

ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

4' 2024

Москва, Издательство РГАУ-МСХА

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



ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

4' 2024

Учредитель и издатель:**ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева**Адрес учредителя и издателя:
127434, Российская Федерация,
г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций**Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-58566 от 14 июля 2014 г.**Журнал включен в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ
для публикации трудов соискателей
ученых степеней кандидата и доктора наук
**Издание включено в систему РИНЦ,
CrossRef, AGRIS (Agricultural
Research Information System),
КиберЛенинка (Open Science)**Полнотекстовые версии доступны на сайте
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>Редактор *В.И. Марковская*
Компьютерный набор и верстка –
А.С. Лаврова
Перевод на английский язык –
В.Г. Рябчикова
Ответственный за выпуск –
*Н.Я. Филатова*Адрес редакции: 127434, Москва,
Прянишникова ул., 14, строение 7-7А
Тел.: 8 (499) 976-36-67
Email: pririodamgur@mail.ru
Сайт: environment.elpub.ruОтпечатано в типографии
ООО «Офсет Принт»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 39, корп. 1
Тел: 8 (499) 976-24-85,
8 (916) 503-02-43Подписано в печать 24.10.24 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, 2024**Главный научный редактор****Журавлева Л.А.**, д-р техн. наук, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Заместитель научного редактора****Бенин Д.М.**, канд. техн. наук, доцент, член-кор.
Российской академии водохозяйственных наук
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Члены редакционного совета****Алексеев А.С.**, д-р. геогр. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет имени С.М. Кирова,
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)**Балабанов В.И.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Безбородов Ю.Г.**, д-р. техн. наук, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Брянская Ю.В.**, д-р. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет» (г. Москва, Российская Федерация)**Волосухин В.А.**, д-р. техн. наук, профессор
Академия безопасности гидротехнических сооружений
(г. Новочеркасск, Российская Федерация)**Дубенок Н.Н.**, д-р. с.-х. наук, профессор, академик РАН
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Исмайлов Г.Х.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Кентбаев Е.Ж.**, д-р. с.-х. наук, профессор, Академик КазНАЕН
НАО «Казахский национальный исследовательский университет»
(г. Алматы, Республика Казахстан)**Кирейчева Л.В.**, д-р. техн. наук, профессор
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)**Косиченко Ю.М.**, д. техн. наук, профессор
ФГБНУ РосНИИПМ (г. Новочеркасск, Российская Федерация)**Лисичкин С.Е.**, д-р. техн. наук, с.н.с.
Филиал АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» (Москва, Российская Федерация)**Лихацевич А.П.**, д-р. техн. наук, член-кор. Академии Наук Белоруссии
Республиканское научное дочернее предприятие «Институт мелиорации»
(г. Минск, Республика Беларусь)**Матвеев С.М.**, д-р. биол. наук, профессор
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова
(г. Воронеж, Российская Федерация)**Мирзаев Б.С.**, д-р техн. наук, профессор
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(Ташкент, Узбекистан)**Михеев П.А.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Ольгаренко Г.В.**, д-р. с.-х. наук, профессор, член-корреспондент РАН
ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения
и сельхозводоснабжения Радуга (г. Коломна, Российская Федерация)**Попов И.И.**, PhD, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Пчелкин В.В.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Раткович Л.Д.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Рубин О.Д.**, д-р. техн. наук, с.н.с.
АО «Институт Гидропроект» (Москва, Российская Федерация)**Ханов Н.В.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Хлюстов В.К.**, д-р. с.-х. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Худаев И.Ж.**, канд. техн. наук., доцент
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(г. Ташкент, Узбекистан)**Шевченко В.А.**, д-р. с.-х. наук, профессор, академик РАН
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)**ПОДПИСКА:**электронный каталог «Пресса России» <https://www.pressa-ru/cat/1/edition/t80746/>

Цена подписная



ISSN 1997-6011

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

4' 2024

Founder and Publisher:**Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy**Address of Founder and Publisher:
49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian FederationThe journal is registered
by the Federal service for supervision
of communications, information technology
and mass media**Certificate of registration**
PI No FS 77-58566 dated July 14, 2014The journal is included in the list of publications
recommended by Higher Attestation Commission
of the Russian Federation for publishing papers
of those seeking PhD and DSc scientific degrees
**The issue is listed in the Russian Science
Citation Index, CrossRef,
AGRIS (Agricultural Research Information System),
Kiberleninka (Open Science)**Full versions are posted on the site
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>Editor *V.I. Markovskaya*Computer typesetting and makeup –
*A.S. Lavrova*Translation into English – *V.G. Ryabchikova*
Responsible for the issue of the journal –
*N.Ya. Filatova*Address of the editorial office:
building 7-7A, Pryanishnikova str., 14,
Moscow, 127434, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 976-36-67
Email: prirodangup@mail.ru
Website: environment.elpub.ruPrinted in typography
OOO "Offset Print"
127550, Moscow,
Dmitrovskoe shosse, 39, building 1
Tel.: +7 (499) 976-24-85,
+7 (916) 503-02-43Signed for print 24.10.24
Format 60 84/8, Circulation 500*When using the materials of the journal
in any form reference to the journal is obligatory.*© Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2024**Scientific editor-in-chief****Larisa A. Zhuravleva**, DSci. (Eng), Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Deputy scientific editor-in-chief****Dmitry M. Benin**, CSci. (Eng), Associate Professor, Corresponding Member
of the Russian Academy of Hydro Economic Sciences
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Members of the Editorial Board****Alexander S. Alekseev**, DSci. (Geogr), Professor
St. Petersburg state university named after S.M. Kirov (Saint-Petersburg, Russian Federation)**Victor I. Balabanov**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Yury G. Bezborodov**, DSci. (Eng), Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Yuliya V. Bryanskaya**, DSci. (Eng), Associate Professor
"National Research Moscow State University of Civil Engineering" (Moscow, Russian Federation)**Victor A. Volosukhin**, DSci. (Eng), Professor
Academy of safety of hydraulic structures (Novocherkassk, Russian Federation)**Nikolay N. Dubenok**, DSci. (Agr), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Gabil Kh. Ismailylov**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Erzhan Zh. Kentbaev**, DSci. (Agr), Professor, Academician of KazNAEN
NAO "Kazakh National Research University" (Almaty, Republic of Kazakhstan)**Lyudmila V. Kireycheva**, DSci. (Eng), Professor
Federal Research Center VNIIGiM named after A.N. Kostyakov (Moscow, Russian Federation)**Yury M. Kosichenko**, DSci. (Eng), Professor
FGBNU Russian Research Institute of Applied Mathematics (Novocherkassk, Russian Federation)**Sergey E. Lisichkin**, DSci. (Eng), Senior Researcher
Branch of JSC "Institute Hydroproject – "NIIES" (Moscow, Russian Federation)**Anatoly P. Likhatchevich**, DSci. (Eng),
Corresponding Member of the Academy of Sciences of Belarus
Republican scientific subsidiary unitary Enterprise "Institute of Land Reclamation"
(Minsk, Republic of Belarus)**Sergey M. Matveev**, DSci. (Bio), Professor
Voronezh state forestry engineering university named after G.F. Morozov (Voronezh, Russian Federation)**Bahadir S. Mirzaev**, DSci. (Eng), Professor
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers (Tashkent, Uzbekistan)**Pavel A. Mikheev**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Gennadiy V. Olgarenko**, DSci. (Agr), Professor,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences
All-Russian research institute of irrigation and agricultural water supply systems Raduga
(Kolomna, Russian Federation)**Ivan I. Popov**, PhD, Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Victor V. Pchelkin**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Lev D. Ratkovich**, Doctor of technical sciences, Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Oleg D. Rubin**, DSci. (Eng), Professor, Senior Researcher
Institute Hydroproject – "NIIES" (Moscow, Russian Federation)**Nartmir V. Khanov**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Vitaly K. Khlyustov**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Ibrakhim Zh. Khudaev**, CSci. (Eng), Associate Professor
National Research University "Tashkent institute of irrigation
and agricultural mechanization engineers" (Tashkent, Uzbekistan)**Victor A. Shevchenko**, DSci. (Agr), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Federal Research Center VNIIGiM named after A.N. Kostyakov (Moscow, Russian Federation)

Содержание

Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

В.Н. Краснощёков, Г.В. Ольгаренко, Д.Г. Ольгаренко Развитие подходов к обоснованию мелиоративного режима агроландшафтов	6
Д.А. Рогачев Оптимизация мероприятий технической эксплуатации оросительных систем методами искусственного интеллекта	12
Т.И. Дровозова Методологические подходы к оценке негативного воздействия дренажных вод на водный объект	20
О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, Н.Н. Пуляев, А.С. Гузалов Результаты исследований пожароопасности торфа в зависимости от степени его разложения на землях сельскохозяйственного назначения	26
В.В. Пчёлкин, К.С. Семёнова Конструкции дренажа и метод расчета для подвалов глубокого заложения	34
Исмаил Хеба, В.К. Хлюстов, Ю.Г. Безбородов Роль биомелиорантов в снижении электропроводности и засоленности почв	44
М.А. Карапетян, С.К. Тойгамбаев, Х.А. Абдулмажидов Экспериментальные исследования устойчивости откосов мелиоративных осушительных каналов	52

Гидротехническое строительство

Б.А. Бондарев, П.В. Борков, И.И. Попов, А.Б. Бондарев, В.К. Жидков, Д.А. Хрипунков Оценка уровня безопасности железобетонных конструкций мостов в составе гидротехнических сооружений	58
Н.В. Ханов, С.О. Курбанов, О.Н. Черных, Ф.Т. Дударова Инновационные технологические решения инженерно-биологических сооружений на мелиоративных системах АПК	67

Гидравлика и инженерная гидрология

Р.Б. Закиров, Б.В. Чубаренко, Е.М. Бурнашов Источники песчаного материала для берегозащиты морского берега Балтийской косы	75
Б.А. Середовских, В.В. Дерябина, Д.А. Ярош Состояние водозащитных сооружений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры для защиты населения и территорий от гидрологических опасностей	83
С.В. Посыпанов, С.П. Карпачёв, В.А. Балякин Транспортировка лесоматериалов, поднятых со дна при очистке малых рек	92
Л.Д. Раткович, С.А. Соколова, Муалла Манхаль Оптимизационный алгоритм управления водными ресурсами водохранилищ для обоснования диспетчерских графиков	99
Т.А. Шаташвили, М.Ю. Бадекин, Д.М. Бенин, Н.Н. Ивахненко, Н.А. Коноплин Оценка параметров моделей подземных вод с помощью искусственных нейронных сетей	108

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

Л.Т. Крупская, М.Ю. Филатова, Л.П. Гуль, А.В. Леоненко Разработка критериев оценки пригодности лесных участков для создания лесных плантаций в ДФО	115
С.В. Шайтура, Н.С. Шайтура, Е.М. Митрофанов, А.С. Мухин, С.М. Устинов Применение наземных лазерных сканеров для мониторинга леса	124
Р.А. Хахаев, В.А. Савченкова Разработка автономного роботизированного комплекса в лесовосстановлении и лесоразведении	133
К.А. Пак, О.И. Гаврилова, А.В. Грязькин Сохранность лесных культур сосны в условиях северной Карелии	141

Contents

Land reclamation, water economy and agrophysics

V.N. Krasnoshchekov, G.V. Olgarenko, D.G. Olgarenko Development of approaches to substantiation of the reclamation regime of agricultural landscapes	6
D.A. Rogachev Optimization of measures for the technical operation of irrigation systems by artificial intelligence methods	12
T.I. Drovovozova Methodological approaches to assessing the negative impact of drainage water on a water body	20
O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, N.N. Pulyaev, A.S. Guzalov Results of studies of peat fire hazard depending on the degree of its decomposition on agricultural lands	26
V.V. Pchelkin, K.S. Semenova Drainage structures and calculation method for deep basements	34
Ismail Heba, V.K. Khlyustov, Yu.G. Bezborodov The role of bioremediants in reducing soil electrical conductivity and salinity	44
M.A. Karapetyan, S.K. Toygambayev, Kh.A. Abdulmazhidov Experimental studies of slope stability of reclamation drainage channels	52

Hydraulic engineering construction

B.A. Bondarev, P.V. Burkov, I.I. Popov, A.B. Bondarev, B.K. Zhidkov, D.A. Khripunkov Assessment of the safety level of reinforced concrete bridge structures as part of hydraulic structures	58
N.V. Khanov, S.O. Kurbanov, O.N. Chernikh, F.T. Dudarova Innovative technological solutions for engineering and biological structures on agricultural industrial investigation systems	67

Hydraulics and engineering hydrology

R.B. Zakirov, B.V. Chubarenko, E.M. Burnashov Sources of sand material for coastal protection of the Baltic Spit seashore	75
B.A. Seredovskikh, V.V. Deryabina, D.A. Yarosh Condition of water protection structures of Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra for protection of the population and territories from hydrological hazards	83
S.V. Posypanov, S.P. Karpachev, V.A. Baliakin Transportation of timber materials raised from the bottom when cleaning small rivers	92
L.D. Ratkovich, S.A. Sokolova, Mualla Manhal Optimization algorithm of reservoir water resources management to substantiate dispatch schedules	99
T.A. Shatashvili, M.Yu. Badekin, D.M. Benin, N.N. Ivakhnenko, N.A. Konoplin Assessment of parameters of groundwater models using artificial neural networks	108

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

L.T. Krupskaya, M.Yu. Filatova, L.P. Gul, A.V. Leonenko Development of criteria for assessing the suitability of forest plots for the creation of forest plantations in the Far Eastern Federal District	115
S.V. Shaitura, N.S. Shaitura, E.M. Mitrofanov, A.S. Mukhin, S.M. Ustinov Application of terrestrial laser scanners for forest monitoring	124
P.A. Khakhaev, V.A. Savchenova Development of an autonomous robotic complex in reforestation and afforestation	133
K.A. Pak., O.I. Gavrilova, A.V. Gryazkin Preservation of pine forest crops in the conditions of Northern Karelia	141

ПЕРЕЧЕНЬ ТРЕБОВАНИЙ И УСЛОВИЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ

Общие требования к изданию

Принимается ранее не опубликованное автором произведение – научная статья, практическая или обзорная статья, научная рецензия и отзыв в следующие рубрики журнала:

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика (технические науки);

4.1.6. Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация (сельскохозяйственные науки).

Все принятые статьи проходят процедуру обязательного рецензирования

Выбор рецензента осуществляет Редакционный совет

Структура статьи

Индекс УДК (слева).

ФИО автора(ов): инициалы, фамилия автора(ов).

Полное название представляемой организации (вуза), в которой они работают.

Название статьи без сокращений.

Аннотация статьи на русском и английском языках: рекомендуемый объем 150...250 слов (не более 2000 символов); необходимо осветить цель исследования, методы, результаты (желательно с приведением количественных данных), четко сформулировать выводы.

Ключевые слова на русском и английском языках: рекомендуемый объем от 5 до 10 слов или словосочетаний.

Автоматизированный перевод с помощью программных систем запрещается!

Текст статьи, с включённым иллюстративным материалом (таблицы, рисунки) **излагать структурировано:**

- введение;

- материал и методы;

- результаты и обсуждение;

- выводы (заключение);

- библиографический список.

Библиографический список должен быть составлен в соответствии с последовательностью ссылок в тексте. Количество источников не менее 10.

Сведения об авторах. Полностью указывается фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание автора(ов) и название организации, в которой они работают, телефон, электронный адрес, идентификаторы ORCID, SCOPUS.

Требования к оформлению статьи

• **Текстовый редактор** – Microsoft Word.

• **Шрифт** – Times New Roman (*Размер шрифта* – 14 пт). Недопустимо ставить ручную переносы слов, строк одного абзаца (относится так же к любым заголовкам и подписаным, не имеющим пояснений).

• **Межстрочный интервал** – 1,5.

• **Ориентация** – книжная, без простановки страниц, без переносов, желательно без постраничных сносок.

• **Оформление заголовка** – без выделения строчных букв прописными, без разделения строк Enter-ом.

• **Набор формул.** Использовать редактор формул Math Type 5.x (и выше; в приоритете), либо Equation 3.0, шрифт Times New Roman, размер 11 пт, выравнивание по левому краю без абзацного отступа.

Для удобства при верстке *длина формулы, набранной в редакторе формул, не должна превышать 8 см* (возможно разделение длинного уравнения на строки с дублированием символов на месте переноса).

Недопустимо вставлять уравнения в текст в виде растровых либо векторных изображений.

Формулы должны создаваться одним объектом, а не состоять из частей, разделённых математическими символами или буквами, набранными обычным текстом.

Недопустимо править стили отдельных букв (приводить их к прямому начертанию) в уравнении, набранном в редакторах формул.

Нумеровать только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Нумерация ставится отдельно от набранной формулы, обычным текстом.

Простые математические выражения, не содержащие дробей, корней, сложных индексов и т.д. (цифры и буквы (русские, латинские, греческие; знаки, имеющиеся в таблице символов), размещаются в тексте без использования специальных программ (то же относится ко всем экспликациям).

Экспликация к формулам набирается шрифтом Times New Roman, размер 14 пт, одним абзацем, но без абзацного отступа, выравнивание по ширине страницы.

Суммарное число формул – не более 10.

• **Рисунки** выполнять на компьютере в виде отдельного файла: в растровых форматах TIFF, JPG с разрешением не менее 300 dpi; в векторных форматах CDR, DWG, EPS. Выполнение рисунка средствами Microsoft Word и Excel допускается для схем и диаграмм. Добавление символов и текста к изображениям делается в графическом редакторе во избежание потери этого текста при верстке.

• **Фотографии** выполнять с разрешением не менее 300 dpi.

Обрезка рисунков и фотографий должна производиться до вставки в документ Microsoft Word.

• **Таблицы.** Примечание оформляется под таблицей отдельной строкой, а не в ячейке таблицы.

При приеме статьи автор подписывает согласие на передачу Редакции периодического издания «Природообустройство» (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) прав на издание и распространение статьи без ограничения срока, района распространения журнала и без выплаты вознаграждения.

Отрицательная рецензия, а также несоответствие статьи хотя бы одному из перечисленных условий может служить основанием для отказа в публикации.

Прием статей

По вопросам публикации статей обращаться по телефону: 8 (499) 976-36-67.

E-mail: prirodamgup@mail.ru

<https://www.timacad.ru/about/struktura-universiteta/izdaniia/nauchnyi-zhurnal-prirodobustroistvo>

Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-6-11>

УДК 631.6:332.1



РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ МЕЛИОРАТИВНОГО РЕЖИМА АГРОЛАНДШАФТОВ

В.Н. Краснощёков^{1✉}, Г.В. Ольгаренко^{2✉}, Д.Г. Ольгаренко²

¹ ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации»; Институт государственной службы и управления; 119571, г. Москва, пр-кт Вернадского, 84, Россия

² ФГБНУ ВНИИ «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»; 140483, Московская область, г. Коломна, Коломенский район, поселок Радужный, 38, Россия

Аннотация. В статье рассматривается одна из ключевых проблем, возникающая при разработке и обосновании эколого-экономической эффективности инвестиционных проектов в области мелиорации земель сельскохозяйственного назначения, – проблема оптимизации мелиоративного режима агроландшафтов. С опорой на результаты исследований по данному направлению выявлены недостатки существующих подходов к обоснованию мелиоративных режимов. Суть их сводится к отсутствию механизмов учета изменения системы показателей мелиоративного режима в процессе реализации комплекса мелиоративных мероприятий и оценки эколого-экономических эффектов и ущербов от мелиорации земель. На основании анализа и обобщения материалов научной литературы и проведенных авторами исследований по данной теме разработаны и обоснованы предложения по развитию методических подходов к оптимизации мелиоративных режимов мелиорируемых земель. Предложения заключаются в разработке: дополнительных требований, характеризующих экологическое состояние компонентов агроландшафтов и природной среды в целом; системы моделей, позволяющей описать взаимодействие составляющих биологического и геологического круговоротов, выявить изменение показателей мелиоративного режима и оценить социально-экономические результаты, эколого-экономические эффекты и ущерб при осуществлении комплексной мелиорации, обеспечивающей оптимальный мелиоративный режим агроландшафтов, экологическую и продовольственную безопасность России. Выполнена апробация предложенного подхода на примере лесостепной природно-климатической зоны Центрального федерального округа при обосновании эффективности комплекса мелиоративных мероприятий, обеспечивающих оптимальный мелиоративный режим агроландшафта. Результаты исследований могут быть использованы при разработке мелиоративных инвестиционных проектов.

Ключевые слова: социоприродный подход, мелиоративный режим, экологическая устойчивость, мелиорируемый агроландшафт, эффекты, ущерб, прирост чистого дисконтированного дохода

Формат цитирования: Краснощёков В.Н., Ольгаренко Г.В., Ольгаренко Д.Г. Развитие подходов к обоснованию мелиоративного режима агроландшафтов // Природообустройство. 2024. № 4. С. 6-11. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-6-11>

Original article

DEVELOPMENT OF APPROACHES TO SUBSTANTIATION OF THE RECLAMATION REGIME OF AGRICULTURAL LANDSCAPES

V.N. Krasnoshchekov^{1✉}, G.V. Olgarenko^{2✉}, D.G. Olgarenko²

¹ Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation; Institute of Public Administration and Management; 119571, Moscow, Prospekt Vernadskogo, 84, Russia

² All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems “Raduga”; 140483 Kolomna, Moscow region, Kolomna district, Raduzhny settlement, 38, Russia

Abstract. The article considers one of the key problems that arise in the development and justification of the ecological and economic efficiency of investment projects in the field of agricultural land reclamation, the problem of optimizing the reclamation regime of agricultural landscapes.

Based on the results of research in this area, the shortcomings of existing approaches to the justification of reclamation regimes have been identified, the essence of which is the lack of mechanisms for taking into account changes in the system of indicators of the reclamation regime in the process of implementing a set of reclamation measures and assessing the environmental and economic effects and damages from land reclamation. Based on the analysis and generalization of scientific literature materials and research conducted by the authors on this issue, proposals have been developed and substantiated for the development of methodological approaches to optimizing the reclamation regimes of reclaimed lands, consisting in the development of: additional requirements characterizing the ecological state of components of agricultural landscapes and the natural environment as a whole; a system of models that allows describing the interaction of components of biological and geological cycles, to identify changes in the indicators of the reclamation regime and to assess the socio-economic results, ecological and economic effects and damages in the implementation of complex reclamation, ensuring the optimal reclamation regime of agricultural landscapes, environmental and food security of Russia. The proposed approach was tested on the example of the forest-steppe natural and climatic zone of the Central Federal District in substantiating the effectiveness of a complex of reclamation measures that ensure the optimal reclamation regime of the agricultural landscape. The research results can be used in the development of reclamation investment projects.

Keywords: socio-natural approach, reclamation regime, environmental sustainability, reclaimed agricultural landscape, effects, damages, increase in net discounted income

Format of citation: Krasnoshchekov V.N., Olgarenko G.V., Olgarenko D.G. Development of approaches to substantiation of the reclamation regime of agricultural landscapes // Prirodoobustrojstvo. 2024. № 4. P. 6-11. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-6-11>

Введение. При разработке инвестиционных проектов природоохранного назначения необходимо особое внимание уделять решению вопросов обоснования мелиоративного режима земель сельскохозяйственного назначения. Объясняется это тем, что реализация данных проектов может способствовать не только формированию социо-эколого-экономического эффекта, но и снижению биологического разнообразия, экологической устойчивости и продуктивности мелиорируемых земель при несоблюдении их мелиоративного режима.

