DOI: 10.24855/BIOSFERA.V12I1.525.
10. Timchenko N.A., Tkachenko K.G., Yust N.A. et al. Post-pyrogenic restoration of Gmelin's larch in the Amur region // *Siberian Forest Journal*. 2024. P. 68-77. DOI: 10.15372/SJFS20240609.
11. Utyuk V.O., Ivanisova N.V. Natural renewal of the stand after ground fires in the Rostov region // *Timiryazevsky Biological Journal*. 2023. № 1. P. 68-72. DOI: 10.26897/2949-4710-2023-1-68-72.

Information about the authors

Lyudmila Yu. Ostroschenko, CSs (Biol), Associate Professor; ORCID: 0000-0002-5379-556X; Scopus: 57188728263; RSCI ID: 731567; WOSResearcherID: CAH-1621-2022; OstroschenkoV@mail.ru

Nikolai E. Goloborodko, student; yariy.ruso@mail.ru

Author contributions

The authors contributed equally to the concept development, theoretical and empirical research, and manuscript writing.

Юбилей

*70-летие профессора К.Н. Анахаева***К ЮБИЛЕЮ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ЗАСЛУЖЕННОГО ДЕЯТЕЛЯ НАУКИ КБР ПРОФЕССОРА К.Н. АНАХАЕВА****ON THE OCCASION OF THE ANNIVERSARY OF HONORED SCIENTIST OF THE KABARDINO-BALKARIAN REPUBLIC K.N. ANAKHAEV, DSCI. (ENG), PROFESSOR**

Доктор технических наук, профессор **Анахаев Кошкинбай Назирович**, является признанным ученым в таких сферах науки, как теория фильтрации, гидротехническое и мелиоративное строительство, природоохранное обустройство территории, селевые потоки.

Он родился 12 сентября 1956 года, обучался в средних школах села Безенги и Кашхатау Кабардино-Балкарии. В 1972 г. поступил в Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт, который окончил в 1977 г. по специальности «Гидромелиорация» с квалификацией «Инженер-гидротехник».

В 1984 г. К.Н. Анахаев окончил аспирантуру ВНИИ «ВОДГЕО» Госстроя СССР и успешно защитил диссертацию по теме «Методы фильтрационного расчета каменно-земляных плотин», Почетной грамотой ВАК СССР «За лучшую кандидатскую диссертацию 1985-1986 гг. по специальности «Гидротехнические сооружения». В 1997 г. в Московском государственном университете природообустройства Кошкинбай Назирович успешно защитил докторскую диссертацию по теме «Совершенствование конструкций, методов расчетного обоснования и проектирования противофильтрационных устройств грунтовых плотин».

На протяжении (производственной и научно-педагогической) деятельности в течение почти 50 лет К.Н. Анахаев работал мастером участка на строительстве Чегемской оросительно-обводнительной системы, старшим инженером дирекции Эльхотовского гидроузла Минводхоза КБАССР. В 1985-2012 гг. он избирался на академические должности: ассистента, старшего преподавателя, доцента, декана факультета «Природообустройство», заведующего кафедрой «Природообустройство», профессора кафедры «Гидротехнические сооружения, мелиорации и водоснабжение» Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. В 2012-2017 гг. Кошкинбай Назирович работал заведующим отделом экологических исследований и заместителем директора Высокотехнологического геофизического института Росгидромета; в тот же период был членом проблемного совета и научным руководителем планов НИОКР Росгидромета по селевой проблематике.

С 2018 г. по настоящее время К.Н. Анахаев работает главным научным сотрудником в Институте прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук.

Существенные достижения в результате многолетней научной деятельности К.Н. Анахаева заключаются в развитии: методов решения различных задач фильтрации в области математической физики, гидротехнического и природоохранного строительства на основе введения новых методов и приемов последовательных конформных отображений; усовершенствованных конструкций и методов расчетного обоснования водоподпорных гидротехнических сооружений, их противофильтрационных и дренажных устройств; гидравлических и гидромеханических методов исследований фильтрационных потоков в грунтовых плотинах при свободной фильтрации из водотоков (на основе



комплексов Жуковского и Кирхгофа); методов определения неберущихся эллиптических интегралов и функций Якоби в элементарных функциях, на основе которых решены сложнейшие классические задачи фильтрации через перемычки с участком высачивания и пластовым дренажем с построением изотох внутренних скоростей фильтрации; метода расчета устойчивости оползневых склонов на основе нового комплексного расчета с круговыми и гиперболическими очертаниями поверхностей скольжения; селеведения и разработки новых противоселевых и селезащитных сооружений; и др.

Деятельность Кошкинбая Назировича Анахаева всегда отличалась не только своей многогранностью, но и высокой общественной востребованностью. Так, в период подготовки зимних Олимпийских игр «Сочи-2014» он принимал активное участие в составе Межведомственной рабочей группы Минприроды РФ, Оперативного штаба и Рабочей группы ГК «Олимпстрой», Координационного штаба ОАО «Красная Поляна» в разработке мероприятий по обеспечению противоселевой безопасности олимпийских объектов. Кроме того, он руководил научно-исследовательскими работами по изучению возможностей разрушительного воздействия селей с выдачей рекомендаций относительно защитных мероприятий.

За неоценимый вклад в решение селевой проблематики Кошкинбаю Назировичу Анахаеву ГК «Олимпстрой» дважды (в 2012 и 2013) была выражена благодарность за выполненные научно-исследовательские работы.

К.Н. Анахаев трижды отмечен благодарностями АНО «СОЮЗЭКСПЕРТИЗА» Торгово-промышленной палаты РФ (2021, 2024 за высокий профессионализм и ответственность, проявленные при экспертизе причин аварий грунтовой плотины Белопорожской ГЭС, а также за качественно выполненную научно-техническую экспертизу объектов Севано-Разданского каскада ГЭС (Армения, 2024).

Многokратно К.Н. Анахаев оппонировал докторские и кандидатские диссертации, а также выступал в качестве эксперта по различным проектам водохозяйственного, гидроэнергетического и природоохранного строительства. Он избран академиком отраслевых академий. Основные научные результаты К.Н. Анахаева отражены в его научных трудах. Это 300 опубликованных и изданных работ, в том числе патенты на изобретения (37), монографии и учебные пособия (15), научные отчеты по натурным обследованиям селевых бассейнов (более 20), статьи в журналах.

Профессор Кошкинбай Назирович Анахаев – член докторского диссертационного совета при НИУ МГСУ по специальности «Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология», а его научные разработки внедрены в учебный процесс водохозяйственных и природоохранных специальностей ведущих вузов нашей страны: РУДН, МГСУ, МГУП, НИМИ, КБГАУ. Под его научным руководством защищены три кандидатские диссертации.

За трудовые и научные заслуги в 2013 г. К.Н. Анахаеву присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки КБР». Кроме того, ему объявлена Благодарность Президента России В.В. Путина за заслуги в развитии науки и образования, подготовке квалифицированных специалистов, многолетнюю добросовестную работу. В 2023 г. он был награжден нагрудным знаком «Почетный наставник» Минобрнауки РФ (2023), а в 2016 г. ему присвоено почетное звание «Ветеран труда».

Сегодня, в дни своего 70-летнего юбилея, Кошкинбай Назирович Анахаев по-прежнему полон творческих сил, новых замыслов и прогрессивных научных идей.

Нартмир Владимирович Ханов,
заведующий кафедрой гидротехнических сооружений
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Nartmir V. Khanov, DSc (Tech), professor
of the Department of Hydraulic Structures
Russian State Agrarian University,
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,