Вопросам оптимизации мелиоративных режимов мелиорируемых земель посвящено множество научных работ [1-7], в которых приводится определение понятия «мелиоративный режим». Не останавливаясь на детальном анализе содержания этого понятия в каждой работе, отметим, что эти определения не учитывают изменения системы показателей мелиоративного режима в процессе реализации комплекса мелиоративных мероприятий. Решение этого вопроса возможно за счет включения в действующую совокупность показателей мелиоративного режима дополнительной системы моделей, позволяющей не только описать и систематизировать всю совокупность природных процессов, происходящих в агроландшафтах в результате мелиорации земель, но и получить количественные характеристики в виде эколого-экономического эффекта и ущерба. Научные исследования должны быть направлены на развитие существующих

подходов к обоснованию мелиоративного режима мелиорируемых земель.

Цель исследований: разработка предложений по развитию методического подхода к обоснованию мелиоративного режима мелиорируемых земель.

Материалы и методы исследований. При разработке предложений по развитию методического подхода к обоснованию мелиоративного режима агроландшафтов использованы ландшафтный, сравнительный и исторический подходы. Источниками информации для проведения научных исследований являлись: нормативно-правовые акты и нормативно-технические документы Российской Федерации; сводные отчеты Федеральной службы государственной статистики; данные информационных порталов региональных информационных систем АПК и ЕФИС ЗСХН; база данных РИНЦ и результаты интеллектуальной деятельности авторов.

Результаты и их обсуждение. В основу оценки изменения природных процессов и показателей мелиоративного режима, происходящих в агроландшафтах в результате мелиорации земель, положена следующая система моделей [8-11]:

$$I_0 = \frac{P_6}{lO_c}; \quad (1)$$

$$I_n = \frac{P_6(1 - a_1)}{l(O_c \pm V_m) \cdot (1 - a_0)}; \quad (2)$$

$$I_{\Pi} = 6.4(\Gamma_r + 0.2\Gamma_{\phi}) / 600 + 8.5\sqrt{NPK} + 5.1 \cdot e^{-[h_r - 1] / 4}; \quad (3)$$

$$\Theta_y = \frac{\sum_{i=1}^n F_i k_i}{100} k_{\text{гм}}; \quad (4)$$

$$\bar{I}_{\text{СП}} = 2,24 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot N_4 \cdot N_5 \cdot N_6, \quad (5)$$

где $I_{\text{р}}$, $I_{\text{н}}$ – показатели, характеризующие соотношение тепла и влаги в природных ландшафтах и при мелиорации земель; $P_{\text{с}}$ – радиационный баланс деятельной поверхности, кДж/см² в год; l – количество тепла, необходимого для испарения единицы объема влаги; $O_{\text{с}}$ – годовая величина атмосферных осадков без учета поверхностного стока, см/год; $V_{\text{м}}$ – дополнительный объем воды, который необходимо подать на территорию или отвести с целью предотвращения существенного изменения соотношения тепла и влаги в результате мелиорации земель от природного значения, см/га; α_0, α_1 – альбедо деятельной поверхности в природных условиях и при проведении мелиорации земель соответственно; I_{Π} – показатель, позволяющий определить изменение качественной и количественной характеристики почвы при проведении системы мелиоративных мероприятий; $\Gamma_{\text{с}}$, Γ_{ϕ} – показатели, характеризующие содержание в почве разного типа гумуса (гуматного и фульватного соответственно), т/га; N, P, K – содержание в почве элементов питания: азота, фосфора и калия; hg – показатель гидролитической кислотности; Θ_y – показатель, характеризующий соотношение площадей, занятых биотическими и абиотическими элементами ландшафта с учетом позитивного и негативного воздействия их на природную среду; F_i – территория, занятая i -м элементом неживой и живой природы, %; k_i – показатель, характеризующий экологическую значимость абиотических и биотических элементов ландшафта; $k_{\text{гм}}$ – показатель, учитывающий геолого-морфологическую устойчивость агроландшафта; $O_{\text{СП}}$ – объем смыва почвы в результате водной эрозии и дефляции, т/га; $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$ – показатели, учитывающие устойчивость покрова почвы к смыву, интенсивность естественных осадков, растительный покров агроландшафта и характер рельефа территории.

Для оценки оптимального мелиоративного режима агроландшафтов используется прирост чистого дисконтированного дохода:

$$\Delta \text{ЧДД}_m = \sum_{t=1}^T [\Delta \Theta_{mt}(M_t) - \Delta Y_{mt}(M_t) - K_{mt}(q)] \times \\ \times (1 + E_{\text{н}})^{-t} \rightarrow \max; \quad (6)$$

$$0 \leq M_t \leq M_{\text{нмт}}^{\text{р}}, \quad (7)$$

где $\Delta \Theta_{mt}(M_t)$ – дополнительный социо-эколого-экономический эффект, руб.; $\Delta Y_{mt}(M_t)$ – дополнительный экологический ущерб, руб.; $K_{mt}(q)$ – капитальные вложения, руб.; M_t – экологически безопасная средневзвешенная норма водопотребления [12], м³/га; $M_{\text{нмт}}^{\text{р}}$ – средневзвешенная норма водопотребления, рассчитанная исходя из полного удовлетворения потребностей растений в воде [13], м³/га; q – ордината гидромодуля, л/с/га; T – продолжительность расчетного периода, лет (должна быть не менее 20 лет, в противном случае невозможно учесть все годы по тепло-влажностности, характеризуемые как сухие, средне-сухие, средние, средне-влажные и влажные, а следовательно,

изменение экологического состояния структур агроландшафта и почво-образовательные процессы, протекающие в различные по тепло-влажностности годы); $E_{\text{н}}$ – норма дисконтирования; m – номер варианта мелиоративного режима орошаемых земель; t – год расчетного периода.

Эколого-экономический эффект формируется за счет дополнительного объема продукции в стоимостном выражении, снижения водопотребления растений, сокращения объема сброса загрязненных вод в водные объекты, предотвращения снижения природного плодородия почв и увеличения налоговой базы консолидированного бюджета.

Экономический эффект от производства дополнительного объема продукции определяется в соответствии с рекомендациями [14, 15].

Эффект от предотвращения снижения природного плодородия почв рассчитывается по формуле:

$$\Delta \Theta_m^2 = \left(\Delta I_{\text{Пнт}} \cdot \beta \cdot \Pi_{\text{с}} + \frac{\xi \cdot (g_{\text{бнт}} - g_{\text{онт}})}{1000 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \cdot \Pi_{\text{н}} \right) \cdot F_{\text{оп}}, \quad (8)$$

где $\Delta I_{\text{Пнт}}$ – предотвращение утраты природного плодородия почв (определяется по формулам 1-5), т; β – параметр, учитывающий тип сельскохозяйственных угодий; $\Pi_{\text{с}}$ – экологическая ценность земли, руб/га; $g_{\text{бнт}}$, $g_{\text{онт}}$ – соответственно величины влагообмена в зоне аэрации при применении нормативных и экологически безопасных оросительных норм, м³/га; $F_{\text{оп}}$ – площадь, на которой проводятся оросительные мелиорации, га; ξ – показатель, характеризующий растворимость гумуса в водной среде; $\Pi_{\text{н}}$ – стоимостная оценка органических удобрений, руб/т.

Эффект от снижения водопотребления растений рассчитывается по формуле:

$$\Delta \Theta_m^3 = \left(\sum_{j=1}^{\kappa} \frac{(M_{jmt}^{\text{р}} - M_{jmt})}{\eta} \cdot \alpha_j \right) \cdot F_{\text{оп}} \cdot \Pi_{\text{в}}, \quad (9)$$

где $\Pi_{\text{в}}$ – цена воды, руб/м³.

Размер эффекта, формируемый за счет снижения уровня загрязнения водных объектов, определяется в соответствии с рекомендациями [15].

Экономический эффект от поступления налоговых отчислений в бюджеты разных уровней рассчитывается в соответствии с требованиями налогового законодательства России [16].

Что касается второй составляющей формулы 6 – прироста ущерба $\Delta Y_{mt}(M_t)$, то она формируется за счет затрат на производство дополнительной сельскохозяйственной продукции и эксплуатацию мелиоративной сети осуществление превентивных мер с целью предотвращения или компенсации возможных негативных последствий природной среде. Для их расчета используются модели 1-5, 8 и рекомендации [14, 15].

При оптимизации мелиоративных режимов осушаемых земель предлагается в качестве объекта исследования рассматривать норму осушения. Именно этот показатель предопределяет основные параметры мелиоративного режима осушаемых земель: влажность почвы, содержание гумуса в почве, продуктивность земель, уровень загрязнения водных ресурсов, объем и качество дренажного стока и др. Количественная характеристика показателей, формирующих прирост чистого дисконтированного дохода от осушения земель сельскохозяйственного назначения по каждому варианту мелиоративного режима (формула 8), определяется с использованием тех же моделей (формулы 1-5, 8) и рекомендаций [14, 15]. Различия заключаются в том, что понятия «орошаемые земли», «оросительная норма» заменяются на понятия «осушаемые земли», «объем влаги, отводимой с осушаемых земель».

На заключительном этапе рассчитывается прирост чистого дисконтированного дохода (формула 6) и по максимальному значению определяется оптимальный мелиоративный режим орошаемых или осушаемых земель сельскохозяйственного назначения, параметры которого обеспечиваются обоснованной системой мелиоративных мероприятий.

Изложенный выше подход лег в основу оценки эффективности комплекса мер, обеспечивающего оптимальный мелиоративный режим агроландшафта, расположенного в лесостепной природно-климатической зоны Центрального федерального округа Российской Федерации. В таблицах 1, 2 приведены результаты обоснования системы мелиоративных мероприятий и оценка общественной эффективности их проведения.

Результаты расчетов свидетельствуют об эффективности комплекса мероприятий,

Таблица 1. Система мелиоративных мероприятий, обеспечивающая оптимальный мелиоративный режим агроландшафта (млн га)

Table 1. A system of reclamation measures that ensures the optimal reclamation regime of the agricultural landscape (million hectares)

Показатели <i>Indicators</i>	Числовые значения показателя <i>Numeric values of the indicator</i>
Система мер по предупреждению развития водной эрозии и дефляции почв, в том числе: <i>A system of measures to prevent the development of water erosion and soil deflation: including:</i>	2,2
– агролесотехнические мелиорации / <i>agroforestry reclamation;</i>	0,8
– агротехнические мелиорации / <i>agrotechnical reclamation</i>	1,4
Система мер, направленная на обеспечение кислотно-щелочного баланса в почве <i>A system of measures aimed at ensuring acid-base balance in the soil</i>	2,4
Модернизация и реконструкция мелиоративных систем <i>Modernization and reconstruction of reclamation systems</i>	0,40

Таблица 2. Оценка общественной эффективности комплексных мелиораций, обеспечивающих оптимальный режим агроландшафта (млрд руб.)

Table 2. Assessment of the social effectiveness of complex land reclamation, ensuring the optimal regime of the agricultural landscape (billion rubles)

Показатели <i>Indicators</i>	Интегральные значения показателя за расчетный период* <i>Integral values of the indicator for the billing period*</i>
Объем инвестиций / <i>The volume of investments</i>	163,0
Эколого-экономическая оценка эффекта <i>Ecological and economic assessment of the effect</i>	382,0
Эколого-экономическая оценка ущерба <i>Ecological and economic assessment of damage</i>	185,0
Дополнительный чистый дисконтированный доход <i>Additional net discounted income</i>	34,0

* – продолжительность расчетного периода составляет 20 лет / *duration of the billing period is 20 years*

обеспечивающих оптимальный режим мелиорируемых земель, а их реализация обеспечит: сокращение водопотребления растений на 15-20%; снижение интенсивности процессов водной эрозии и инфильтрации; уменьшение затрат энергетических ресурсов на 30-40%; предотвращение сработки гумуса в размере 0,40-0,8 т/га; снижение объема биогенных веществ, поступающих в водные объекты, на 30-40%; увеличение продуктивности мелиорируемых агробиоценозов в 2-2,5 раза.

Выводы

1. При использовании существующих подходов к оптимизации мелиоративных режимов агроландшафтов особое внимание уделяется вопросам разработки требований к управляемым факторам воздействия на компоненты ландшафта. При этом не предусматриваются механизмы учета изменения совокупности показателей,

характеризующих мелиоративный режим, в период осуществления мелиоративных мероприятий.

2. Разработан новый подход к решению данной проблемы, учитывающий наряду с существующей совокупностью требований к управляемым факторам воздействия на компоненты агроландшафта дополнительные требования, характеризующие их экологическое состояние во времени через предложенную систему моделей. Использование системы моделей позволяет оценить социально-экономические результаты, эколого-экономические эффекты и ущерб при реализации технологий комплексных мелиораций, обеспечивающих оптимальный мелиоративный режим агроландшафтов.

3. Разработан и обоснован комплекс мелиоративных мероприятий в лесостепной зоне Центрального федерального округа, обеспечивающий оптимальный мелиоративный режим агроландшафта.

Список использованных источников

1. Гребенщикова Е.А., Горбачева Н.А. Гидротехнические мелиорации: учебное пособие. Благовещенск: Изд-во Дальневосточного государственного аграрного университета, 2019. 156 с.
2. Айдаров И.П., Голованов А.И., Никольский Ю.Н. Оптимизация мелиоративных режимов и осушаемых сельскохозяйственных земель. М.: ВО Агропромиздат, 1990. 58 с.
3. Голованов А.И. Оптимизация режимов орошения черноземов // Почвоведение. 1993. № 6. С. 79-84.
4. Кирейчева Л.В., Яшин В.М. Формирование эволюционирующего мелиоративного режима на орошаемых землях // Международный научно-исследовательский журнал (International research journal). 2020. № 6 (96). Ч. 1. С. 140-145.
5. Айдаров И.П. Комплексное обустройство земель. Монография. М.: МГУП, 2007. 208 с.
6. Мелиорация земель: Учебник / Под ред. А.И. Голованова. 2е изд., испр. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2015. 832 с.
7. Голованов А.И., Кожанов Е.С., Сухарев Ю.И. Ландшафтоведение. Учебник для студентов вузов. М.: КолосС, 2008. 216 с.
8. Бudyko M.I. Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 327 с.
9. Пегов С.А., Хомяков П.М. Моделирование развития экологических систем. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 222 с.
10. Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В. и др. Агроэкология. Учебник / Под ред. В.А. Черникова, А.И. Черекеса. М.: Колос, 2000. 536 с.
11. Киркби М.Дж., Митчелл Дж.К., Бубензер Г.Д. и др. Эрозия почвы / Пер. с англ., предисл. М.Ф. Пушкарева. М.: Колос, 1984. 415 с.
12. Краснощёков В.Н. Методические подходы к обоснованию оросительных норм сельскохозяйственных культур необходимо совершенствовать // Мелиорация и водное хозяйство. 2013. № 5. С. 6-10.

References

1. Grebenschikova E.A., Gorbacheva N.A. Hydro-technical land reclamation: educational. Blagoveshchensk: Publishing House of the Far Eastern State Agrarian University, 2019. 156 p.
2. Aidarov I.P., Golovanov A.I., Nikolsky Yu.N. Optimization of reclamation regimes and drained agricultural lands. M.: VO Agropromizdat, 1990. 58 p.
3. Golovanov A.I. Optimization of irrigation regimes of chernozems // Soil science, No. 6. 1993. P. 79-84.
4. Kireicheva L.V., Yashin V.M. Formation of an evolving reclamation regime on irrigated lands // International research journal. No. 6 (96), 2020, part 1. – P. 140-145.
5. Aidarov I.P. Complex land management. M.: MGUP, 2007. 208p.
6. Land reclamation / edited by A.I. Golovanov: Textbook. 2nd ed., ispr. and add. – St. Petersburg: Publishing house "Lan", 2015. 832 p.
7. Golovanov A.I., Kozhanov E.S., Sukharev Yu.I. Landscape studies. M.: KolosS, 2008. 216p.
8. Budyko M.I. Global ecology. M.: Mysl, 1977. 327p.
9. Pegov S.A., Khomyakov P.M. Modeling of the development of ecological systems. L., Hydrometeoizdat, 1991. P. 67-79.
10. Chernikov V.A., Aleksakhin R.M., Golubev A.V. and others. Agroecology / edited by V.A. Chernikov, A.I. Cherkas. M.: Kolos, 2000. 536p.
11. Soil erosion / [M.J. Kirkby, J.K. Mitchell, G.D. Bubenzer et al.]; Translated from English and preface by M.F. Pushkarev]. Moscow: Kolos, 1984. 415 p.
12. Krasnoshechekov V.N. Methodological approaches to substantiating irrigation norms of agricultural crops must be improved // Melioration and water management, 2013, No. 5. P. 6-10.
13. Olgarenko G.V., Kapustina T.A., Tsekoeva F.K. Calculation of irrigation regimes for agricultural crops and design norms of water demand: Methodological recommendations/under the general Ed. Olgarenko G.V. Kolomna: FGBNU "Raduga", Insight.2012.118p.

13. Ольгаренко Г.В., Капустина Т.А., Цекоева Ф.К. Расчет режимов орошения сельскохозяйственных культур и проектных норм водопотребности: Методические рекомендации / Под общ. ред. Г.В. Ольгаренко. Коломна: ФГБНУ «Радуга»; ИНлайт, 2012. 118 с.

14. Шабанов В.В., Никольский Ю.Н. Расчет проектной урожайности в зависимости от водного режима мелиорируемых земель // Гидротехника и мелиорация. 1988. С. 52-56.

15. Краснощёков В.Н., Ольгаренко Д.Г. Методика оценки экономической эффективности мероприятий по реконструкции мелиоративных систем с учетом технического состояния мелиоративных объектов, вероятностного характера изменения природно-климатических условий, хозяйственных, экологических и социальных условий функционирования мелиорируемых агроландшафтов, экологической ценности природных экосистем, степени эрозии, структуры природных ландшафтов и ущерба здоровью человека: Научное издание. Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015. 100 с.

16. Налоговый кодекс Российской Федерации, в ред. от 19 января 2024 г. URL: <https://www.audit-it.ru/nk/?ysclid=lzzi588hdk412078709>.

Об авторах

Валентин Николаевич Краснощёков, д-р экон. наук, профессор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2265-370X>; krasnoshekov@mail.ru

Геннадий Владимирович Ольгаренко, член-корреспондент РАН, д-р с.-х. наук, профессор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1225-3147>; olgarenko@mail.ru

Денис Геннадьевич Ольгаренко, канд. экон. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-8089>; dolgar2003@gmail.com

Критерии авторства / Criteria of authorship

Краснощёков В.Н., Ольгаренко Г.В., Ольгаренко Д.Г. выполнили исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Authors' contributions

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 11.05.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 17.08.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 17.08.2024

14. Shabanov V.V., Nikolsky Yu.N. Calculation of project yield depending on the water regime of reclaimed lands // *Gidrotehnika i melioration*. 1988. P. 52-56.

15. Krasnoshechekov V.N., Olgarenko D.G. Methodology for assessing the economic effectiveness of measures for the reconstruction of reclamation systems, taking into account the technical condition of reclamation facilities, the probabilistic nature of changes in natural and climatic conditions, economic, environmental and social conditions of functioning of reclaimed agricultural landscapes, the ecological value of natural ecosystems, the degree of erosion, the structure of natural landscapes and damage to human health: scientific. Edition. – Kolomna: IP Vorobyev O.M., 2015. – 100p.

16. The Tax Code of the Russian Federation as amended on 19.01.2024. <https://www.audit-it.ru/nk/?ysclid=lzzi588hdk412078709>.

About the authors

Valentin N. Krasnoshechekov, DSc (Econ), professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2265-370X>; krasnoshekov@mail.ru

Gennady V. Olgarenko, corresponding member of RAS, DSc (Agro), professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1225-3147>; olgarenko@mail.ru

Denis G. Olgarenko, CSc (Econ); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-8089>; dolgar2003@gmail.com

Krasnoshechekov V.N., Olgarenko G.V., Olgarenko D.G. carried out research on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19>

УДК 631.67:004.8



ОПТИМИЗАЦИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Д.А. Рогачев

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова»; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, стр. 2, Россия

Аннотация. Цель исследований – разработка конструктивного решения выбора первоочередных объектов ремонтно-восстановительных работ с использованием методов искусственного интеллекта в условиях ограниченного бюджетного финансирования эксплуатационных мероприятий оросительных систем. В работе использованы методы системного анализа и математического моделирования включая бинарные переменные для проведения дискретной оптимизации методами эволюционно-генетического программирования. На основе анализа поддержки управленческих решений средствами математического обеспечения обосновано использование методов оптимизации прогнозируемых воздействий включая выбор дискретных вариантов для повышения функциональности и эффективности планируемых мероприятий технической эксплуатации. Распределение ограниченных финансовых ресурсов осуществляется на модели многокритериальной оптимизации, включающей в себя минимизацию потерь поливной воды при увеличении площади орошаемых земель и повышении финансовых показателей водохозяйственной организации, что повышает качество управленческих воздействий. Практическая значимость НИР определяется разработкой инновационного инструментария для решения задачи распределения ограниченных ресурсов на проведение ремонтно-восстановительных работ мелиоративного водохозяйственного комплекса с использованием методов искусственного интеллекта. Апробация предлагаемых решений, осуществленная на материалах службы эксплуатации Государственного бюджетного учреждения Республики Крым «Крымское управление водного хозяйства и мелиорации», показала целесообразность масштабного внедрения методов количественной оценки управленческих решений. Техничко-экономические показатели планируемых мероприятий соответствуют ожидаемым значениям и обеспечивают выполнение таких требований, как полнота, гарантирующая получение с их помощью необходимой и достаточной для принятия решений информации, и наличие надежных источников получения достоверных и доступных данных для информационного наполнения показателей и критериев.

Ключевые слова: гидромелиоративная система, техническая эксплуатация, ремонтно-восстановительные работы, распределение ресурсов, моделирование, многокритериальная оптимизация, эволюционно-генетическое программирование

Формат цитирования: Рогачев Д.А. Оптимизация мероприятий технической эксплуатации оросительных систем методами искусственного интеллекта // Природообустройство. 2024. № 4. С. 12-19. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19>

Original article

OPTIMIZATION OF MEASURES FOR THE TECHNICAL OPERATION OF IRRIGATION SYSTEMS BY ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

D.A. Rogachev

All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the study is to develop a constructive solution for choosing priority objects of repair and restoration works using artificial intelligence methods in conditions of limited budget financing of operational measures of irrigation systems. The paper uses methods of system analysis and mathematical modeling, including binary variables for discrete optimization using evolutionary genetic programming methods. Based on the analysis of management decision support by means of mathematical support, the use of optimization methods for predicted impacts is justified, including

the choice of discrete options to increase the functionality and effectiveness of planned technical operation measures. The allocation of limited financial resources is carried out on the model of multi-criteria optimization, including minimizing irrigation water losses, while increasing the area of irrigated land and increasing the financial indicators of the water management organization, which improves the quality of management impacts. The practical significance of research is determined by the development of innovative tools to solve the problem of allocating limited resources for carrying out repair and restoration work of the municipal water management complex using artificial intelligence methods. The approbation of the proposed solutions, carried out on the materials of the operation service of the State Budgetary Institution of the Republic of Crimea "Crimean Department of Water Management and Melioration", proved the expediency of large-scale implementation of methods for quantitative assessment of management decisions. The technical and economic indicators of the planned activities correspond to the expected values and ensure the fulfillment of the following requirements: completeness, ensuring that they provide the necessary and sufficient information for decision-making; availability of reliable sources of reliable and accessible data for the information content of indicators and criteria.

Keywords: hydro-reclamation system, technical operation, repair and restoration work, resource allocation, modeling, multi criteria optimization, evolutionary genetic programming

Format of citation: Rogachev D.A. Optimization of measures for the technical operation of irrigation systems by artificial intelligence methods // Prirodoobustrojstvo. 2024. No.4. P. 12-19. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19>

Введение. Потребность в увеличении объемов производства отечественной сельскохозяйственной продукции обусловлена необходимостью обеспечения продовольственной безопасности, уменьшения импортозависимости и увеличения экспортного потенциала России. В большой мере этого можно достичь за счет расширения площади мелиорируемых земель, увеличения эффективности использования мелиоративных систем и повышения уровня их технической готовности к эксплуатации.

Вместе с тем отечественный мелиоративный комплекс имеет значительный (до 90%) физический и моральный износ основных фондов, что требует обоснования и проведения мероприятий по его модернизации и реновации. Ремонт и обновление мелиоративного фонда – сложная задача, требующая финансовых ресурсов, технических знаний и координации действий различных заинтересованных сторон. Ограниченность средств, выделяемых на техническую эксплуатацию, обуславливает высокую цену принимаемых управленческих решений и необходимость научно обоснованных инновационных технологий их поддержки.

От традиционно практикующихся в указанной сфере методов принятия решений по распределению ресурсов, основанных на суждениях и/или предпочтениях лица, принимающего решение (ЛПР), выгодно отличается активно развивающийся рациональный подход, базирующийся на методах количественной оценки, практически не зависящей от ретроспективного опыта ЛПР [1, 2]. Это особенно важно в случаях изменившихся/новых условий назначения

управляющих воздействий и прогнозирования их последствий.

В сфере агропроизводства действенным направлением указанного решения проблемы распределения ограниченных ресурсов становится методология оптимизационного экономико-математического моделирования, обеспечивающая достижение рациональных экономических результатов управляющих воздействий [3, 4]. На смену наиболее распространенному подходу к оптимизации распределения ограниченных ресурсов – методам линейного программирования – все чаще приходят технологии искусственного интеллекта, которые находят широкое практическое применение [5-7].

Таким образом, эффективность орошаемого земледелия во многом обусловлена работоспособностью сооружений и оборудования оросительных систем (ОС), что определяет актуальность поиска решений по оптимизации распределения, как правило, ограниченных ресурсов технической эксплуатации.

Цель исследований: разработка конструктивного метода выбора первоочередных объектов ремонтно-восстановительных работ с использованием искусственного интеллекта в условиях ограниченного бюджетного финансирования эксплуатационных мероприятий оросительных систем.

Материалы и методы исследований. Очевидным фактором повышения работоспособности ОС, изменяющейся в процессе их функционирования, являются плано-предупредительные работы. К структурным элементам технической эксплуатации относятся противоаварийные

и противопоаводковые работы, текущий и капитальный ремонт, восстановление, модернизация, техническое перевооружение, реконструкция.

Теоретические основы и практика современной эксплуатации сельскохозяйственной и мелиоративной техники, а также гидротехнических сооружений отражены в трудах М. Бандурина, М. Власова, Л. Кирейчевой, В. Ольгаренко, И. Ольгаренко, И. Юрченко и других исследователей [8-12].

По результатам обобщения существующих подходов, а также специальных исследований автора в данной работе в качестве приоритетного метода повышения эффективности тактического и стратегического уровней управления эксплуатируемыми оросительными системами в условиях ограниченных инвестиций принята многокритериальная оптимизация выбора первоочередных объектов технической эксплуатации.

Математическая модель решаемой задачи распределения ресурсов на ремонтно-восстановительные работы ОС представляет частный случай более общей задачи математической оптимизации – транспортной [5].

Алгоритм дискретной задачи назначения ресурсов по объектам технической эксплуатации, которые могут включаться или исключаться из планируемых мероприятий, оптимизирует параметр x_{ij} , характеризующий назначение ресурса A_i на объект технической эксплуатации B_j :

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \quad (1)$$

где единица означает назначение ресурса i на объект j , ноль – его отсутствие.

Качество распределения ресурсов для искомого плана технической эксплуатации $Z(X)$ выражается зависимостью (2):

$$Z(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}, \quad (2)$$

где c_{ij} – технико-экономические показатели, определяющие «ценность» j объекта при назначении i ресурса для прогнозируемого результата управляющих воздействий.

Отметим, что представленная в работе постановка задачи о назначениях ресурсов несколько упрощается по сравнению с общей транспортной задачей за счет сокращения перечня распределяемых ресурсов до одного – объема бюджетного финансирования ремонтно-восстановительных работ на ОС.

Для решения задачи оптимизации использовался метод эволюционно-генетического программирования, поскольку ввиду нелинейности целевой функции задача оптимизации не может

быть решена методами линейного программирования. Применялась эффективная модификация ГА с помощью изменения объема популяции между двумя соседними эпохами (поколениями), что эффективно влияет на функционирование оператора отбора.

Функциональные возможности разработанной модели обеспечивают построение трех уровней планирования:

1. Перспективный (стратегический) – для обоснования нового строительства, реконструкции и планов капитального ремонта водопроводящих гидротехнических сооружений (ГТС).

2. Годовой (тактический) – для согласования мероприятий технической эксплуатации с планами системного водопользования.

3. Текущий (оперативный) – для проведения аварийного ремонта оборудования и срочного перераспределения воды между хозяйствами-потребителями в текущем периоде (декаде, месяце).

Результаты и их обсуждение. В соответствии с целевыми установками исследований в работе:

– установлены технико-экономические показатели и сформирована функция «ценности» объекта ОС, определяющая его приоритеты для включения в план технической эксплуатации;

– обоснована и реализована модель оптимизации решений по распределению инвестиций на объекты технической эксплуатации оросительной системы на основе методов искусственного интеллекта.

Выбор показателей и критериев, обеспечивающих принятие решения в части повышения работоспособности оросительных систем мероприятиями технической эксплуатации, является основополагающим фактором качества принимаемых управленческих решений и успешного функционирования объектов мелиоративного водохозяйственного комплекса.

В качестве технико-экономических показателей, характеризующих «ценность» объекта ОС для планируемых ремонтно-восстановительных работ, приняты покомандные площади орошения, сокращение потерь поливной воды, финансовый результат водохозяйственной организации при реализации мероприятий.

Указанный подход обеспечивает учет интересов непосредственно водохозяйственной организации, способствуя ее конкурентоспособности, и мелиоративного сектора экономики АПК в целом, реализуя его роль в части глобального развития и экологизации мелиоративной деятельности.

Математическая постановка задачи в этом случае имеет вид (3) при ограничениях (4):

$$Z = \sum_{i=1}^m c_i x_i \rightarrow \max \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m k_j x_j \leq K;$$

$$x_i \in \{0; 1\}, i = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где k_i – затраты на проведение ремонтно-восстановительных работ i объекта технической эксплуатации; m – количество объектов технической эксплуатации; c_i – функция «ценности» i объекта технической эксплуатации (ОТЭ);

$$c_i = S_i / S + (1 - V_i / V) + D_i / D,$$

где S_i – площадь орошения покомандная ОТЭ, га; S – общая площадь орошения покомандная ОТЭ, га; V_i – снижение потерь воды на системе при реализации i объекта технической эксплуатации, тыс. м³; V – снижение потерь воды при реализации мероприятий технической эксплуатации для всех ОТЭ, тыс. м³;

$$V = \sum_{i=1}^m V_i, \quad (5)$$

где D_i – финансовый результат водохозяйственной организации при реализации i объекта технической эксплуатации, тыс. руб.; D – финансовый результат водохозяйственной организации при реализации мероприятий технической эксплуатации для всех ОТЭ, тыс. руб.;

$$D = \sum_{i=1}^m D_i, \quad (6)$$

где K – суммарный объем финансирования мероприятий ОТЭ.

Апробация модели выполнена на материалах службы эксплуатации Красногвардейской оросительной системы ГБУ Республики Крым «Крымское управление водного хозяйства и мелиорации». На рисунке 1 приведена по материалам годового отчета по технической эксплуатации за 2022 г. Красногвардейского филиала «Крымского управления водного хозяйства и мелиорации» Республики Крым карта-схема водных объектов Красногвардейского района [13]. Большая часть сооружений оросительной системы Красногвардейского района серьезно изношена, сумма износа сопоставима с балансовой стоимостью (табл. 1).

В качестве примера решалась задача оптимизации плана ремонтно-восстановительных работ для 7 насосных станций при ограниченном финансировании мероприятий технической эксплуатации. Исходными данными для формирования целевой функции служили следующие технико-экономические показатели ОТЭ (табл. 2).

Решение получено с использованием надстройки «Поиск решения» программного комплекса MS Excel, разработанной Microsoft для оптимизации решений различными методами, включая генетический эволюционный алгоритм, и адаптированной автором для рассматриваемой модели. Параметры оптимизации эволюционно-генетического

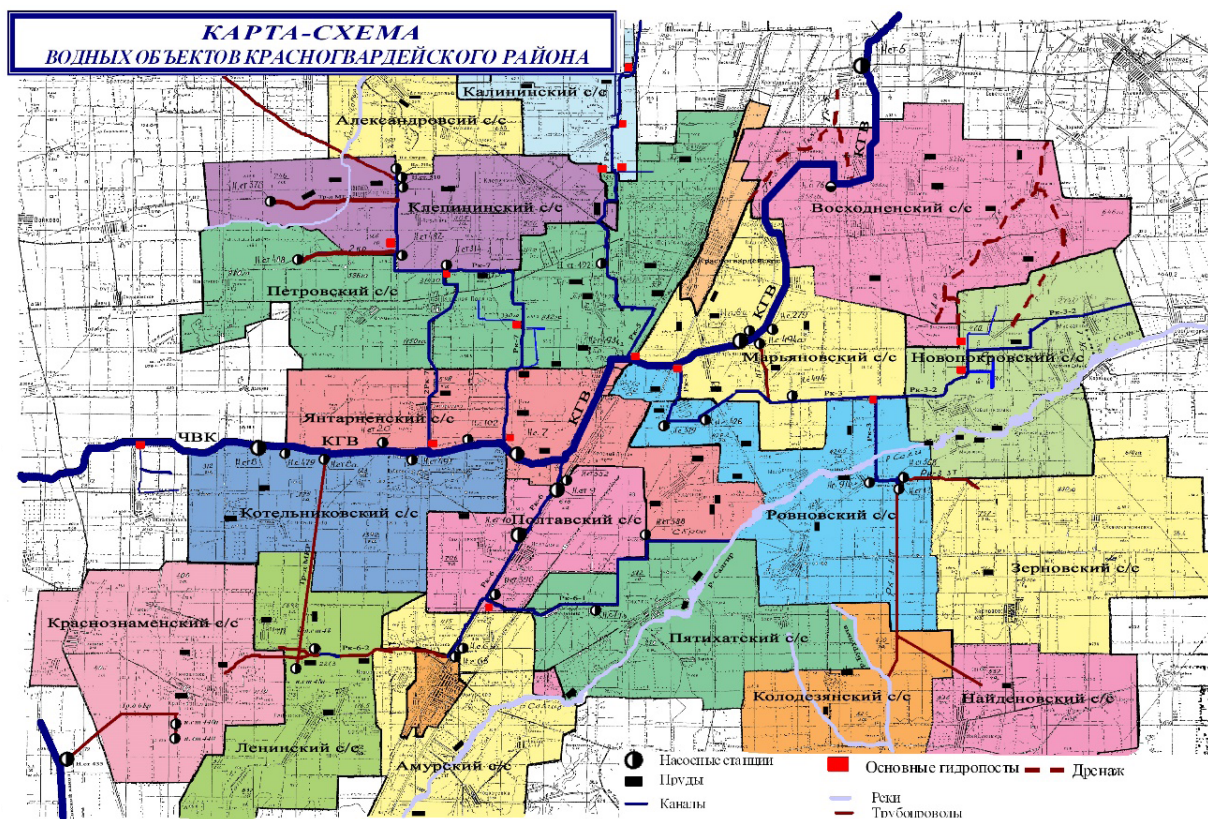


Рис. 1. Карта-схема Красногвардейского района [13]

Fig. 1. Map-scheme of the Krasnogvardeisky district [13]

алгоритма надстройки «Поиск решений» MS Excel представлены на рисунке 2.

В таблице 3 приведены результаты многокритериальной оптимизации.

Выполненные исследования показали преимущество разработанной модели в сравнении с решениями на основе однокритериальной оптимизации [14, 15].

Таблица 1. Балансовые показатели объектов оросительной системы [13]

Table 1. Balance indicators of irrigation system facilities [13]

№ п/п	Наименование показателей <i>Indicators</i>	Ед. измерения <i>Measurement unit</i>	Всего <i>Total</i>				
			К-во <i>Quantity</i>	Из них требует <i>Some of them require</i>		Балансовая стоимость, тыс. руб. <i>Balance sheet value, ths rbl</i>	Сумма износа, тыс. руб. <i>The amount of depreciation, ths rbl</i>
				Кап. ремонта <i>Major repairs</i>	Восстановления <i>Restoration</i>		
Межхозяйственная сеть и сооружения на ней / Inter-economic network and facilities on it							
1	Межхозяйственные каналы, включая магистральные, всего <i>Inter-economic canals including main canals, total</i>	Км	187,67			239848,202	239848,197
	в т.ч. закрытые / including closed canals в т.ч. облицов. / including facing canals	km	5,86 165,65	25,368 23,495		9284,232 206696,436	9284,232 206696,436
2	Сооружения на МК и межхозяйственных каналах (кроме выделов воды в хозяйства) <i>Facilities on MC and inter-economic canals (except of water allocation to farms)</i>	шт. <i>pcs</i>	145	21		1288,265	1232,501
3	Сооружения в точках выдела в хозяйства <i>Facilities in the points of water allocation to farms</i>	шт. <i>pcs</i>	21				
4	Напорный трубопровод <i>Head pipeline</i>	Км km	65,69	5,02		66132,176	63068,251
5	Насосные станции – всего <i>Pump stations – total</i>	шт. <i>pcs</i>	36	7		100397,542	91363,190
6	Трансформаторные подстанции <i>Transformer substations</i>	шт. <i>pcs</i>	22			2349,601	2068,431
7	Мосты и переезды <i>Bridges and crossroads</i>	шт. <i>pcs</i>	52	3		1921,266	1921,266
8	Водосборно-сбросная сеть <i>Water catchment-discharge network</i>	Км km	7,4			162,313	162,313
	ИТОГО по межхозсети <i>TOTAL on the inter-economic network</i>					412099,365	399664,149

Таблица 2. Технико-экономические показатели объектов технической эксплуатации

Table 2. Technical and economic indicators of technical operation facilities

	НС1	НС2	НС3	НС4	НС5	НС6	НС7
Покомандная площадь орошения, га <i>Command area of irrigation, ha</i>	652,8	1396,6	151,3	155	350,0	35,0	43,5
Водоподача после ремонта, тыс. м³ <i>Water supply after repair, ths m³</i>	2611,2	5586,4	605,2	620,0	1400,0	140,0	174,0
Сокращение потерь поливной воды, тыс. м³ <i>Reduction of losses of irrigation water, ths m³</i>	785,3	579,1	90,3	124,6	186,3	30,0	25,3
Удельные затраты на водоподачу, руб./тыс. м³ <i>Specific expenditures for water supply, rbl / ths m³</i>	1,8	1,4	1,0	1,9	1,3	1,85	1,8
Удельная стоимость водоподачи, руб./тыс. м³ <i>Unit cost of water supply, rbl / ths m³</i>	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

В таблице 4 приведены результаты моно- и многокритериального подхода к оптимизации мероприятий технической эксплуатации, наглядно иллюстрирующие приоритеты последнего. Это позволяет рекомендовать использование указанной модели для решения задач математической оптимизации при выборе дискретных вариантов и функциональных и эффективных

управленческих решений по распределению ограниченных ресурсов на ремонтно-восстановительные работы. Модель может применяться как автономно, так и в составе автоматизированных систем управления, необходимость в разработке которых актуализируется в свете масштабного развития цифровизации отечественной экономики.

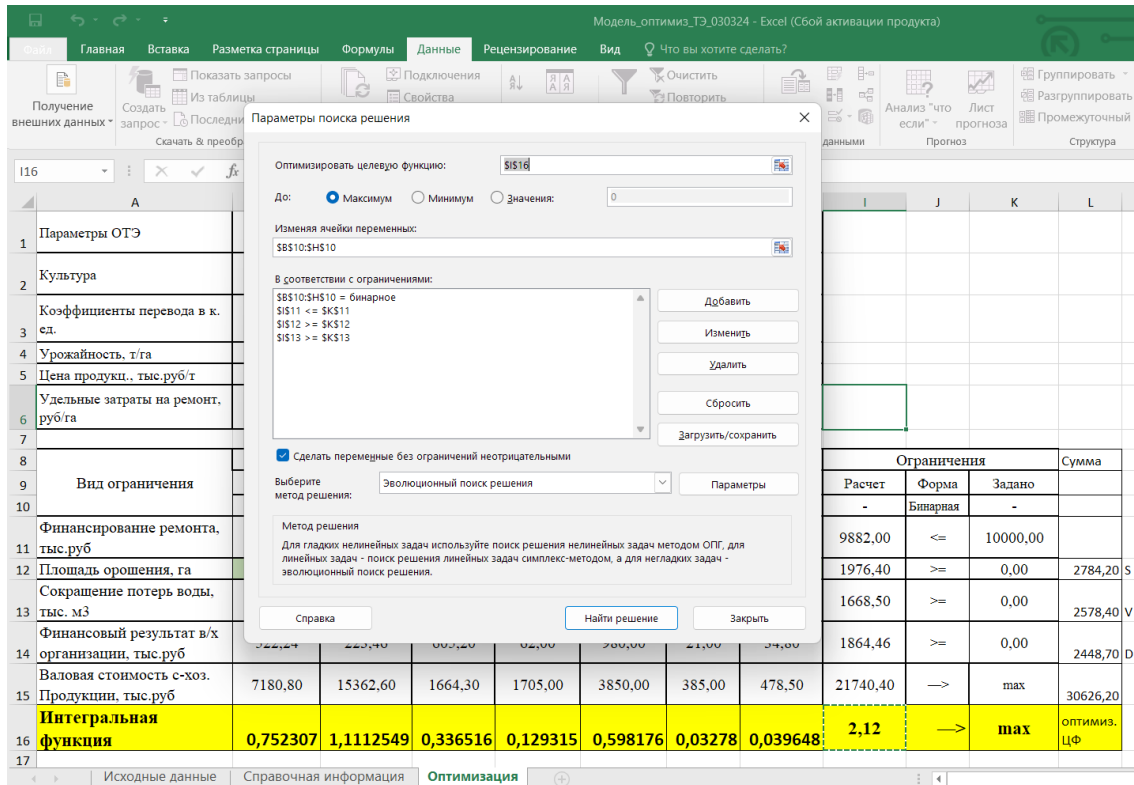


Рис. 2. Параметры оптимизации эволюционно-генетического алгоритма надстройки «Поиск решений» MS Excel

Fig. 2. Optimization parameters of the evolutionary-genetic algorithm of the “Search for solutions” add-in MS Excel

Таблица 3. Результаты многокритериальной оптимизации
Table 3. Results of multi-criteria optimization

Вид ограничений <i>Type of restrictions</i>	Переменные оптимизационной модели <i>Optimization model variables</i>							Ограничения <i>Restrictions</i>		
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Расчет <i>Calculation</i>	Форма <i>Form</i>	Задано
	0	1	1	0	1	1	1		Бинарная	-
Финансирование ремонта, тыс.руб <i>Financing of the repair, ths rbl</i>	3264	6983	757	775	1750	175	217,5	9882	<=	10000
Площадь орошения, га <i>Irrigation area, ha</i>	652,8	1397	151	155	350	35	43,5	1976,4	>=	0
Сокращение потерь воды, тыс. м ³ <i>Reduction of water losses, ths m³</i>	785,3	1337	90,3	125	186	30	25,3	1668,5	>=	0
Финансовый результат в/х организации, тыс. руб <i>Financial result of water economic organizations, ths rbl</i>	522,2	223,5	605	62	980	21	34,8	1864,5	>=	0
Интегральная функция <i>Integral form</i>	0,75	1,11	0,34	0,13	0,60	0,03	0,04	2,12	→	max

Таблица 4. Сводные данные оптимизации выбора первоочередных переменных оптимизационной модели

Table 4. Summary data of optimization of priority selection variables of the optimization

Критерии оптимизации <i>Optimization criteria</i>	Площадь орошения, га <i>Irrigation area, ha</i>	Сокращение потерь воды, тыс. м ³ <i>Reduction of water losses, ths m³</i>	Финансовый результат в/х организации, тыс. руб <i>Financial result of the water economic organization, ths rbl</i>	Интегральный нормированный результат <i>Integral normalized result</i>	% к показателю многокритериальной оптимизации <i>% to the indicator of multi criterial optimization</i>
1 Многокритериальный <i>Multi criterial</i>	1976,4	1668,5	1864,5		
Нормированное значение <i>Normalized value</i>	0,71	0,65	0,76	2.12	
2 Площадь орошения <i>Irrigation area</i>	1980,1	1702,8	1321,2		
Нормированное значение <i>Normalized value</i>	0,71	0,66	0,54	1,91	90,15
3 Сокращение потерь воды <i>Reduction of water losses</i>	1980,1	1702,8	1321,3		
Нормированное значение <i>Normalized value</i>	0,71	0,66	0,54	1,91	90,15
4 Финансовый результат в/х организации <i>Financial result of water economic organization</i>	1387,6	1241,8	2225,24		
Нормированное значение <i>Normalized value</i>	0,50	0,48	0,91	1,89	89,15

Выводы

Таким образом, создание, внедрение и использование в практике водопользования мелиоративного водохозяйственного комплекса математических моделей многокритериальной

оптимизации на основе искусственного интеллекта обеспечат возможность эффективного решения проблемы распределения ограниченных ресурсов на проведение ремонтно-восстановительных работ оросительных систем.

Список использованных источников

1. Худякова Е.В., Степанцевич М.Н., Горбачев М.И. Цифровые технологии в АПК. Учебник. М.: ООО «Мегаполис», 2022. 220 с. EDN: YLLCWI.
2. Манжина С.А., Ванеева П.Д. Исследование возможности создания объектов цифровой мелиорации в Российской Федерации // Beneficium. 2019. № 2 (31). С. 34-46. DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2019.2(31).34-46.
3. Орлова И.В., Половников В.А. Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2010. 366 с.
4. Rogachev D.A., Yurchenko I.F., Rogachev A.F. Management and Optimization of Systematic Water Adjustment by Economic-Mathematic Modeling Methods and AI // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, 10-16 сентября 2023 г. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. PP. 888-893. DOI: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272907.
5. Иванов П.И., Ткаченко И.В. Экономико-математическое моделирование в АПК: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. 254 с.
6. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Olgarenko V.I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Kislovodsk,

Reference

1. Khudyakova E.V. Digital technologies in agriculture. Textbook / E.V. Khudyakova, M.N. Stepanantsevich, M.I. Gorbachev. M.: Megapolis LLC, 2022. 220 p. ISBN978-5-6049097-9-9. – EDN YLLCWI.
2. Manzhina S.A. Investigation of the possibility of creating digital land reclamation facilities in the Russian Federation / S.A. Manzhina, P.D. Vaneeva // Beneficium. 2019. No. 2(31). pp. 34-46. DOI 10.34680/BENEFICIUM.2019.2(31).34-46.
3. Orlova I.V., Polovnikov V.A. Economic and mathematical methods and models: computer modeling. Textbook. Moscow: INFRA-M, 2010. 366 p
4. Rogachev D.A. Management and Optimization of Systematic Water Adjustment by Economic-Mathematic Modeling Methods and AI / D.A. Rogachev, I.F. Yurchenko, A.F. Rogachev // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, September 10-16, 2023. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 888-893. – DOI 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272907.
5. Ivanov P.I. Tkachenko, I.V. Economic and mathematical modeling in agriculture. A study guide. Rostov on Don, Phoenix, 2013. 254 p.
6. Olgarenko V.I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems / V.I. Olgarenko, I.V. Olgarenko, V.I. Olgarenko // IOP

1-5 октября 2019 г. Vol. 698 (2). Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019. Pp. 022060. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022060.

7. **Куприяновский В.П., Липунцов Ю.П., Гринько О.В., Намиот Д.Е.** Агрокультура 4.0: синергия системы – систем, онтологии, интернета вещей и космических технологий // International Journal of Open Information Technologies. 2018. Т. 6, № 10. С. 46-67.

8. **Бандури М.А.** Диагностика технического состояния и оценка остаточного ресурса работоспособности водопроводящих сооружений оросительных систем. 2-е изд., перераб. и доп. Новочеркасск: ЛИК, 2021. 178 с.

9. **Бородычев В.В., Рогачев Д.А.** Оптимизация параметров оросительной системы в условиях сочетания в еЕ пределах орошаемого массива с богарным // Мелиорация и водное хозяйство. 2007. № 6. С. 23.

10. **Власов М.В., Васильев М.С., Григоров С.М.** Теоретическое обоснование совершенствования эксплуатации оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2018. № 3 (31). С. 23-38. DOI: 10.31774/2222-1816-2018-3-23-38.

11. **Рогачев Д.А., Юрченко И.Ф., Рогачев А.Ф.** Управление системным водораспределением на основе экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 87-106. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106.

12. **Юрченко И.Ф.** Информационное обеспечение планирования мероприятий технической эксплуатации оросительных систем нового поколения // Основные результаты научных исследований института за 2017 год: Сборник научных трудов. М.: ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова, 2018. С. 352-363.

13. Годовой отчет по технической эксплуатации за 2022 год Красногвардейского филиала Государственного бюджетного учреждения Республики Крым «Крымское управление водного хозяйства и мелиорации». Раздел II. Водопользование и гидрометрия.

14. **Sharma S., Pathak B.K. & Kumar R.** Multi-objective Service Composition Optimization Smart Agriculture Using Fuzzy-Evolutionary Algorithm. Oper. Res. Forum 5, 43 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00319-7>

15. **Salotagi S., Mallapur J.D.** Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications. Multimed Tools Appl 83, 61139-61164 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11042-023-18064-0>

Об авторе

Рогачев Дмитрий Алексеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела природоохранных и информационных технологий; ORCID: 0009-0003-4014-4770, Rogachev.soft@gmail.com

Критерии авторства / Criteria of authorship

Рогачев Д.А. выполнил теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись, имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 11.03.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 15.08.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 15.08.2024

Conference Series: Materials Science and Engineering, Kislovodsk, October 01-05, 2019. Vol. 698(2). Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 022060. – DOI 10.1088/1757-899X/698/2/022060.

7. **Agroculture 4.0: synergy of system – systems, ontology, Internet of Things and space technologies / V.P. Kupriyanovsky Yu.P. Lipuntsov, O.V. Grinko, D.E. Namiot // International Journal of Open Information Technologies. 2018. Vol. 6, No. 10. P. 46-67.**

8. **Banduri M.A.** Diagnostics of the technical condition and assessment of the residual life of the water supply facilities of irrigation systems / M.A. Bandurin. – 2nd edition, revised and supplemented. Novocherkassk: LIK, 2021. 178 p. ISBN978-5-906932-03-8.

9. **Borodychev V.V.** Optimization of irrigation system parameters in conditions of combination of an irrigated massif with a rain forest within its limits / V.V. Borodychev, D.A. Rogachev // Melioration and water management. 2007. No. 6. P. 23.

10. **Vlasov M.V.** Theoretical justification for improving the operation of irrigation systems / M.V. Vlasov, M.S. Vasiliev, S.M. Grigоров // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Melioration Problems. 2018. No. 3(31). P. 23-38. – DOI 10.31774/2222-1816-2018-3-23-38

11. **Rogachev D.A.** Management of systemic water distribution based on economic and mathematical modeling and artificial intelligence methods / D.A. Rogachev, I.F. Yurchenko, A.F. Rogachev // Melioration and hydraulic engineering. 2023. V. 13, No. 3. P. 87-106. – DOI 10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106.

12. **Yurchenko I.F.** Information support for planning measures for technical operation of irrigation systems of a new generation / I.F. Yurchenko // The main results of the Institute's scientific research in 2017: a collection of scientific papers. Moscow: A.N. Kostyakov Research Institute, 2018. P. 352-363.

13. Annual report on technical operation for 2022 of the Krasnogvardeysky branch. Section II. Water use and hydrometry. The State budgetary Institution of the Republic of Crimea "Crimean Department of Water Management and Land Reclamation".

14. **Sharma S., Pathak B.K. & Kumar R.** Multi-objective Service Composition Optimization Smart Agriculture Using Fuzzy-Evolutionary Algorithm. Oper. Res. Forum 5, 43 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00319-7>

15. **Salotagi S., Mallapur J.D.** Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications. Multimed Tools Appl 83, 61139-61164 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11042-023-18064-0>

About the author

Dmitry A. Rogachev, CSc (Eng), leading researcher at the department of natural resources and information technology; ORCID: 0009-0003-4014-4770, Rogachev.soft@gmail.com

Rogachev D.A. carried out theoretical studies, on the basis of which he generalized and wrote the manuscript. He has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-20-25>

УДК 631.674.3:626.86



МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДРЕНАЖНЫХ ВОД НА ВОДНЫЙ ОБЪЕКТ

Т.И. Дрововозова

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»; 346421, Ростовская обл., Новочеркасск, пр. Баклановский, 190, Россия

Аннотация. Цель работы – применение действующих методологических подходов к оценке негативного воздействия дренажных вод на водный объект, установление динамики концентраций веществ на участке от места выпуска сточных/дренажных вод до контрольного створа. Объектом исследований являлся коллектор, отводящий дренажный сток в реку Дон. Изучаемая проблема особенно актуальна в связи с проводимыми мероприятиями по предотвращению деградации водного объекта в соответствии с распоряжением Правительства РФ от 21 июля 2021 г. № 2012-р. Рассчитаны концентрации веществ в максимально загрязненной струе на участке от места выпуска сточных/дренажных вод до контрольного створа ($l = 500$ м) на примере коллектора, отводящего дренажный сток в р. Дон. Показано, что если в фоновом створе концентрация вещества равна или ниже предельно допустимой, то при сбросе дренажных вод с превышениями нормативных концентраций веществ и последующем их разбавлении расходом реки при многократном его превышении над расходом дренажных вод ($q/Q = 0,0002$) в контрольном створе может быть достигнута ПДК либо превышение фактической концентрации над нормативной ниже в 1,2-2 раза по сравнению с таковым для створа выпуска. Соответственно рекомендуется при установлении размера вреда, причиненного водному объекту от сброса дренажных вод, руководствоваться фактическими концентрациями в контрольном створе, а не в створе выпуска дренажных вод.

Ключевые слова: дренажные воды, контрольный створ, створ выпуска, фоновые концентрации, фактические концентрации, разбавление

Формат цитирования: Дрововозова Т.И. Методологические подходы к оценке негативного воздействия дренажных вод на водный объект // Природообустройство. 2024. № 4. С. 20-25. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-20-25>

Scientific article

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE NEGATIVE IMPACT OF DRAINAGE WATER ON A WATER BODY

T.I. Drovovozova

Federal state budgetary scientific institution "Russian research institute of land reclamation Problems"; 346421, Rostov region, Novocherkassk, 190 Baklanovsky ave., Russia

Abstract. The purpose of the work is to apply existing methodological approaches to assessing the negative impact of drainage water on a water body, to establish the dynamics of concentrations of substances in the area from the place of discharge of wastewater/ drainage water to the control gate. The object of the study was a collector diverting drainage runoff into the Don River. The problem under study is especially relevant in connection with the ongoing measures to prevent degradation of a water body in accordance with the decree of the Government of the Russian Federation dated 07.21.2021 № 2012-r. The concentrations of substances in the most polluted jet in the area from the place of discharge of wastewater/drainage water to the control gate ($l = 500$ m) were calculated using the example of a collector diverting drainage runoff into the Don River. It is shown that if the concentration of a substance in the background is equal to or below the maximum permissible concentration, then when drainage water are discharged with excess of the standard concentrations of substances and their subsequent dilution by the flow rate of the river with its multiple excess over the flow rate of drainage water ($q/Q = 0,0002$), the maximum permissible concentration can be reached in the control range, or the actual concentration exceeds the standard is 1,2 – 2 times lower than that for the outlet. Accordingly, it is recommended that, when determining the amount of damage caused to a water body from the discharge of drainage water, be guided by the actual concentrations in the control range, and not in the drainage water discharge range.

Key words: drainage water, control channel, outlet channel, background concentrations, actual concentrations, dilution

Format of citation: Drovovozova T.I. Methodological approaches to assessing the negative impact of drainage water on a water body // Prirodobustrojstvo. 2024. № 4. P. 20-25. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-20-25>

Введение. В настоящее время все объекты, на которых осуществляется хозяйственная деятельность, в зависимости от степени воздействия на окружающую среду поделены на категории. Для объектов III категории законодательно отменена необходимость расчета нормативно допустимого сброса (ст. 22, п. 4 ФЗ-7) [1]. Организации, эксплуатирующие объекты III категории, фактическую массу или объем сброса загрязняющих веществ принимают за нормативно допустимый при осуществлении платы за негативное воздействие на окружающую среду в соответствии со ст. 16 ч. 8 ФЗ-7 «Об охране окружающей среды» [1, 2].

Согласно ст. 20, ст. 21 ФЗ-7 и ст. 35 ФЗ-74 «Водный кодекс» устанавливаются требования к соблюдению нормативов качества окружающей среды, в том числе предельно допустимых концентраций для водных объектов (ПДК) [1, 3, 4].

До подразделения на категории объектов, на которых осуществляется хозяйственная деятельность, все водопользователи имели допустимые концентрации веществ в сточных водах, отводимых в водный объект, которые рассчитывались с учетом фоновых концентраций. На сегодняшний день применяется методика расчета НДС только для объектов I и II категорий [5]. Данная методика обязательно учитывает процессы разбавления сточных вод, биохимической деструкции неконсервативных веществ, кратность разбавления при их поступлении в водоток, гидравлические условия водотока. Кратность основного разбавления рассчитывают по методам В.А. Фролова – И.Д. Родзиллера или А.В. Караушева [5-9]. В том и другом случаях подход является единым: при сбросе сточных вод концентрации всех веществ, поступающих с ними, не должны превышать норматив в контрольном створе после соответствующего разбавления с водами водотока.

Существующие методологические подходы к расчету допустимой концентрации вещества к сбросу в водный объект дифференцируют их по способности к биохимической деструкции в водной среде на консервативные и неконсервативные. Соответственно формулы расчета допустимой концентрации имеют следующий вид:

– для растворенных консервативных веществ

$$S_{\text{ст}} = n(S_{\text{нор}} - S_{\text{ф}}) + S_{\text{ф}}; \quad (1)$$

– для неконсервативных веществ

$$S_{\text{ст}} = \frac{S}{10^{-E_q \cdot t}} + (n - 1) \frac{(S_{\text{нор}} - S_{\text{ф}})}{10^{-K_q \cdot t}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{нор}}$ – предельно допустимая концентрация вещества, мг/дм³; $S_{\text{ф}}$ – фоновая концентрация вещества в водотоке, мг/дм³; n – кратность разбавления; t – время перемещения воды от места выпуска сточных вод до контрольного створа, сут.; K_q – динамический коэффициент неконсервативности [5].

Кратность основного разбавления n_0 определяется по формуле 3 (метод В.А. Фролова – И.Д. Родзиллера) [5, 8, 9]:

$$n_0 = \frac{\gamma Q + q}{q} \quad (3)$$

при выполнении условия $0,0025 < \frac{q}{Q} < 0,1$, где

q – расход сточных вод, м³/с; Q – расход водотока, м³/с.

Основной недостаток рекомендованной методики заключается в том, что устанавливаются границы отношения $\frac{q}{Q}$ и предполагается выполнение условия $S_{\text{фон}} < S_{\text{нор}}$ [8-10].

В случае невыполнения условия В.А. Фролова – И.Д. Родзиллера кратность основного разбавления считают по методике А.В. Караушева [5]:

$$n = (S_{\text{ст}} - S_{\text{ф}}) / (S_{\text{макс}} - S_{\text{ф}}), \quad (4)$$

где $S_{\text{ст}}$ – концентрация загрязняющего вещества в сточных водах, г/м³; $S_{\text{макс}}$ – максимальная концентрация загрязняющего вещества в поперечном сечении водотока, находящемся на контрольном расстоянии от створа выпуска сточных вод вниз по течению, г/м³; $S_{\text{ф}}$ – фоновая концентрация вещества в водотоке, г/м³ [5, 13].

В настоящее время с упразднением методики расчета НДС сточных/дренажных вод для объектов III категории требования к соблюдению нормативов устанавливаются уже в створе выпуска сточных/дренажных вод без учета процессов смешения и разбавления в водотоке. Это является неправильным подходом с гидрохимической точки зрения и наносящим экономический ущерб организациям, эксплуатирующим объекты III категории.

Поскольку большая часть бассейна Нижнего Дона ниже впадения реки Северский Донец находится в зоне влияния поверхностного

стока с сельскохозяйственных земель, то р. Дон испытывает интенсивную антропогенную нагрузку от поступления сельскохозяйственных сточных/дренажных вод. В настоящее время разрабатываются водоохранные мероприятия по предотвращению деградации водного объекта, что определяет актуальность исследований по оздоровлению р. Дон в соответствии с распоряжением Правительства РФ от 21 июля 2021 г. № 2012-р [11].

Коллекторно-дренажная сеть мелиоративного комплекса отнесена к объектам III категории, то есть объектам незначительного воздействия на окружающую среду. Тем не менее с дренажным стоком поступает значительное количество веществ, концентрация которых не соответствует установленным федеральным нормативам, в связи с чем эксплуатирующим организациям вменяют административное правонарушение за причиненный ущерб водному объекту [12].

В настоящее время нормативные правовые акты содержат требование: если фоновая концентрация выше ПДК, то норматив ПДК применяется к самим сточным/дренажным водам. Поэтому исследования, направленные на выявление закономерностей динамики загрязняющих веществ, поступающих в водную среду с дренажным стоком, являются весьма актуальными.

Цель исследований: применение действующих методологических подходов к оценке негативного воздействия дренажных вод на водный объект, установление динамики концентраций веществ на участке от места выпуска сточных/дренажных вод до контрольного створа.

Материалы и методы исследований. Исходными материалами для расчета являлись результаты протоколов испытаний природной и сточной/дренажной воды, а также морфометрические характеристики р. Дон в створе выпуска, в который осуществляется сброс коллекторно-дренажных вод (КДВ), предоставленные гидрогеолого-мелиоративной партией – филиалом Управления «Ростовмелиоводхоз».

Концентрация консервативного вещества, изменяющаяся только за счет разбавления, в контрольном створе рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{макс}} = S_{\text{п}} + (S_{\text{ст}} - S_{\text{п}}) \cdot e^{-\alpha \cdot l}, \quad (5)$$

где l – расстояние от места выпуска сточных вод до расчетного створа, м; α – коэффициент, учитывающий гидравлические условия в реке [5].

Концентрация неконсервативных веществ уменьшается вследствие разбавления и его биохимической деструкции и в контрольном створе определяется по формуле:

$$S_{\text{макс}} = \left(S_{\text{ф}} + \frac{S_{\text{ст}} - S_{\text{ф}}}{n} \right) \cdot e^{-K_q \cdot t}, \quad (6)$$

где t – время перемещения воды от места выпуска сточных вод до расчетного створа, сут.; K_q – динамический коэффициент неконсервативности [5, 10, 13].

Для БПК максимальное значение показателя в контрольном створе рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{макс}} = \left(S_{\text{ф}} + \frac{S_{\text{ст}} - S_{\text{ф}}}{n} \right) \cdot 10^{-0,1 \cdot t}. \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение. С учетом морфометрических характеристик р. Дон в створе выпуска КДВ и среднегодовых фактических объемов отведения КДВ из коллектора, отводящего дренажный сток в р. Дон на данном участке, проверка условия В.А. Фролова – И.Д. Родзиллера показала отношение $q/Q = 0,0002$, что указывает на его невыполнение.

Наиболее неблагоприятными гидрохимическими показателями в дренажных водах, содержание которых систематически превышает ПДК_{рх}, являются сульфаты, фосфаты, железо, нефтепродукты (НФПР), АСПАВ и показатель БПК₅.

В таблице приведено превышение средних фактических концентраций вышеуказанных показателей ($S_{\text{ст}}$) в створе выпуска и в контрольном створе ($S_{\text{макс}}$), а также расчетных концентраций показателей в максимально загрязненной створе ($S'_{\text{макс}}$) по сравнению с ПДК_{рх}.

Таблица 1. Экологическая оценка дренажной воды в створе выпуска и в контрольном створе водотока

Table 1. Ecological assessment of drainage water in the outlet range and in the control range of the watercourse

Показатель Indicator	$S_{\text{нор}}$, мг/дм ³ $S_{\text{нор}}$, mg / dm ³	$S_{\text{ст}}/S_{\text{нор}}$ $S_{\text{ст}}/S_{\text{нор}}$	$S_{\text{макс}}/S_{\text{нор}}$ $S_{\text{макс}}/S_{\text{нор}}$	$S'_{\text{макс}}$, мг/дм ³ $S'_{\text{макс}}$, mg / dm ³	$S'_{\text{макс}}/S_{\text{нор}}$ $S'_{\text{макс}}/S_{\text{нор}}$
БПК ₅ / BOD ₅	2,1	1,98	1,76	3,5570	1,7
Сульфаты / Sulfates	100	1,46	1,15	100,500	1,0
Железо / Iron	0,1	1,83	1,4	0,1108	1,1
Фосфаты по P / Phosphates by P	0,2	1,82	1,6	0,2710	1,4
НФПР / NFPPR	0,05	1,87	1,0	0,0503	1,0
АСПАВ / ASPAV	0,1	8,97	3,8	0,385	3,85

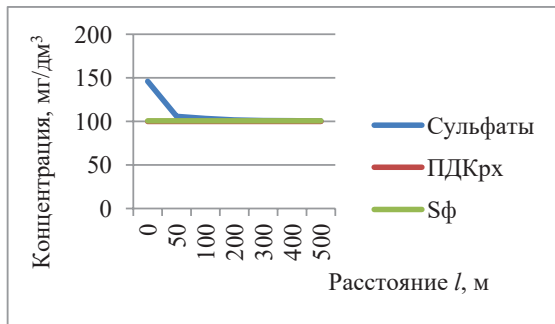
При поступлении дренажных вод в водоток происходит их разбавление водами реки, биохимическая деструкция неконсервативных веществ. Поэтому оценку качества дренажных вод правильно проводить не в створе выпуска ДВ, а в контрольном створе, расположенном в 500 м ниже по течению от места сброса. Именно в последнем створе необходимо проверять выполнение санитарно-гигиенического условия:

$$\frac{S_i}{S_{норi}} \leq 1.$$

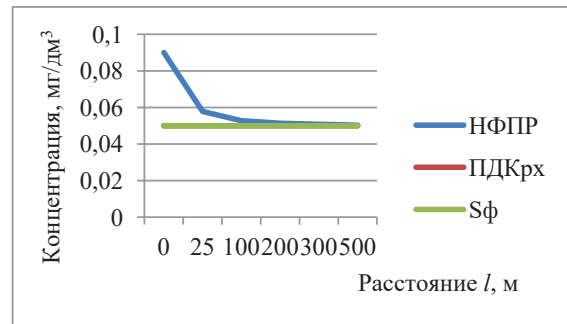
Динамика концентраций веществ на участке от места выпуска сточных/дренажных вод до контрольного створа это подтверждает (рис. 1).

Динамика показала, что при отношении $q/Q = 0,0002$ в контрольном створе концентрация вещества выравнивается с фоновой. Если фоновая совпадала с ПДК_{рх}, то в контрольном створе $S_{макс} = S_{ф} = ПДК_{рх}$, даже если в самих сточных водах концентрация этого вещества была намного выше (рис. 1а, 1б).

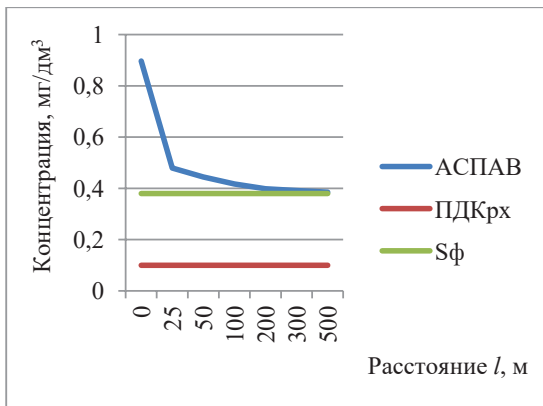
Как уже отмечалось, если фоновая концентрация выше ПДК_{рх}, то норматив ПДК



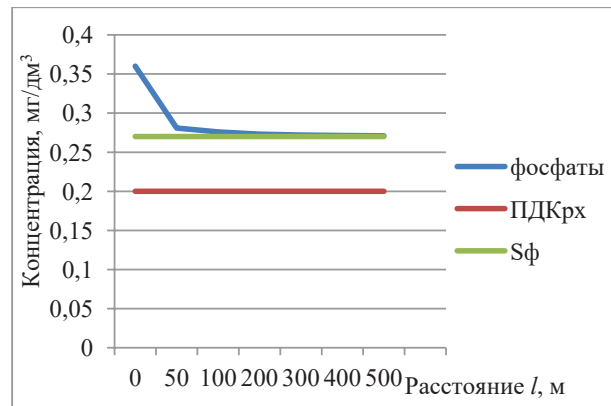
а)



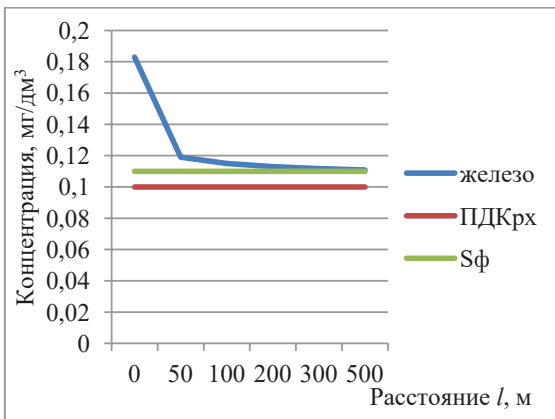
б)



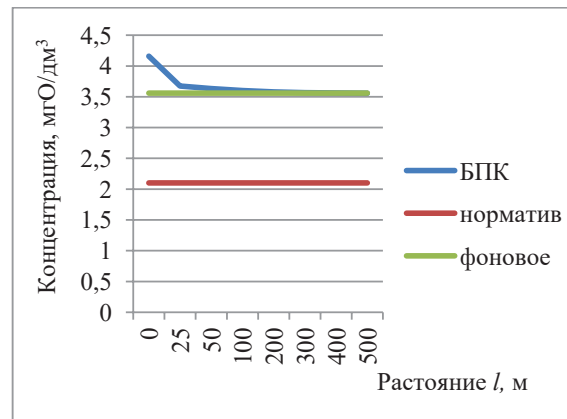
в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Динамика концентрации веществ на участке от створа сброса ДВ до контрольного створа:

а) сульфаты, б) нефтепродукты, в) АСПАВ, г) фосфаты по фосфору, д) железо общее, е) БПК

Fig. 1. Dynamics of the concentration of substances in the section from the discharge range of the DW up to the control range:

a) sulfates, b) oil products, c) ASPAV, d) phosphates by phosphorus, e) total iron, f) BOD

применяется к самым сточным/дренажным водам. При многократном превышении расхода реки над расходом дренажных вод такое требование является неправомерным, поскольку при смешении вод в контрольном створе концентрация вещества совпадет с фоновой, и ПДК_{рх} достигнуто не будет. Такая динамика показана на примере БПК (рис. 2).

Это является особенно актуальным в связи с расчетом размера вреда, причиненного водному

объекту, поскольку в контрольном створе превышение над ПДК_{рх} ниже, чем в месте выпуска, а для некоторых веществ становится равным. Кроме того, при сбросе дренажных вод с расходом меньше единицы м³/с в крупные водотоки, характеризующиеся расходами в сотни м³/с, при оценке размера вреда целесообразно сопоставлять фактические концентрации с фоновыми значениями в контрольном створе, а не в створе выпуска.

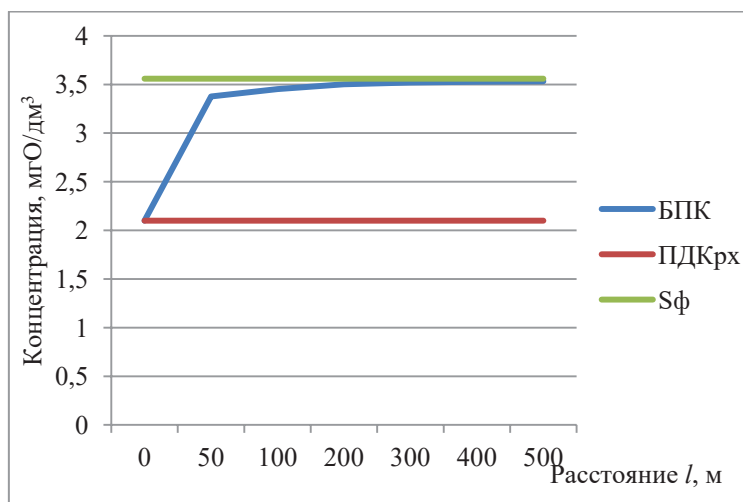


Рис. 2. Расчетная динамика показателя БПК при условии, что $S_{ст} = ПДК_{рх}$

Fig. 2. Estimated dynamics of the BOD indicator, provided that $S_{st} = MPC_{rh}$

Выводы

Установлено, что при превышении фоновой концентрации вещества над предельно допустимой при сбросе нормативно чистых дренажных вод и последующем их разбавлении расходом реки при многократном его превышении над расходом дренажных вод в контрольном створе значение концентрации будет равно фоновому, а не ПДК. Если в фоновом створе концентрация вещества равна или ниже предельно допустимой,

то при сбросе дренажных вод с превышениями нормативных концентраций веществ при многократном превышении расхода реки над расходом дренажных вод в контрольном створе может быть достигнута ПДК. Поэтому рекомендуется при установлении размера вреда, причиненного водному объекту от сброса ДВ, руководствоваться фактическими концентрациями в контрольном створе, а не в створе выпуска дренажных вод.

Список использованных источников

1. Об охране окружающей среды: Федеральный закон: принят Государственной Думой 20 декабря 2001 г. № 7 (последняя редакция) // Консультант-Плюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/.
2. Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий (в ред. Постановления Правительства РФ от 7 октября 2021 г. № 1703): Постановление Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 г. № 2398.
3. Водный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 74: принят Государственной Думой 12 апреля 2006 г., с изм. на 2 июня 2021 г. //
4. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций

References

1. On environmental protection: Feder. Law No. 7: [adopted by the State Duma on 20.12.2001 (latest edition)]. Consultant Plus. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/
2. On approval of criteria for classifying objects that have a negative impact on the environment as objects of categories I, II, III and IV (as amended. Decree of the Government of the Russian Federation dated 07.10.2021 No. 1703): decree of the Government of the Russian Federation. Federation No. 2398 dated 12/31/2020. Access from the help. Techexpert systems.
3. The Water Code of the Russian Federation: Feder. Law No. 74: [adopted by the State Duma on 04/12/2006 (as amended on 06/02/2021)]. Access from the help.
4. On approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances

вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 г. № 552. URL: docs.cntd.ru/document/420389120.

5. Об утверждении методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей: Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29 декабря 2020 г. № 1118 // Консультант-Плюс. URL: <https://www.consultant.ru/document/cons>.

6. **Караушев А.В.** Теория и методы расчетов наносов и качества вод в реках и водоемах // Избранные труды. СПб.: Изд-во «Арт-Экспресс», 2013. 250 с.

7. **Караушев А.В., Алексеев Л.П.** Методика расчета предельно допустимых сбросов сточных вод в реки и водоемы // В кн.: Научные основы рационального использования, охраны и управления водными ресурсами. М.: Изд-во МГУ, 1983. Ч. 2. 205 с.

8. **Фролов В.А.** Определение степени смешения сточных вод с водой водотока (реки) // Производственные сточные воды. Вопросы очистки. М.:Медгиз, 1950. Вып. II. С. 134-141.

9. **Родзиллер И.Д.** К вопросу о расчете смешения сточных вод в реке. М.: ВНИИВОДГЕО, 1954. 30 с.

10. **Лепихин А.П.** К проблеме корректности методов расчета и задания исходной гидрологической и гидрохимической информации при регламентации техногенных воздействий на водные объекты / Возняк А.А., Тиунов А.А., Богомолов А.В. // Водное хозяйство России. 2017. № 1. С. 58-77.

11. План мероприятий по оздоровлению Дона: Распоряжение Правительства РФ от 21 июля 2021 г. № 2012-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107230006>.

12. Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства: Приказ Минприроды России от 13 апреля 2009 г. № 87.

13. **Белозеров Д.А.** Совершенствование методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ в водные объекты для водопользователей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «Геология». 2011. № 2. С. 186-193.

Об авторе

Дрововозова Татьяна Ильинична, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник; SPIN-код: 7011-0905, ORCID: 0000-0002-8724-7799, tid70.drovovozova@yandex.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Дрововозова Т.И. выполнила практические и теоретические исследования, на основании которых провела обобщение и написала рукопись, имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 27.03.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 09.08.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 09.08.2024

in the water of water bodies of fisheries importance: Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated December 13, 2016 No. 552. – URL: docs.cntd.ru/document/420389120 .

5. On approval of the methodology for the development of standards for permissible discharges of pollutants into water bodies for Water users: Order No. 1118 of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated December 29, 2020. ConsultantPlus. URL: <https://www.consultant.ru/document/cons>

6. **Karushev A.V.** Theory and methods of calculation of sediments and water quality in rivers and reservoirs. Selected works. St. Petersburg: Art – Express Publishing House. 2013. 250 p.

7. **Karushev A.V.** Methodology for calculating the maximum permissible wastewater discharges into rivers and reservoirs / (co-author L.P. Alekseev) / In the book. Scientific foundations of rational use, protection and management of water resources, part 2, Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1983. 205 p.

8. **Frolov V.A.** Determination of the degree of mixing of wastewater with water of a watercourse (river) // Collection. Industrial wastewater. Questions about the layout. Issue II. M.: Medgiz. 1950. P. 134-141.

9. **Rodziller I.D.** On the issue of calculating the mixing of wastewater in the river. M.: VNIIVODGEO. 1954. 30 p.

10. **Lepikhin A.P.** On the problem of correctness of calculation methods and assignment of initial hydrological and hydrochemical information in the regulation of anthropogenic impacts on water bodies / A.P. Lepikhin, A.A. Wozniak, A.A. Tiunov, A.V. Bogomolov. // Water industry of Russia. 2017. No. 1. P. 58-77.

11. Action plan for the improvement of the Don: Decree of the Government of the Russian Federation dated 07/21/2021 No. 2012-R. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107230006>

12. On approval of the Methodology for calculating the amount of damage caused to water bodies as a result of violation of water legislation: Order No. 87 of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated April 13, 2009. Access from the IS "Techexpert: 6th generation" Intranet.

13. **Belozero D.A.** Improving the methodology for developing standards for permissible discharges of substances into water bodies for water users / Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology. 2011. No. 2. P. 186-193.

About the author

Tatjana I. Drovovozova, DSc (Eng), associate professor, leading researcher; SPIN-code: 7011-0905, ORCID: 0000-0002-8724-7799, tid70.drovovozova@yandex.ru

Drovovozova T.I. carried out practical and theoretical studies, on the basis of which she generalized and wrote the manuscript. She has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-26-33>

УДК 631.6:624.131.276:614.849



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЖАРООПАСНОСТИ ТОРФА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ЕГО РАЗЛОЖЕНИЯ НА ЗЕМЛЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

О.Н. Дидманидзе[✉], А.В. Евграфов[✉], Н.Н. Пуляев, А.С. Гузалов

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

Аннотация. Рассматриваются наиболее распространенные виды природных пожаров и причины их возникновения в Российской Федерации – стране, имеющей крупнейшие торфяные месторождения. Данный вид пожаров наносит огромный прямой и косвенный экономический и социально-экологический ущерб, причем косвенный значительно превышает прямой ущерб и является распределенным во времени. Объектом исследований являются осушенные торфяные почвы и выработанные месторождения, пригодные для производства продукции растениеводства. Рассмотрена главная причина использования торфяных залежей, расположенных на большей части территории Российской Федерации, в качестве сельскохозяйственных угодий. Представлены агрохимические характеристики различных торфяных почв, которые показывают, что торф обладает высоким плодородием и представляет интерес для выращивания сельскохозяйственных культур. Целью экспериментальных исследований являлось определение времени до самовозгорания отобранных образцов торфа при их естественной плотности. Представлены результаты экспериментальных исследований способности торфяной почвы самовозгораться в зависимости от ее степени разложения и объемной плотности. В результате исследований определены степень разложения и зольность образцов торфа. Представлены зависимость изменения объемной плотности торфа в естественных условиях от степени разложения и динамика процесса разогрева теплофизического центра и поверхности образцов торфа. Определено, что процесс деструкции осушенных торфяных почв имеет четкую тенденцию быстрого роста.

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

Ключевые слова: торфяная почва, объемная плотность, степень разложения, зольность, пожары, мелиоративный фонд

Формат цитирования: Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Пуляев Н.Н., Гузалов А.С. Результаты исследований пожароопасности торфа в зависимости от степени его разложения на землях сельскохозяйственного назначения // Природообустройство. 2024. № 4. С. 26-33. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-26-33>

Scientific article

RESULTS OF STUDIES OF PEAT FIRE HAZARD DEPENDING ON THE DEGREE OF ITS DECOMPOSITION ON AGRICULTURAL LANDS

O.N. Didmanidze[✉], A.V. Evgrafov[✉], N.N. Pulyaev, A.S. Guzalov

Russian Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy;

Institute of Mechanics and Power Engineering named after V.P. Goryachkin; 127434, Moscow, st. Timiryazevskaya. 49, Russia

Abstract. This article examines the most common types of natural fires in the Russian Federation, a country with some of the largest peat deposits on the planet, and the reasons for their occurrence. This type of fire causes enormous direct and indirect economic, socio-ecological damage, and indirect damage significantly exceeds direct damage and is distributed over time. The object of the study is drained peat soils and mined-out deposits suitable for crop production. The main reason for the use of peat deposits located in most of the territory of the Russian Federation as agricultural land is highlighted. The agrochemical characteristics of various peat soils are presented, which show that peat has high fertility and is of interest for growing crops. The purpose of the experimental studies was to determine the time before spontaneous combustion of selected peat samples at their natural density. The results of experimental studies of the ability of peat soil to spontaneously ignite depending on its degree

of decomposition and bulk density are presented. As a result of the study, the degree of decomposition and ash content of peat samples were determined. The dependence of changes in the volumetric density of peat under natural conditions depending on the degree of decomposition and the dynamics of the heating process of the thermophysical center and the surface of peat samples are presented. It has been determined that the process of destruction of drained peat soils has a clear tendency of rapid growth.

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

Keywords: peat soil, bulk density, degree of decomposition, ash content, fires, reclamation fund

Format of citation: Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Results of studies of peat fire hazard depending on the degree of its decomposition on agricultural land // Prirodoobustrojstvo. 2024. No.3. P. 26-33. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-26-33>

Введение. В Нечерноземной зоне Российской Федерации более 70% сельскохозяйственных угодий расположено на солонцово-подзолистых почвах, которые обладают низким плодородием, характеризуются незначительной мощностью горизонта, содержанием гумуса 0,8-2%, кислой реакцией pH 4,0-5,5 и неосновными элементами питания [1].

Площадь осушенных торфяных почв России составляет около 320 млн га, на 130 млн га остаточный слой торфа – более 30 см, что соответствует требованиям нормативно-технической документации, регламентирующей их использование для целей сельскохозяйственного производства.

Цель исследований: определение времени до самовозгорания отобранных образцов торфа при их естественной плотности.

Торфяные почвы содержат большое количество углерода, водорода, серы и азота, имеют высокий плодородный потенциал и обладают агрономическими свойствами, поэтому урожайность сельскохозяйственных культур на них значительно выше, чем на дерново-подзолистых почвах Центральной Нечерноземной зоны России, занимающих более 30% ее площади.

В таблице 1 представлены агрохимические характеристики различных торфяных почв, которые показывают, что торф обладает высоким плодородием и представляет интерес для выращивания сельскохозяйственных культур.

Согласно результатам исследований [2] наиболее распространенным является черновой способ, который применяется при освоении выработанных торфяников и при котором впоследствии выращиваются многолетние и однолетние травы, овощи, кормовые и зерновые культуры.

Периодическая обработка верхнего слоя торфяной почвы в процессе возделывания сельскохозяйственных культур разрыхляет и уменьшает ее объемную плотность, а также способствует формированию открытой поверхности, которая подвергается прямому воздействию солнечной радиации и сильному нагреву. За вегетационный период культуры испаряют большое количество влаги из почвы, что приводит к уменьшению влажности ее слоев по всей корнеобитаемой зоне и даже за ее пределами на фоне низкого расположения уровня грунтовых вод, причем ситуацию осложняет работающая осушительная система, присутствующая на всех осушенных торфяниках.

Таким образом, на торфяной почве формируются предпосылки для активации процессов теплового самовозгорания. Данный процесс активируется при температурах воздуха от +35 до 40°C, при которых поверхность торфа достигает значений в свою очередь около +90°C. Торфяные пожары приводят к уничтожению почвы, снижению ее плодородия и нецелесообразности сельскохозяйственного производства на ней. В результате происходит потеря высокопродуктивных угодий на фоне большого экологического

Таблица 1. Агрохимическая характеристика различных типов торфяных почв, % к абсолютно сухой массе

Table 1. Agrochemical characteristics of various types of peat soils in% of absolutely dry mass

Вид торфа Type of peat	Содержание золы% Ash content, %	Содержание органического вещества% Content of organic matter, %	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	pH вытяжки pH extract
Низинный / Lowland	8-15	85-92	2,5-3,5	0,2-0,6	0,15-0,20	2,0-6,0	4,7-5,5
Переходный / Transitional	5-8	90-95	1,2-2,5	0,10-0,25	< 0,15	0,2-0,4	3,5-4,7
Верховой / High-moor	< 5	95-98	0,7-1,5	< 0,15	< 0,10	< 0,4	2,8-3,5

и экономического ущерба. Особенность горения и тления торфа заключается в том, что он горит практически во всех направлениях, не подвержен силе и направлению ветра и не может быть остановлен дождем или снегом [3].

Тепловые эпицентры торфяных пожаров находятся в основном в слоях торфа в режиме тления и поэтому скорость их распространения может достигать значений от метров до десятков метров за сутки. Особенность данных пожаров заключается в том, что очаг тления возникает на поверхности торфяной почвы и далее самопроизвольно заглубляется вплоть до минеральных подстилающих слоев грунта, вдоль которых он в дальнейшем распространяется с последующим выходом на поверхность.

Высокие теплотворные свойства торфа обусловлены наличием в нем битумов, содержание которых может достигать до 25% от массы абсолютно сухой торфяной почвы. Во время торфяного пожара частицы торфяной почвы, через которые просачивается дым, обволакиваются парафином, поступающим из очага горения или тления, что способствует их несмачиванию водой. Поэтому для эффективной ликвидации возгорания требуются специальные водные составы с добавлением поверхностно активных веществ, что в свою очередь наносит экологический ущерб окружающей среде [2, 3].

Нижние слои торфа тлеют (горят) с неравномерной скоростью, но данный процесс является устойчивым и не может быть остановлен осадками. Как правило, при торфяном пожаре выгорает плодородный слой торфяной почвы на глубину 0,5-1,5 м, вследствие чего образуются непригодные для ведения сельского хозяйства пирогенные образования. Кроме того, на данной территории активизируются процессы водной и ветровой эрозии.

Тверская область обладает крупнейшими запасами торфа среди всех регионов Центральной Нечерноземной зоны России. По числу разведанных торфяных месторождений она занимает первое место среди 17 регионов Центрального федерального округа, и ее доля составляет 20,5% [3].

Основные выработанные торфяные массивы приходятся на Калининский (9), Кимрский (7) и Кувшиновский (5) районы.

Среди разрабатываемых запасов преобладают пожароопасные торфяные месторождения, которые относятся к категории сельскохозяйственных угодий и составляют 57,4% от общего числа разрабатываемых запасов [4].

Состав мелиоративного фонда торфяных месторождений определяется по критериям отнесения запасов торфа к забалансовым (мелкие контуры, неглубокие залежи, зольность). Резервом

для земель сельскохозяйственного назначения являются торфяные месторождения, которые пригодны для производства на них продукции растениеводства. Наибольшее количество объектов мелиоративного фонда расположено в Старицком (123), Калининском (114), Кимрском (86) административных районах Тверской области с развитой инфраструктурой, что указывает на привлекательность здесь сельскохозяйственной деятельности.

Анализ исследований [5] показывает, что стандартный размер торфяного месторождения восстановительного фонда составляет в среднем 30 га. Запасы торфа на участках восстановительного фонда составляют 29,0 млн т, или 1,4% от всех запасов региона.

Согласно ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» торфяной грунт (торф) – это органический грунт, содержащий в своем составе 50% (по массе) и более органического вещества, представленного растительными остатками и гумусом. По степени разложения он подразделяется на 3 категории, представленные в таблице 2.

Степень разложения показывает содержание в торфе аморфного вещества, состоящего из продуктов разложения исходной растительной массы и мельчайших обрывков ее тканей.

Материалы и методы исследований.

Участки отбора проб расположены на месторождении торфа «Красный мох» в пределах Верхневолжской низменности (рис. 1).

Пробы были отобраны по ГОСТ Р 58595-2019 «Почвы. Отбор проб» [8] в Тверской области на месторождении торфа «Красный мох» на участках с кадастровыми номерами 69:10:0000018:524, 69:10:0000018:525, 69:10:0000018:268.

Были определены степень разложения и зольность образцов торфа по ГОСТ 10650-2013 «Торф. Методы определения степени разложения и объемная плотность», ГОСТ 26714-85 «Удобрения органические» [8] (табл. 3). Плотность определялась во время отбора образцов ненарушенно го верхнего слоя торфа.

Таблица 2. Классификация торфа по степени разложения

Table 2. Classification of peat by degree of decomposition

Разновидность торфа <i>Type of peat</i>	Степень разложения $D_p d\%$ <i>Degree of decomposition</i>
Слаборазложившийся <i>Slightly decomposed peat</i>	$D_p d < 20$
Средне­раз­ложив­ший­ся <i>Medium-decomposed peat</i>	$20 < D_p d < 45$
Сильно­раз­ложив­ший­ся <i>Highly decomposed</i>	$D_p d > 45$

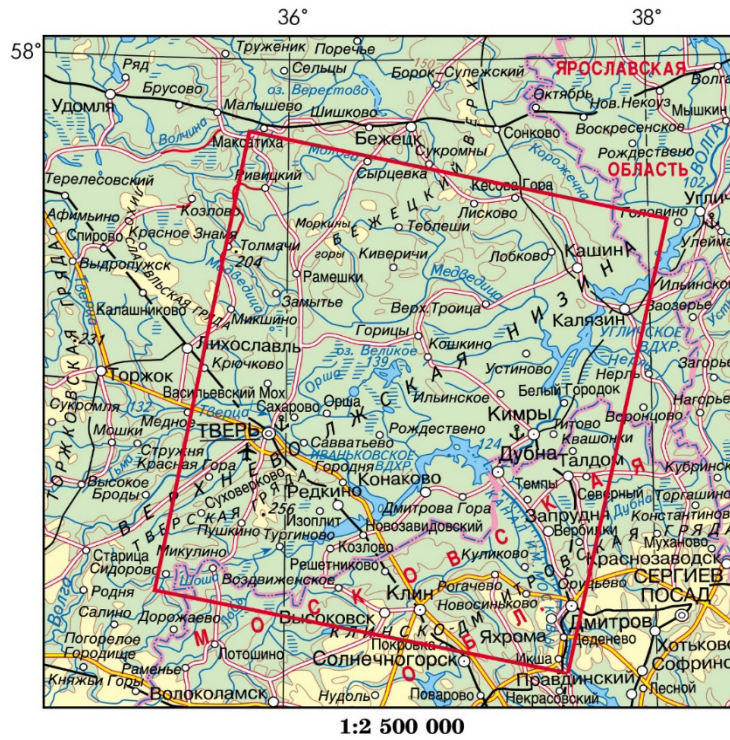
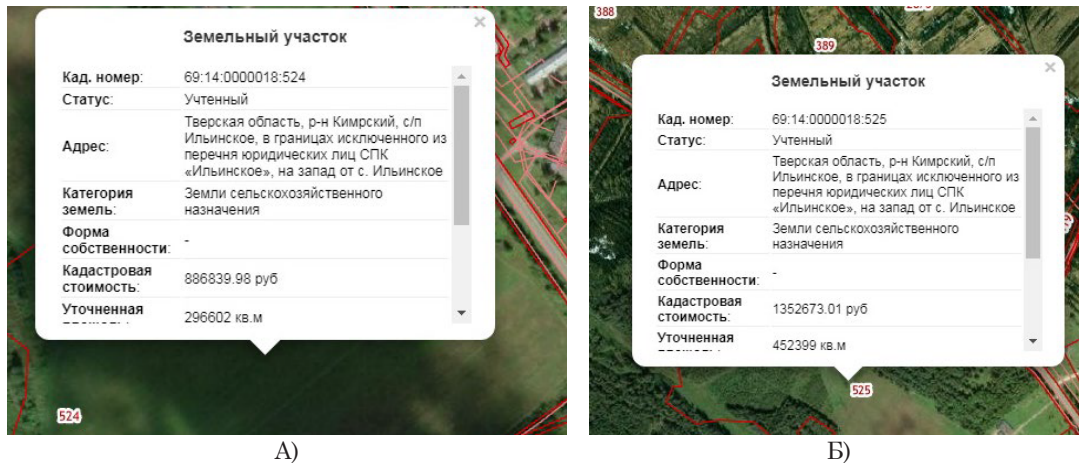


Рис. 1. Верхневолжская низменность [6]

Fig. The Verkhnevolzhsk lowlands [6]



А)

Б)



В)

Рис. 2. Участки отбора проб с кадастровыми номерами: А) 69:10:0000018:524; Б) 69:10:0000018:525; В) 69:10:0000018:268

Fig. 2. Sampling sites with cadaster numbers:

А) 69:10:0000018:524; Б) 69:10:0000018:525; В) 69:10:0000018:268

На рисунке 3 представлена зависимость изменения объемной плотности торфа в естественных условиях от степени разложения, из которой следует, что с ростом разложения образцов возрастает их плотность.

Цель экспериментальных исследований: определение времени до самовозгорания отобранных образцов торфа при их естественной плотности. В ходе исследований итерация экспериментов была трехкратной.

Для проведения лабораторных исследований торфяной почвы, отобранной на месторождении «Красный мох», расположенном в Тверской области (рис. 3), была применена методика экспериментального определения условий возникновения процесса теплового самовозгорания, разработанная ВНИИПО [9]. Для проведения экспериментальных исследований использовалось следующее оборудование: сушильный шкаф СНОЛ-3,5; цилиндрический контейнер К-30 из латунной сетки № 8 высотой и диаметром 30 мм; термопары ТПК 011-0,5/1,5 с диаметром электрода 0,5 мм, диапазон измерения температуры $-40...+800^{\circ}\text{C}$; счетчик-регистратор марки ИС-203.4 с 4 каналами передачи информации; нормирующие усилители НУ-02; программное

обеспечение «Диспетчер 203» и «Техно-Графика» [10, 11]. Схема установки представлена на рисунке 4. Испытуемые образцы торфа загружались в специальный контейнер К-30, температура в котором фиксировалось с помощью термопар, расположенных в теплофизическом центре и на поверхности испытуемого образца.

Температура окружающей среды в сушильном шкафу 90°C поддерживалась на всем протяжении эксперимента, что соответствует нагреву поверхности торфяной почвы в средней полосе Нечерноземной зоны Российской Федерации в летнюю жару. Полученные результаты представлены в форме графиков (рис. 5-7), показывающих тепловые изменения теплофизического центра и поверхности образцов торфа под действием температуры окружающего воздуха, статированного в сушильном шкафу. При достижении равенства температур центра и поверхности испытуемого образца торфяной почвы создаются условия для теплового самовозгорания.

Из полученных результатов следует, что при увеличении степени разложения торфяной почвы повышается ее объемная плотность, при увеличении которой возрастает время до создания условий самовозгорания образцов торфа.

Таблица 3. Результаты лабораторного анализа образцов торфа

Table 3. Results of laboratory analysis of peat samples

Определяемые показатели <i>Defined indicators</i>	Единицы измерений <i>Units of measurements</i>	Результаты исследований <i>Tests results</i>	Погрешность Δ <i>Error Δ</i>	Дополнительный контроль параметров <i>Additional control of parameters</i>	Соотв. требований НТД <i>Compliance with the NTD requirements</i>	Метод испытаний <i>Test method</i>
Участок отбора проб А / Sampling site A						
Степень разложения <i>Degree of decom</i>	%	20	–	–	соответ. <i>compliance</i>	ГОСТ 10650 2013
Зольность <i>Ash content</i>	%	8	$\pm 0,40$	–	соответ. <i>compliance</i>	ГОСТ 26714 –85
Участок отбора проб Б / Sampling site B						
Степень разложения <i>Degree of decom</i>	%	35	–	–	соответ. <i>compliance</i>	ГОСТ 10650 2013
Зольность <i>Ash content</i>	%	10,4	$\pm 0,80$	–	соответ. <i>compliance</i>	ГОСТ 26714 –85
Участок отбора проб В / Sampling site B						
Степень разложения <i>Degree of decom</i>	%	50	–	–	соответ. <i>compliance</i>	ГОСТ 10650 2013
Зольность <i>Ash content</i>	%	11,8	$\pm 0,80$	–	соответ. <i>compliance</i>	ГОСТ 26714 –85

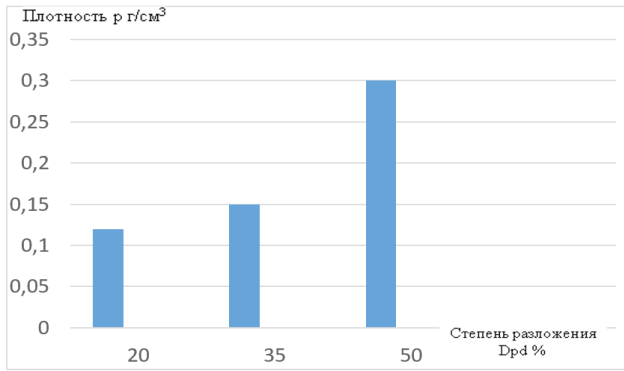


Рис. 3. Зависимость плотности верхнего слоя торфа от степени разложения в естественных условиях

Fig. 3. Dependence of the density of the upper layer of peat on the degree of decomposition in natural conditions

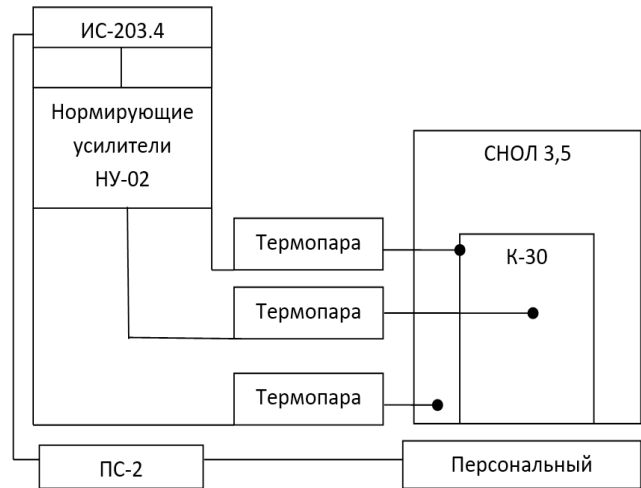


Рис. 4. Схема экспериментальной установки
Fig. 4. Scheme of the experimental facility

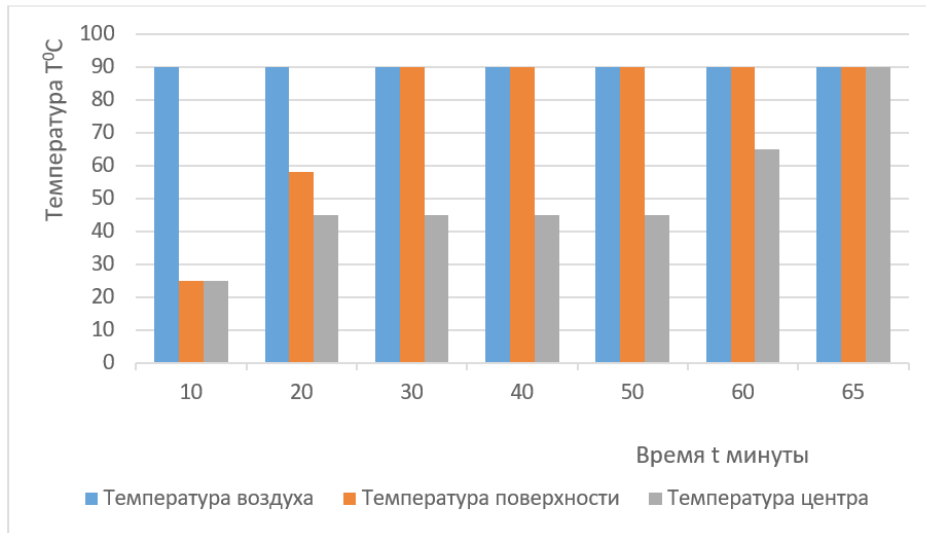


Рис. 5. Достижение образца торфа А параметров самовозгорания
Fig. 5. Achievement of peat sample A of spontaneous combustion parameters

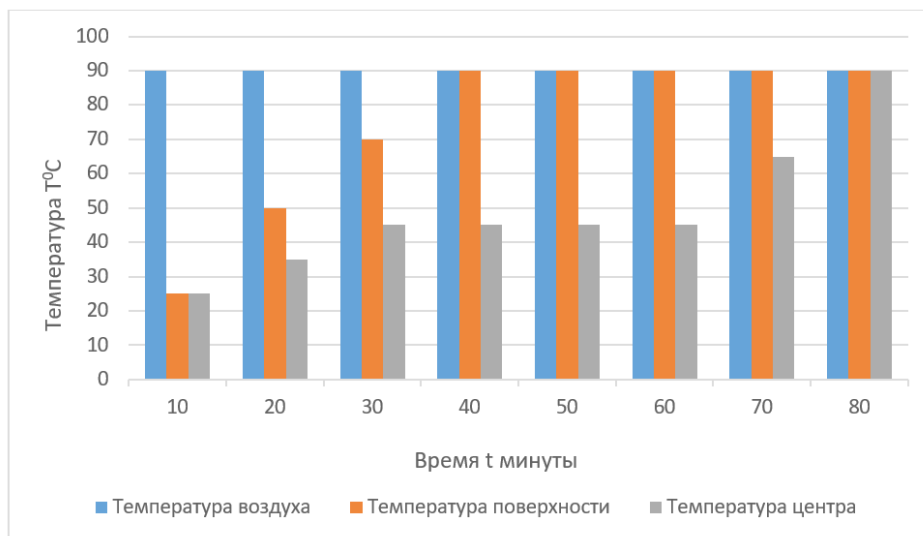


Рис. 6. Достижение образца торфа Б параметров самовозгорания
Fig. 6. Achievement of peat sample B of spontaneous combustion parameters

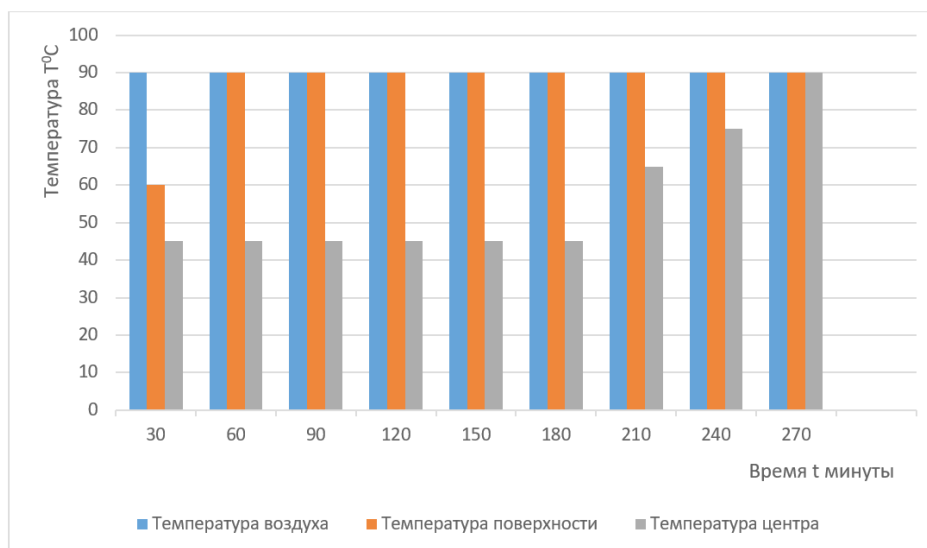


Рис. 7. Достижение образца торфа В параметров самовозгорания
Fig. 7. Achievement of peat sample B of spontaneous combustion parameters

Инициирование процесса самовозгорания и возгорания торфяной почвы зависит от их объемной плотности. Скорость тления или горения можно описать математической зависимостью, полученной Я.С. Киселевым [9]:

$$U_N = \frac{n \cdot a \cdot c_p \cdot \rho \cdot P_+(T)}{\psi \cdot \alpha \cdot \Delta T_3},$$

где n – относительный температурный градиент; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; c_p – удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; ρ – плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $P_+(T)$ – адиабатическая скорость самонагрева в зоне горения (или тления), $\text{К} \cdot \text{с}^{-1}$.

Отсюда чем меньше насыпная плотность образца торфа, тем короче длина волны горения, он содержит большее количество окислителя, по причине чего скорость тления или горения значительно выше.

На основе полученных результатов эксперимента можно сделать заключение о том, что при низкой степени разложения торфяной почвы она имеет меньшую объемную плотность, большую насыщенность кислородом, короткую длину волны горения по сравнению с более плотными образцами. Соответственно по этим причинам требуется меньше времени до активации в ней процесса самовозгорания, то есть она является наиболее пожароопасной.

Выводы

1. Среди земель Центральной Нечерноземной зоны Российской Федерации наибольший производственно-экономический интерес в целях

производства продукции растениеводства представляют торфяные почвы, которые обладают высоким потенциалом плодородия. Как правило, это осушенные торфяные месторождения, где уже присутствует мелиоративная система, которая делает их более ценными для сельскохозяйственной деятельности.

2. При систематической обработке почвы, которая является неотъемлемой частью возделывания сельскохозяйственных культур, происходит разуплотнение верхнего слоя торфа, подверженного нагреву под действием солнечной радиации. Также в течение вегетационного периода культуры транспирируют почвенную влагу, что усиливает иссушение слоев торфяной почвы и увеличивает риск их самовозгорания.

3. В результате выгорания торфяной почвы образуются пирогенные образования, которые являются непригодными для возделывания сельскохозяйственных культур. Восстановление плодородного слоя почвы – долгий и экономически затратный процесс.

4. Из результатов полевых и лабораторных исследований следует, что с ростом разложения торфяной почвы возрастает ее объемная плотность. При ее увеличении возрастает время до создания условий самовозгорания образцов торфа, снижается ее пожароопасность за счет увеличения длины волны горения и уменьшения количества окислителя, в результате чего скорость распространения горения в ней значительно ниже.

Список использованных источников

1. **Аравин В.И., Нумеров С.Н.** Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М.: Гостехиздат, 1953. 616 с.
2. Концепция охраны и рационального использования торфяных болот России. Ред. Л.И. Инишева. Томск: ЦНТИ, 2003. 60 с.
3. **Макаренко Г.Л.** Торф малой степени разложения физико-географических провинций Тверской области // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 2. С. 86-92. EDN: RTZJCR.
4. **Панов В.В., Женихов Ю.Н.** Структура и учет пожароопасных торфяников Тверской области // Труды Инсторфа. 2021. № 24 (77). С. 26-33. EDN: TWUTWG.
5. **Миронов В.А.** и др. Торфяные ресурсы Тверской области: рациональное использование и охрана: монография. 1-е изд. / Федеральное агентство по образованию, Тверской государственный технический университет. Тверь: ТГТУ, 2006. 70 с. EDN: QKYDYR.
6. География. Карта. Верхневолжская низменность. Фото из космоса. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://geographyofrussia.com/karta-verkhnevolzhskaya-nizmennost-foto-iz-kosmosa/> (дата обращения: 05.06.2024).
7. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация: Межгосударственный стандарт: дата введения 2012-06-12 / Федеральное агентство по техническому регулированию. Изд. официальное. М.: Стандартиформ, 2018. 45 с.
8. ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб. Национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2019-10-10 / Федеральное агентство по техническому регулированию. Изд. официальное. М.: Стандартиформ, 2019. 8 с.
9. **Киселёв Я.С., Хорошилов О.А., Демехин Ф.В.** Физические модели горения в системе предупреждения пожаров: монография. СПб.: Санкт-Петербургский университет МВД России, 2009. 347 с.
10. **Kinbara T., Akita K.** Combustion and Flame. 1960.t. 4. № 2. Pp. 173-180.
11. **Smith K.A., Dowdell R.I.** Field studies of the soil atmosphere // J. Soil Sci. 1974. Vol. 25, № 2.

Об авторах

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

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

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

Артёмбек Сергеевич Гузалов, канд. техн. наук; Orcid: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988; aguzalov@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Пуляев Н.Н., Гузалов А.С. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Authors' contributions

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 25.04.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 06.06.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 06.06.2024

References

1. **Aravin V.I., Numerov S.N.** Theory of motion of liquids and gases in a non-deformable porous medium. Moscow: Gostekhizdat, 1953. 616 p.
2. The concept of protection and rational use of peat bogs in Russia / ed. by L.I. Inishev. Tomsk: TSNTI, 2003. 60 p. ISBN5-89702-085-X
3. **Makarenko G.L.** Peat with a low degree of decomposition in the physical-geographical provinces of the Tver region Peat / G.L. Makarenko // Modern science-intensive technologies. 2014. № 2. P. 86-92. – EDN RTZJCR.
4. **Panov V.V.** Structure and accounting of fire dangerous peat bogs in the Tver region / V.V. Panov, Yu.N. Zhenikhov // Works of Instorfa. № 24(77). P. 26-33. – EDN TWUTWG.
5. Peat resources of the Tver region: rational use and protection: monograph / [V.A. Mironov and others]; Federal agency on education, Tver state technical university – 1st edition, Tver: TSTU, 2006. 70 p. – ISBN5-7995-0373-2. – EDN QKYDYR.
6. Geography. The map of the Verkhnevolzhsk low land. Photo from space. Electronic resource. Access mode: <https://geographyofrussia.com/karta-verkhnevolzhskaya-nizmennost-foto-iz-kosmosa/> (date of application: 05.06.2024)
7. GOST 25100-2011 Soils. Classification: Interstate Standard: Date of Introduction 2012-06-12 / Federal agency for technical regulation. ed. official. Moscow, Standartinform Publ., 2018.45 p.
8. GOST R58595-2019 Soils. Sampling. National Standard of the Russian Federation: introduction date 2019-10-10 / Federal agency for technical regulation. – Ed. Official. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 8 p.
9. **Kiselev Ya.S.** Physical models of combustion in the fire prevention system / O.A. Khoroshilov, F.V. Demekhin. Monograph. St. Petersburg: St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2009. 347 p.
10. **Kinbara T., Akita K.** Combustion and Flame. 1960. – t. 4. № 2. P. 173-180.
11. **Smith K.A., Dowdell R.I.** Field studies of the soil atmosphere // J. Soil Sci, 1974. Vol. 25. № 2.

About the authors

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

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

Artem S. Guzalov, CSc (Eng), Orcid: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988; aguzalov@mail.ru

Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-34-43>

УДК 631.62:626.86



КОНСТРУКЦИИ ДРЕНАЖА И МЕТОД РАСЧЕТА ДЛЯ ПОДВАЛОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

В.В. Пчёлкин, К.С. Семёнова

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, Б. Академическая ул., 44, Россия

Аннотация. При рассмотрении гидрогеологических условий музейного комплекса «Куликово поле», расположенного в Кимовском районе Тульской области, было обнаружено, что отсутствует необходимая конструкция осушительной системы, которая обеспечивает отвод грунтовых вод с подвальных помещений. Цель исследований – разработка конструкции дренажа и обоснование метода расчета осушения подвалов глубокого заложения на примере музейного комплекса «Куликово поле». Предлагаемая конструкция вертикального дренажа позволяет повысить надежность работы осушительной системы за счет устройства фильтрующей обсыпки и обмотки из геотекстиля. Расчет предлагаемой конструкции вертикального дренажа состоит из определения следующих позиций: радиуса кривой депрессии (влияние дренажа в сторону от подвала строения); расхода (дебита) дренажа; притока воды в дренаж; снижения напора посередине между дренами ряда, подбор насосов вертикального дренажа. Предлагаемая конструкция дренажа, способ его строительства (получен патент на изобретение) и метод расчета апробированы при осушении подвальных помещений глубокого заложения музейного комплекса «Куликово поле». Созданная система отводит избыточные грунтовые воды, устраняет «барражный» эффект. Отмечается, что строительство дренажных систем, происходящее в настоящее время, требует тщательного учета опыта проектирования и эксплуатации гидромелиоративных систем предыдущего периода и использования новых перспективных, экономически выгодных решений.

Ключевые слова: водоприемная способность, дренажное устройство, геотекстиль, вертикальный дренаж, мелиорация, осушительная сеть, фильтрующая обсыпка

Формат цитирования: Пчёлкин В.В., Семёнова К.С. Конструкции дренажа и метод расчета для подвалов глубокого заложения // Природообустройство. 2024. № 4. С. 34-43. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-34-43>

Original article

DRAINAGE STRUCTURES AND CALCULATION METHOD FOR DEEP BASEMENTS

V.V. Pchelkin, K.S. Semenova

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; Moscow; 125434, B. Akademicheskaya st., 44, Russia

Abstract. For the considered hydrogeological conditions of the Kulikovo Pole museum complex, located in the Kimovsky district of the Tula region, there is no necessary design of the drainage system, the method of its construction and the calculation method to ensure the drainage of groundwater from the basement. A vertical drainage design and calculation method necessary for the normal operation of the Kulikovo Pole museum complex were proposed. The purpose of the work is to develop a drainage design and substantiate a method for calculating the drainage of deep basements using the example of the Kulikovo Pole museum complex. The proposed design of vertical drainage makes it possible to increase the reliability of the drainage system due to the installation of a filter bed and a geotextile winding. The calculation of the proposed vertical drainage design consists of determining the following positions: the radius of the depression curve (the influence of drainage away from the basement of the building); drainage flow rate; water inflow into the drain; reducing the pressure in the middle between the row drains, selecting vertical drainage pumps. The proposed drainage design, the method of its construction (a patent for the invention was received) and the calculation method were tested when draining the deep basements of the Kulikovo Pole museum complex. The created system drains excess groundwater and eliminates the “barrage” effect. It is noted that the construction of drainage systems

currently underway requires careful consideration of the experience of design and operation of drainage systems of the previous period and the use of new promising, cost-effective solutions.

Keywords: water intake capacity, drainage device, geotextiles, vertical drainage, reclamation, drainage network, filter bedding

Format of citation: Pchelkin V.V., Semenova K.S. Drainage structures and calculation method for deep basements // Prirodoobustrojstvo. 2024. № 4. P. 34-43. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-34-43>

Введение. Музейный комплекс «Куликово поле» расположен возле села Монастырщино (Кимовский район Тульской области) на территории заказника. Территория заказника имеет площадь 65200 га, расположена на Среднерусской возвышенности в пределах поймы междуречья Дона и Непрядвы и их притоков: Курцы, Смолки, Дубиков и Мокрой Таболы [1].

В геоморфологическом отношении музейный комплекс «Куликово поле» расположен на водораздельном склоне. У подножья склона был насыпан курган, и в этом месте построен данный комплекс. Абсолютные отметки дневной поверхности места сооружения комплекса изменяются от 206,73 до 214,44 м, перепад высот составляет 7,71 м.

Заглубление подземной части строений составило от 4 до 10 м. Построенный внутренний горизонтальный дренаж не справился с осушением подземной части комплекса. Следует отметить, что подземная часть строений проявила себя как «подземная плотина». Поверхностная вода от снеготаяния и обильных осадков, стекая по склону, доходила до зданий комплекса и, впитываясь в грунт, переходила в подземный ток. Образовывался так называемый «барражный» эффект, который вызвал подъем грунтовых вод. Поэтому фундаменты строений оказались под водой.

Слой воды, затопивший фундамент, составил 2,44 м. Грунтовая вода снаружи просочилась через стыки внутрь заглубленных помещений и образовала в них слой 0,2 м. В связи с этим возникла необходимость строительства дренажной системы. С учетом гидрогеологических условий, величины затопления подземной части зданий, невозможности прекращения проведения экскурсий был выбран вертикальный дренаж.

Анализ открытых источников литературы [2-6] показал, что для рассматриваемых условий отсутствуют необходимая конструкция дренажа, способ его строительства и метод расчета. Поэтому принято решение разработать конструкцию дренажа и обосновать метод расчета, необходимые для нормальной работы музейного комплекса «Куликово поле». На способ строительства вертикального дренажа был получен патент на изобретение [7].

Материалы и методы исследования. Согласно инженерно-геологическим

изысканиям (ООО «ТулаГео-Изыскания») с поверхности до глубины 0,7-1,2 м участок покрыт почвенно-растительным слоем.

На основании данных анализа материалов полевых и лабораторных работ выделено 7 инженерно-геологических элементов (ИГЭ).

ИГЭ-1 – почвенно-растительный слой (PdIV). Мощность слоя составляет 0,7-1,2 м. ИГЭ-3 – суглинок (PrII-III) от полутвердой до тугопластичной консистенции, реже – твердой и мягкопластичной, пылеватый, участками песчаный, с прослоями пластичной супеси, с прожилками гидрокарбонатных солей, суглинки обладают прерывистой просадочностью I типа, с натеканиями гумуса, ожелезнением.

ИГЭ-4 представлен суглинком (flgII-dn) твердой тугопластичной консистенции; пылеватый, с прослоями песка и супеси. Мощность слоя составляет от 0,7 до 4,30 м. ИГЭ-6 – песок (Mz) мелкозернистый, от влажного до водонасыщенного, средней плотности, глинистый. Залегает на глубине от 3,4 до 6,5 м, мощностью от 3,5 до 6,8 м. ИГЭ-7 – глина (C1) от полутвердой до тугопластичной консистенции, песчаная, алевритистая с прослоями песка, с включением дресвы щебня известняка, кремния. Залегает на глубине от 6,20 до 10,40 м, мощность – от 3,30 до 7,90 м. ИГЭ-7а – суглинок (глина) (C1) от полутвердой до тугопластичной консистенции, песчаный, участками с прослоями песка, с включением дресвы щебня известняка, кремния. Залегает на глубине от 11,20 до 18,40 м, мощность – от 3,90 до 4,80 м.

На площади музейного комплекса «Куликово поле» грунтовые воды встретились на глубине от 1,6 до 4,3 м на абсолютных отметках 203,03-212,14 м. Водовмещающими породами являются покровные и водноледниковые суглинки, а также мезозойские пески. Водупором являются нижне-каменноугольные тульские глины. Параметры коэффициента фильтрации определены по источникам литературы.

В период гидрогеологических максимумов следует ожидать подъема уровня грунтовых вод на 1 м выше уровней, отмеченных при изысканиях, а также появления грунтовых вод типа «верховодка» при глубине от 1,50 до 1,70 м над тяжелыми разностями суглинков ИГЭ-3 по всей площадке.

Таким образом, в месте расположения музейного комплекса «Куликово поле» имеет место грунтовый тип водного питания, а сам подвал находится в подтопленном состоянии.

По причине увеличения гидростатического давления разрушена защитная шпонка стен, и в подземной части музейного комплекса сформировался 0,2 м слой воды.

Осушительная система состоит из 20 вертикальных дренажных колодцев, расположенных по периметру музея на расстоянии 1,8 м от стен

фундамента, соединенных с колодцем гасителем напорной линией трубопровода. По периметру здания расположен магистральный трубопровод коллекторной линии. Грунтовые воды аккумулируются в дренажном колодце и откачиваются насосами в коллекторную линию, далее по коллекторам поступают на очистные сооружения, откуда насосом перекачиваются в большой пруд. Дренажная система частично совмещена с ливневой канализацией. Схема осушения музейного комплекса «Куликово поле» представлена на рисунке 1.

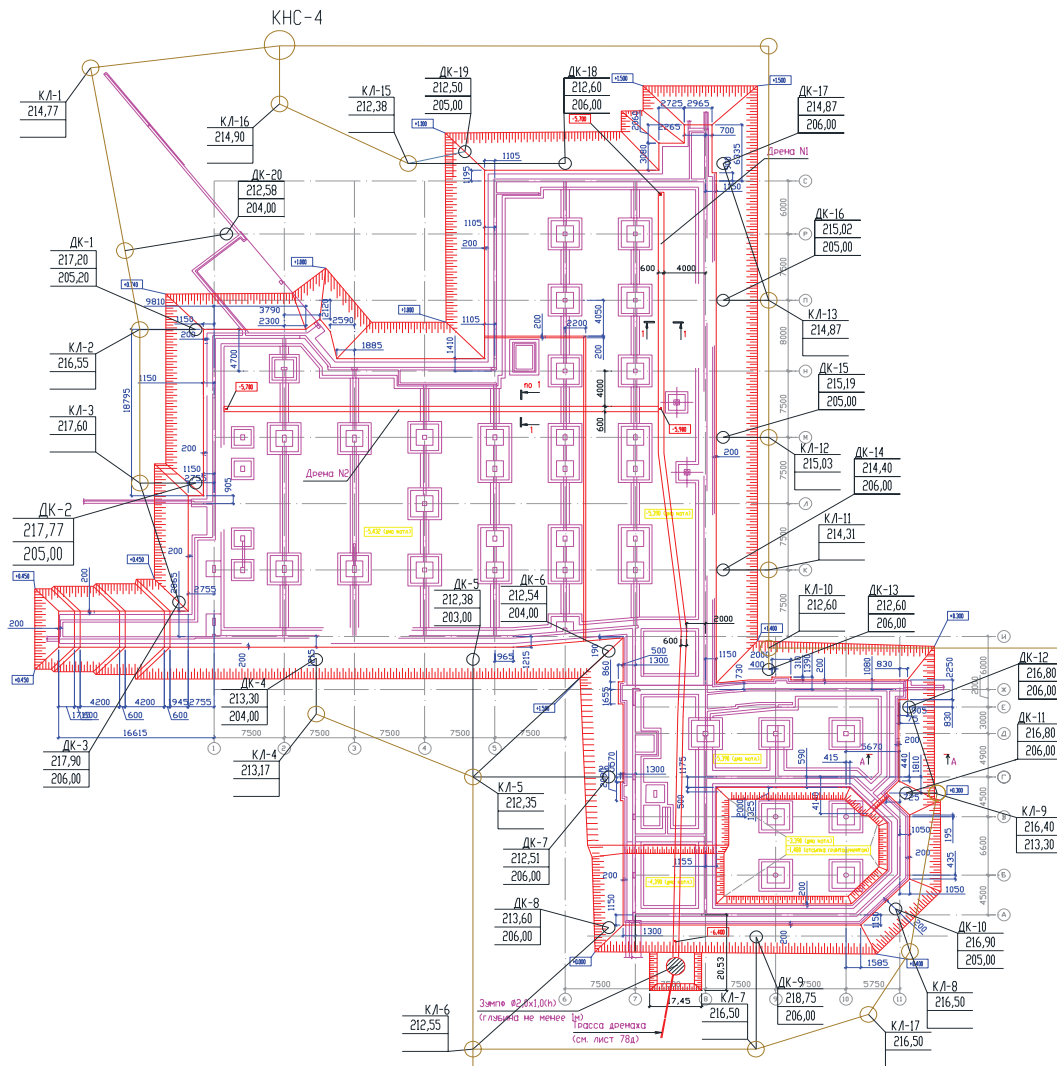


Рис. 1. Схема осушения музейного комплекса «Куликово поле»:

- – дренажный колодец; ○ – колодец ливневой канализации;
- — труба ливневой канализации (существующая);
- — труба ливневой канализации (проектируемая); — — напорный трубопровод;
- ДК-12 – номер дренажного колодца; $\begin{matrix} 216,80 \\ 206,00 \end{matrix}$ – отметка поверхности земли (в 216,80),
206,00 – отметка дна дренажного колодца

Fig. 1. Drainage scheme of the Kulikovo Field Museum complex:

- – drainage well; ○ – storm drain well; — — storm sewer pipe (existing); — — storm sewer pipe (projected);
- — pressure pipeline; ДК-12 – drainage number; $\begin{matrix} 216,80 \\ 206,00 \end{matrix}$ – elevation of the ground surface (216.80),
elevation of the bottom of the drainage well (206.00)

Результаты и их обсуждение. Конструкции вертикальных дренажей, не предусматривающие устройства фильтровой обсыпки и обмотки из геотекстиля, приводят к вымыву мелкозема из грунта и образованию в нем пустых полостей, которые могут вызвать деформацию строений.

Конструкции вертикальных дренажей с устройством фильтровой обсыпки предполагают использование специальной буровой установки для ее строительства, применение которой ведет к существенному удорожанию работ. Такие установки использовать при сооружении вертикального дренажа в рассматриваемых условиях невозможно ввиду плотной застройки музейного комплекса «Куликово поле» и рельефа местности. В связи с этим авторами была разработана конструкция вертикального дренажа, включающего в себя фильтровую обсыпку и обмотку из геотекстиля [7].

Конструкция данного вертикального дренажа показана на рисунке 2.

Использование предлагаемой конструкции вертикального дренажа позволяет повысить надежность работы дренажной системы за счет устройства фильтрующей обсыпки и геотекстиля, намотанного на перфорированную пластмассовую трубу, расположенную в водоприемной части железобетонного колодца. Внедрение данной системы вертикального дренажа обеспечивает уменьшение вымыва мелкозема в дренаж, раздвигает границы гидрогеологических условий применения вертикального дренажа, понижает расходы в сравнении с дорогостоящими буровыми установками.

Расчет вертикального линейного дренажа. Расчет предлагаемой конструкции вертикального дренажа состоит из определения следующих позиций: радиуса кривой депрессии (влияние дренажа в сторону от подвала строения); расхода (дебита) дренажа; притока воды в дренаж; снижения напора посередине между дренажами ряда; подбора насосов вертикального дренажа. Определение всех позиций предлагаемого вертикального дренажа увязаны в единую методику расчета.

Радиус кривой депрессии от центра дренажа при равномерной инфильтрации подбирают по формуле Е.Е. Керкиса [8]:

$$R\sqrt{\lg R - \lg r_0} - 0,217 = 0,66\sqrt{k/WS_0(2H - S)} - 0,5r_0, \quad (1)$$

где r_0 – радиус равновеликого круга, к которому приводится реальный контур проектируемого дренажа, м; R – радиус действия дренажа при расчете радиуса кривой депрессии $R = R_2$, м; W – инфильтрационное

питание (в весеннем периоде), м/сут.; S – требуемое понижение уровня грунтовых вод (рис. 3); k – коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут.; H – расстояние от подошвы дренируемого пласта до непониженного уровня воды.

$$W = \frac{m_1 n}{1000 \cdot t}, \quad (2)$$

где m_1 – количество осадков в снегу за зимний период, мм; n – коэффициент инфильтрации (для мелкозернистых песков $n = 0,25$); t – расчетный период во время весеннего снеготаяния (5 сут.).

$$k = \frac{\hat{e}_1 h_1 + k_2 h_2 + \dots + \hat{e}_n h_n}{\sum h_n}, \quad (3)$$

где k_1, k_2 – коэффициент фильтрации, соответственно, верхнего подстилающего и n -го слоя грунта, м/сут.; h_1, h_2, h_n – мощность, соответственно, верхнего подстилающего и n -го слоя грунта, м.

Дебит несовершенных вертикальных дрена при их работе в безнапорных условиях

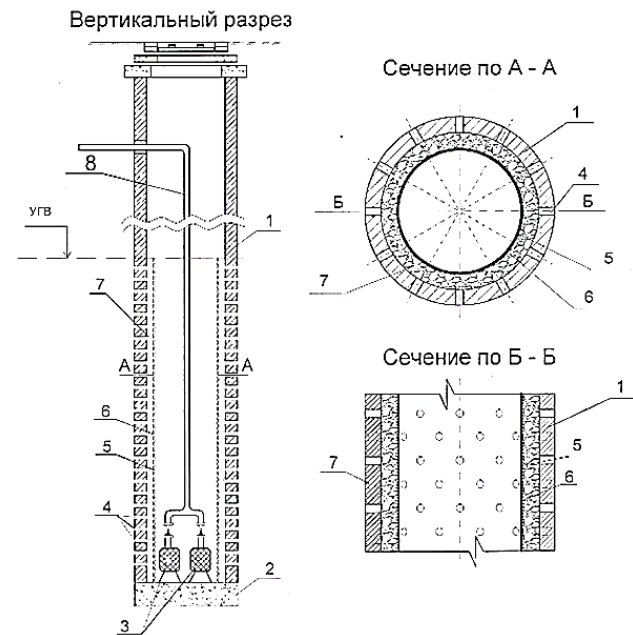


Рис. 2. Конструкция вертикального дренажа:

- 1 – железобетонный колодец;
- 2 – железобетонное днище;
- 3 – дренажные насосы;
- 4 – отверстия в стенках ж/б колодца;
- 5 – перфорированная пластмассовая труба;
- 6 – обмотка из фильтрующего геотекстиля;
- 7 – засыпка из песчано-гравийной смеси;
- 8 – напорная труба от насосов

Fig. 2. Vertical drainage design:

- 1 – reinforced concrete well,
- 2 – reinforced concrete bottom,
- 3 – drainage pumps, 4 – holes in the walls of the reinforced concrete well,
- 5 – perforated plastic pipe,
- 6 – winding made of filtering geotextile,
- 7 – backfill made of sand-gravel mixture,
- 8 – pressure pump pipe

и в установившемся режиме предлагается определять по формуле С.К. Абрамова [9], м³/сут.:

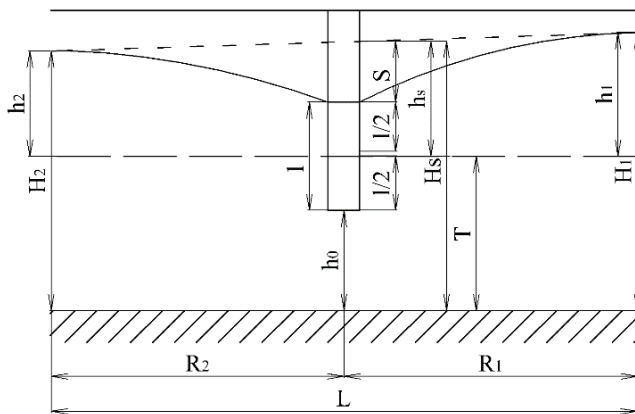
$$Q = 2\pi kS \left[\frac{2h_{cp} - S}{\ell n \frac{Rn}{\pi r_c} + \frac{\pi R_1 R_2}{\sigma L}} + \frac{2T\beta}{(1 + \beta)N} \right], \quad (4)$$

где $h_{cp} = \frac{h_1 + h_2 + h_s}{3}; \quad (5)$

$$h_s = S + \frac{\ell}{2}, \quad (6)$$

где ℓ – длина водоприемной части скважины (или фильтра); S – понижение напора воды в дренах ряда, м; σ – половина расстояния между дренами в ряду; r_c – радиус дрен, м; R_1 – радиус кривой депрессии от центра дренажа, до стены подвала, м; R_2 – расстояние от границы области питания до контура дренажа, м; $L = R_1 + R_2$ – расстояние между областями питания и естественного дренажа.

$$\beta = \frac{N}{\xi_0}; \quad (7)$$



$$T = H_s - S; \quad (8)$$

$$N = \ell n \frac{\sigma}{\pi r_c} + \frac{\pi R_1 R_2}{\sigma L}; \quad (9)$$

$$\xi_0 = \frac{T}{l} \left[2\ell n \frac{4T}{r_c} - f \left(\frac{l}{\sigma L} \right) \right] - 1,38. \quad (10)$$

Приток воды в несовершенную вертикальную дрену определяется по формуле:

$$Q^1 = \frac{Q}{\Phi_c + \zeta}, \quad (11)$$

где Φ_c – фильтрационное сопротивление совершенной скважины; ζ – дополнительное сопротивление на несовершенство дренажа.

$$\Phi_c = \frac{4\pi L_1 (L - L_1)}{\sigma L} + 2\ell n \frac{\sigma}{2\pi r_c}. \quad (12)$$

Дополнительное сопротивление на несовершенство дренажа ζ зависит от степени врезки дренажа в пласт и расстояния от рассматриваемой точки до дрены. Значения ζ представлены в таблице 1 [10].

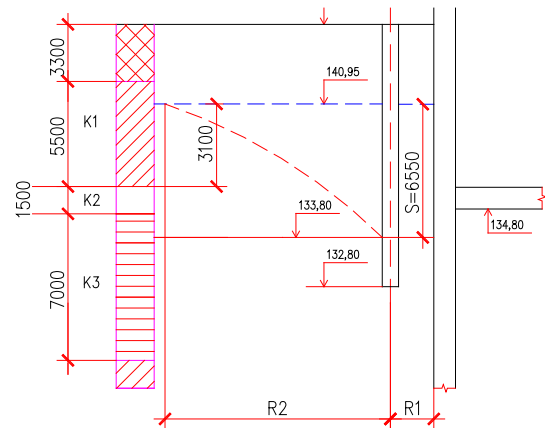


Рис. 3. Схема к расчету однолинейного вертикального дренажа несовершенного типа
Fig. 3. Scheme for calculating single-line vertical drainage of an imperfect type

Таблица 1. Значения ζ даны в зависимости от l/M

Table 1. Values ζ are given depending on l/M

l/M	Значения ζ при значениях M/r , равных Values ζ are given depending on M/r , equal to									
	0,5	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,05	0,00423	0,135	2,3	12,6	35,5	71,9	94	126	149	169
0,1	0,00391	0,122	2,04	10,4	24,3	42,8	53,8	68,5	79,6	90,9
0,3	0,00297	0,091	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2
0,5	0,00165	0,0494	0,656	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11	12,4
0,7	0,00055	0,0167	0,237	0,879	1,69	2,67	3,24	4,01	4,53	5,19
0,9	0,00005	0,0015	0,025	0,128	0,3	0,528	0,664	0,846	0,983	1,12

Условные обозначения: M – мощность напорного (водоносного) пласта; l – длина фильтра скважины; r – радиус скважины или расстояние до рассматриваемой точки. Для пластов со свободной поверхностью $M = h_e - 0,5S_{op}$; $l = l_0 - 0,5S_{op}$, где l_0 – разность отметок естественного уровня грунтовых вод и низа рабочей части скважины

Legend: M – thickness of the pressure (aquifer) formation; l – well filter length; r is the radius of the well or the distance to the point in question. For layers with a free surface $M = h_e - 0,5S_{op}$; $l = l_0 - 0,5S_{op}$, where l_0 is the difference between the elevations of the natural groundwater level and the bottom of the working part of the well

Для определения величины пониженного напора посередине между дренами ряда в безнапорных условиях для несовершенных дрен используется формула С.Ф. Аверьянова [9, 11]:

$$H_a = H - \left(1 - 0,22 \frac{\sigma}{R}\right) \beta \alpha, \quad (13)$$

где H_s – непониженный уровень подземных вод в месте расположения ряда дрен, м; S – понижение напора воды в дренах ряда, м;

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2}. \quad (14)$$

Схема к расчету однолинейного вертикального дренажа при заданных напорах на границе (в плане) представлена на рисунке 4.

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{2\sigma}{R} B}, \quad (15)$$

где $B = f\left(\frac{\sigma}{r_c}\right) = 0,73 \lg \frac{\sigma}{\pi r_c}$ определяется по графику (рис. 5); r_c – радиус дрен, м.

Коэффициент несовершенства дрен определяется по формулам:

- в сторону области питания

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \frac{m}{R_1} A}; \quad (16)$$

- в сторону естественного дренажа

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \frac{m}{R_2} A}; \quad (17)$$

$$A = 1,47 \lg \frac{1}{\sin \frac{\pi(l+d)}{2m}} \text{ определяется по гра-}$$

фику (рис. 6).

D – диаметр дрен.

$$\alpha = \frac{1}{1 + 1,47 \lg \frac{1}{\frac{\pi \ell}{2T}}}; \quad (18)$$

$$T = \frac{I_s + h_0}{2}, \quad (19)$$

где h_0 – высота столба воды в дренах ряда (от подошвы пласта), м.

Дебит совершенных вертикальных дрен при их работе в безнапорных условиях

и в установившемся режиме определяется по формуле А.В. Романова [12]:

$$Q = \frac{\pi k (2H_s - S) S}{\ln \frac{\sigma}{\pi r_c} + \frac{\pi R_1 R_2}{\sigma L}}. \quad (20)$$

Приток воды в совершенную вертикальную дренаю определяется по формуле:

$$Q^1 = \frac{Q}{\Phi_c}, \quad (21)$$

где Φ_c – фильтрационное сопротивление совершенной скважины, которое определяется по формуле:

$$\Phi_c = \frac{4\pi L_1 (L - L_1)}{2\sigma L} + 2 \ln \frac{2\sigma}{2\pi r_c}. \quad (22)$$

Результаты расчета понижения уровня грунтовых вод 20 вертикальными дренами представлены в таблице 2.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что коэффициент фильтрации (K) водоносного слоя грунта составил от 8,04 до 8,74 м/сут. Радиус кривой депрессии вертикальных дрен при расчете оказался в диапазоне от 101 до 190 м в зависимости от их глубины и фильтрационных свойств грунта. Минимальная глубина воды в вертикальных дренах была принята равной 0,75 м в соответствии с габаритами насосов. Высота вертикальных дрен была запроектирована в соответствии с гидрогеологическими условиями и рельефом местности и составила 6,51-12,77 м. Согласно расчету дебит вертикальных дрен оказался в пределах от 316,7 до 612,5 м³/сут., а приток воды в них составил от 67,7 до 154,3 м³/сут. При этом фильтрационные сопротивления совершенных дрен составили от 3,97 до 4,68, а несовершенных дрен – 4,47.

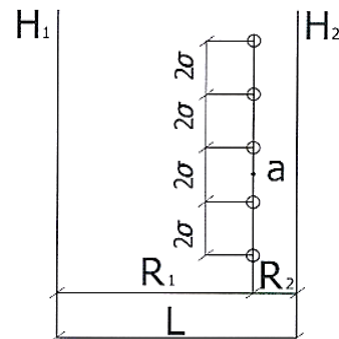


Рис. 4. Схема к расчету однолинейного вертикального дренажа при заданных напорах на границе (в плане)

Fig. 4. Scheme for calculating single-line vertical drainage at given pressures on the border (in plan)

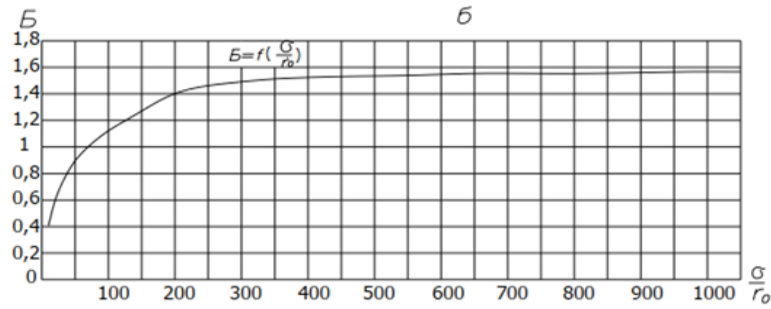


Рис. 5. График для определения величины Б
Fig. 5. Graph for determining the value of B

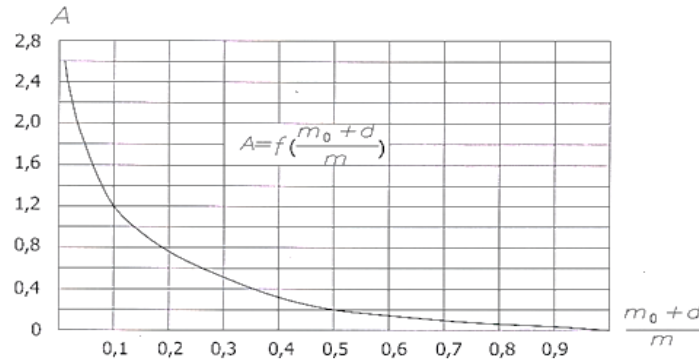


Рис. 6. График для определения величины А:
D – диаметр дрена
Fig. 6. Graph for determining the value of A:
D – diameter of drains

Таблица 2. Результаты расчета вертикального дренажа
Table 2. Results of calculation of vertical drainage

№ Скв. № Well	k, м/сут k, m / day	R, м R, m	H ₀ , м H ₀ , m	Глубина скважин-дрены, м Well depth-drains, m	Дебит скв.-дрены, м ³ /сут Well flow rate-drains, m ³ / day	Приток воды в скв.-дрены, м ³ /сут Water inflow into wells-drains, m ³ / day	Фильтрац. сопротивл. совещр. дрены Filtration resistance perfect drains
1	8,74	190	0,75	12	572	128	-
2	8,74	190	0,75	12,77	572	128	-
3	8,74	190	0,75	11,9	572	128	-
4	8,6	143	0,75	9,3	612,5	154,3	3,97
5	8,6	143	0,75	9,38	612,5	154,3	3,97
6	8,6	143	0,75	8,54	612,5	154,3	3,97
7	8,04	101	0,75	6,51	316,7	67,7	4,68
8	8,04	101	0,75	7,6	316,7	67,7	4,68
9	8,04	101	0,75	12,78	316,7	67,7	4,68
10	8,37	126	0,75	11,9	464,1	116,9	3,97
11	8,04	101	0,75	10,8	316,7	67,7	4,68
12	8,04	101	0,75	10,8	316,7	67,7	4,68
13	8,04	101	0,75	6,6	316,7	67,7	4,68
14	8,04	101	0,75	8,4	316,7	67,7	4,68
15	8,37	126	0,75	10,19	464,1	116,9	3,97
16	8,37	126	0,75	10,02	464,1	116,9	3,97
17	8,04	101	0,75	8,87	316,7	67,7	4,68
18	8,04	101	0,75	6,6	316,7	67,7	4,68
19	8,37	126	0,75	7,5	464,1	116,9	3,97
20	8,6	143	0,75	12,6	612,5	154,3	3,97
Сумма						2078,3	

Вертикальные дренажи работают совместно с насосом. Запроектирован один рабочий насос, другой является запасным.

Подбор насосов вертикального дренажа осуществляется на основе определения суммарного объема откачиваемой жидкости за один цикл и цикла откачки-наполнения.

Рабочий объем скважины – дренажи, л:

$$W_1 = Sh = \pi \cdot r^2 h. \quad (23)$$

Время откачки воды из рабочего объема, с:

$$t_{\text{откачки}} = \frac{W}{Q_{\text{нс}}}, \quad (24)$$

где $Q_{\text{нс}}$ – производительность насоса л/с.

Приток воды в скважину-дрену за время откачки, л:

$$W_2 = qt, \quad (25)$$

где q – приток воды в скважину-дрену, л/с.

Суммарный объем откачиваемой жидкости за один цикл: $W = W_1 + W_2$:

$$t_{\text{наполнения}} = \frac{W_1}{Q_{\text{нс}}}. \quad (26)$$

Время цикла откачки-наполнения составляет, с:

$$t = t_{\text{наполнения}} + t_{\text{откачки}}. \quad (27)$$

Количество включений-выключений насоса в 1 ч:

$$N = \frac{60}{t(\text{в мин})}. \quad (28)$$

Оптимальное количество включений-выключений насоса в 1 ч составляет от 3 до 6.

Результаты расчетов по подбору насосов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Подбор насосов вертикального дренажа
Table 3. Selection of pumps of vertical drainage

№ вертикальных дренажей Number of vertical drains	Рабочий объем скважины – дренажи $W_1, \text{м}^3$ The working volume of the well is drains W_1, m^3	Время откачки $t_{\text{откачки}}, \text{с}$ Pumping time, s	Приток воды в дрену $q, \text{л/с}$ Inflow of water into the drain $q, \text{l/s}$	Объем воды в дренаже за время откачки $W_2, \text{л}$ The volume of water in the drain during pumping, W_2, l	Суммарный объем откачиваемой жидкости за один цикл $W, \text{л}$ The total volume of pumped liquid in one cycle W, l	Время откачки $t_{\text{откачки}}, \text{с}$ Pumping time $t_{\text{pumping}}, \text{s}$	Время наполнения $t_{\text{наполнения}}, \text{с}$ Filling time $t_{\text{filling}}, \text{s}$	Время цикла откачки-наполнения $t, \text{с}$ Pumping-filling cycle time t, s	Время цикла откачки-наполнения $t, \text{мин}$ Pumping-filling cycle time t, min	Количество включений-выключений насосов час Number of pump on-offs per hour
1	1,96	392,50	1,14	445,95	2408,45	481,69	345,46	827,15	13,79	4,35
2			0,97	381,43	2343,93	468,79	403,89	872,67	14,54	4,13
3			0,75	294,94	2257,44	451,49	522,33	973,81	16,23	3,70
4			0,75	294,94	2257,44	451,49	522,33	973,81	16,23	3,70
5			1,09	426,47	2388,97	477,79	361,24	839,03	13,98	4,29
6			0,82	322,82	2285,32	457,06	477,22	934,28	15,57	3,85
7			0,41	160,82	2123,32	424,66	957,91	1382,58	23,04	2,60
8			0,38	147,49	2109,99	422	1044,53	1466,53	24,44	2,45
9			0,31	122,72	2085,22	417,04	1255,3	1672,35	27,87	2,15
10			0,47	185,99	2148,49	429,7	828,3	1258	20,97	2,86
11			0,31	122,72	2085,22	417,04	1255,3	1672,35	27,87	2,15
12			0,34	134,14	2096,64	419,33	1148,49	1567,82	26,13	2,30
13			0,41	160,82	2123,32	424,66	957,91	1382,58	23,04	2,60
14			0,41	160,82	2123,32	424,66	957,91	1382,58	23,04	2,60
15			0,63	247,11	2209,61	441,92	623,43	1065,35	17,76	3,38
16			0,63	247,11	2209,61	441,92	623,43	1065,35	17,76	3,38
17			0,48	187,48	2149,98	430	821,71	1251,7	20,86	2,88
18			0,41	160,54	2123,04	424,61	959,6	1384,21	23,07	2,60
19			0,59	233,01	2195,51	439,1	661,15	1100,25	18,34	3,27
20			0,84	328,38	2290,88	458,18	469,13	927,31	15,46	3,88

По напору и расходу воды были подобраны данные марки насосов:

Grundfos AP12.40.08A3 для следующих номеров вертикальных дренажей 1-6, 10, 20;

Grundfos AP12.40.06A3 – соответственно 8, 9, 11, 12, 15-17, 19;

Grundfos AP12.40.04A3 – соответственно 7, 13, 14, 18.

Выводы

Анализ открытых источников показал, что для рассматриваемых условий отсутствуют необходимая конструкция дренажа, способ его строительства и метод расчета. Поэтому была разработана конструкция вертикального дренажа и обоснован метод расчета, необходимые для

нормальной работы музейного комплекса «Куликово поле».

Предлагаемая конструкция дренажа, способ его строительства (получен патент на изобретение RU2415998 C1) и метод расчета апробированы при осушении подвальных помещений глубокого заложения музейного комплекса «Куликово поле». Функционирование без сбоя (2017-2024 гг.) данного вертикального дренажа доказывает его работоспособность и правильность предложенного технического решения.

Организациям по проектированию дренажных систем рекомендуется использовать разработанную авторами конструкцию дренажа, способ его строительства и метод расчета при осушении фундаментов зданий и сооружений глубокого заложения.

Список использованных источников

1. Колевтинов Д.С. Обзор трансформации ландшафтов государственного природно-исторического музея-заповедника «Куликово Поле» / Огородников С.С., Мельникова А.А., Борзилов К.В. // Молодой ученый. 2020. № 3 (293). С. 72-74. URL: <https://moluch.ru/archive/293/66450/> (дата обращения: 02.07.2023).

2. Пугин К.Г., Елькин А.В. Оценка геоэкологической безопасности дренажных систем и геоматериалов из пластика // Управление техносферой. 2023. Т. 6, № 4. С. 536-553.

3. Патент № 2640600 C1. Российская Федерация, МПК E02D31/02. Пристенный дренаж / А.Л. Невзоров, А.В. Никитин, О.М. Заборская; Заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ). Заявка № 2016144204. Заявл. 10.11.2016; Опубл. 10.01.2018.

4. Патент на полезную модель № 178378 U1. Российская Федерация, МПК E02B11/00. Вертикальный дренаж / П.С. Пинчук, А.В. Паштыков, Е.П. Пинчук; Заяв. ООО «СибТрансСтрой». Заявка № 2017121087. Заявл. 15.06.2017; Опубл. 02.04.2018.

5. Патент № 2718041 C2. Российская Федерация, МПК E01C11/22, E03F 3/04. Устройство поверхностного дренажа / А. Майнке, Р. Ириг; Заяв. АКО ЗЕВЕРИН АЛЬМАНН ГМБХ УНД КО КОММАНДИТГЕЗЕЛЬШАФТ (DE). Заявка № 2018130012. Заявл. 20.01.2017; Опубл. 30.03.2020.

6. Абдрахманов Р.Ф., Полева А.О. Защита подземных вод от негативного воздействия полигона токсичных отходов // Геологический вестник. 2023. № 3. С. 130-140.

7. Патент № 2415998 C1. Российская Федерация, МПК E02B11/00. Способ строительства вертикального дренажа / В.В. Пчёлкин, В.И. Сметанин; Заявитель ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет природообустройства» (МГУП). Заявка № 2009144896/21; Заявл. 04.12.2009; Опубл. 10.04.2011.

8. Мелиорация земель. Учебник. 2-е изд., испр. и доп. / Голованов А.И., Айдаров И.П., Григоров М.С. и др. СПб.: Лань, 2015. 832 с.

References

1. Koletvinov D.S. Review of the transformation of the landscapes of the state natural and historical museum-reserve Kulikovo Pole / D.S. Koletvinov, S.S. Ogorodnikov, A.A. Melnikova, K.V. Borzilov // Young scientist. 2020. № 3 (293). P. 72-74. URL: <https://moluch.ru/archive/293/66450/> (accessed: 02.07.2023).

2. Pugin K.G. Assessment of geoeological safety of drainage systems and geomaterials from plastics / K.G. Pugin, A.V. Elkin // Technosphere management. 2023. V. 6, No 4. P. 536-553.

3. Patent No 2640600 C1 Russian Federation, IPC E02D31/02. Wall drainage / A.L. Nevzorov, A.V. Nikitin, O.M. Zaborskaya; applicant: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov" (NArFU). – Application No 2016144204: application 10.11.2016; publ. 10.01.2018.

4. Utility model patent No 178378 U1 Russian Federation, IPC E02B11/00. Vertical drainage / P.S. Pinchuk, A.V. Pashtykov, E.P. Pinchuk; the applicant is SibTransStroy LLC. Application No 2017121087: application. 15.06.2017; publ. 02.04.2018.

5. Patent No 2718041 C2 Russian Federation, IPC E01C11/22, E03F 3/04. Arrangement of surface drainage / A. Meinke, R. Irig; Applicant ACO SEVERIN AHLMN GMBH UND KO KOMMANDITGESELLSCHAFT (DE) – Application No 2018130012: Application. 20.01.2017 publ. 30.03.2020.

6. Abdrakhmanov R.F., Poleva A.O. Protection of underground waters from the negative impact of the toxic waste landfill]. 2023. № 3. P. 130-140.

7. Patent No 2415998 C1 Russian Federation, IPC E02B11/00. Method of construction of vertical drainage / V.V. Pchelkin, V.I. Smetanin; applicant: Moscow State University of Environmental Engineering. Application No 2009144896/21: application. 04.12.2009: publ. 10.04.2011.

8. Land reclamation: a textbook / A.I. Golovanov, I.P. Aidarov, M.S. Grigorov [and others]. 2nd edition, corrected and additional. St. Petersburg, Lan Publ., 2015. 832 p.

9. Abramov S.K. Underground drainage in industrial and urban construction. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1967. 240 p.

9. **Абрамов С.К.** Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве: М.: Госстройиздат, 1967. 240 с.

10. **Васильев С.В., Глейзер Б.А., Веригин Н.Н.** Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем. / Под ред. д-ра техн. наук проф. Н.Н. Веригина. М.: Колос, 1970. 440 с.

11. **Пчёлкин В.В.** Осушение земель поселений: учебное пособие. М.: «Спутник+», 2021. 178 с.

12. **Романов А.В.** Приток воды к водозаборам подземных вод и дренам // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Сборник статей. М.: Государственное изд-во по строительству и архитектуре, 1952. С. 62-93.

Об авторах

Виктор Владимирович Пчёлкин, д-р техн. наук, профессор кафедры «Сельскохозяйственных мелиораций» <https://orcid.org/0000-0003-3625-9949>, SPIN-код: 6299-5005, AuthorID: 417238; 9766793@mail.ru

Кристина Сергеевна Семенова, канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидротехнических сооружений» <https://orcid.org/0000-0002-4446-4435>, SPIN-код: 1426-1908, AuthorID: 912890; kristi11.05.88@yandex.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Пчёлкин В.В., Семенова К.С. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Authors' contributions

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 11.03.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 01.06.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 01.06.2024

10. **Vasilyev S.V., Gleyzer B.A., Verigin N.N.** Methods of filtration calculations of hydro-reclamation systems / Edited by doctor of technical sciences N.N. Verigin. Moscow, Kolos Publ., 1970. 440 p.

11. **Pchelkin V.V.** Drainage of settlement lands: tutorial. M.: "Sputnik+", 2021. 178 p.

12. **Romanov A.V.** Water inflow to the water intakes of underground waters and drains / In the collection Issues of filtration calculations of hydraulic structures. Collection of articles. Moscow: State Publishing House for Construction and Architecture, 1952. P. 62-93.

About the authors

Victor V. Pchelkin, DSc (Eng), professor of the department "Agricultural land reclamations"; <https://orcid.org/0000-0003-3625-9949>, SPIN-code: 6299-5005, AuthorID: 417238; 9766793@mail.ru

Cristina S. Semenova, CSc (Eng), associate professor of the department "Hydro technical structures" <https://orcid.org/0000-0002-4446-4435>, SPIN-code: 1426-1908, AuthorID: 912890; kris-ti11.05.88@yandex.ru

Pchelkin V.V., Semenova K.S. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-44-51>

УДК 631.879:631.413



РОЛЬ БИОМЕЛИОРАНТОВ В СНИЖЕНИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ

Исмаил Хеба^{1✉}, В.К. Хлюстов², Ю.Г. Безбородов²¹ Сирийская Арабская Республика² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Исследование направлено на оценку влияния биомелиорантов на электропроводность и засоленность почвы в аридных условиях Сирийской Арабской Республики. Полевые опыты проводились с использованием компоста, биопрепаратов на основе бактерий вида *Bacillus* и их комбинации. Электропроводность измерялась на четырех глубинах: 0-25 см, 26-50 см, 51-75 см и 76-100 см. Методика исследований включала в себя использование графитовых электродных ячеек и кондуктометра, калиброванного по стандартным растворам хлорида калия (KCl). Образцы почвы отбирались с различных глубин, сушились при температуре 105°C, просеивались через сито с диаметром отверстий 2 мм, смешивались с дистиллированной водой в соотношении 1:2, перемешивались и выдерживались в течение 24 ч. После этого проводились 3 измерения электропроводности для каждого образца. Результаты показали значительное снижение электропроводности почвы при применении биомелиорантов, особенно на глубине 0-25 см. Двухфакторный дисперсионный анализ и тест Тьюки подтвердили статистически значимые различия между вариантами опыта. Вариант с комбинацией компоста и биопрепаратов продемонстрировал наибольшую эффективность в снижении электропроводности. Эти данные свидетельствуют о высокой эффективности биомелиорантов для улучшения почвенных условий и снижения засоленности почвы, что особенно важно для устойчивого сельского хозяйства в аридных зонах. Введение биомелиорантов способствует уменьшению содержания растворимых солей и улучшению структуры почвы, что в итоге может повысить урожайность сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: биомелиоранты, электропроводность почвы, засоленность почвы, компост, биопрепарат, аридные условия, Сирийская Арабская Республика, двухфакторный дисперсионный анализ, тест Тьюки

Формат цитирования: Хеба И., Хлюстов В.К., Безбородов Ю.Г. Роль биомелиорантов в снижении электропроводности и засоленности почв // Природообустройство. 2024. № 4. С. 44-51. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-44-51>

Original article

THE ROLE OF BIOMELIORANTS IN REDUCING SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SALINITY

Ismail Heba^{1✉}, V.K. Khlyustov², Yu.G. Bezborodov²¹ Syrian Arab Republic² Russian state agrarian university – Moscow Timiryazev agricultural academy, Institute of land reclamation, water management and construction named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Timiryazevskaya str., 49, Russia

Abstract. This study aimed to evaluate the impact of bioremediants on soil electrical conductivity and salinity under the arid conditions of the Syrian Arab Republic. Field experiments were conducted using compost, biopreparations based on *Bacillus* bacteria, and their combination. Electrical conductivity was measured at four depths: 0-25 cm, 26-50 cm, 51-75 cm and 76-100 cm. The methodology included the use of graphite electrode cells and a conductometer calibrated with standard potassium chloride (KCl) solutions. Soil samples were collected from various depths, dried at 105°C, sieved through a 2 mm sieve, mixed with distilled water in a 1:2 ratio, stirred, and left for 24 hours. Three measurements of electrical conductivity were then taken for each sample. The results showed a significant reduction in soil electrical conductivity with the application of bioremediants particularly at the 0-25 cm depth. Two-factor ANOVA and Tukey's test confirmed statistically significant differences between the experimental treatments.

The combination of compost and biopreparations demonstrated the greatest effectiveness in reducing electrical conductivity. These findings indicate the high efficiency of bioremediants in improving soil conditions and reducing salinity, which is crucial for sustainable agriculture in arid regions. The introduction of bioremediants helped reduce the content of soluble salts and improve soil structure, ultimately leading to increased crop yields.

Keywords: bioremediants, soil electrical conductivity, soil salinity, compost, biopreparation, arid conditions, Syrian Arab Republic, two-factor ANOVA

Format of citation: Heba I., Khlyusov V.R., Bezborodov Yu.G. The role of bioremediants in reducing soil electrical conductivity and salinity // Prirodoobustrojstvo. 2024. № 4. P. 44-51. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-44-51>

Введение. Засоленность почв представляет собой серьезную проблему для сельского хозяйства, особенно в аридных регионах – таких, как Сирийская Арабская Республика. Высокое содержание растворимых солей в почве снижает ее плодородие и ухудшает условия для роста растений. Применение биомелиорантов – таких, как компост и биопрепараты, может существенно улучшить состояние почв за счет снижения электропроводности и, соответственно, засоленности. Актуальность исследований заключается в необходимости поиска эффективных методов улучшения почвенных условий в аридных зонах для обеспечения устойчивого сельского хозяйства. А.И. Поздняков [1] описывает методику измерения электропроводности почвенных растворов с использованием электродов. Эта методика позволяет точно определять содержание растворимых солей в почве, что является важным показателем ее плодородия и степени засоленности.

Р.Ф. Байбеков с соавт. [2] использовал метод вертикального электрического зондирования для оценки деградации почв. Эта методика позволяет проводить быстрый и эффективный мониторинг состояния почвы в полевых условиях [3]. F. Slinker, G. Miller [4] рассматривают использование временной доменной рефлектометрии (TDR) для измерения электропроводности почвы. TDR-методика предоставляет точные данные о состоянии почвы без необходимости извлечения почвенного раствора, что делает ее удобной для полевых условий. M.R. Carter, E.G. Gregorich [5] описывают использование многоэлектродных систем для измерения объемной электропроводности почвы. Эта методика позволяет получать пространственные распределения электропроводности, что полезно для выявления неоднородностей в почвенном профиле. P. Smith, C. Fang, J. Dawson [6] описывают влияние применения биоугля на свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур. Авторы демонстрируют положительное влияние биоугля на улучшение структуры почвы и снижение ее электропроводности. D.L. Jones, V.B. Willett [7]

приводят экспериментальную оценку различных методов определения органического вещества и микробной биомассы в почвах. Авторы сравнивают эффективность этих методов для различных типов почв и дают рекомендации по их применению.

Книга D. Hillel [8] представляет собой руководство по физике почв и включает в себя разделы по водно-физическим свойствам и электропроводности почв. Автор рассматривает как фундаментальные аспекты, так и практические приложения для улучшения состояния почв. N.C. Brady, R.R. Weil в своем учебном пособии [9] охватывают широкий спектр тем, связанных с почвенными науками, включая химические и физические свойства почв, их влияние на электропроводность и методы улучшения состояния почв.

Цель исследований: изучение влияния различных биомелиорантов на электропроводность почв на разных глубинах с целью снижения засоленности почв в аридных условиях Сирийской Арабской Республики.

Материалы и методы исследований. В исследованиях использована методика [1], предназначенная для измерения электропроводности почвенных растворов с использованием электродных ячеек. Этот метод позволяет оценить степень засоленности почвы и ее способность проводить электрический ток. Для измерения электропроводности использовались специальные ячейки с электродами из инертного материала – графита, а также кондуктометр, откалиброванный по растворам известной концентрации солей. Дистиллированная вода использовалась для приготовления почвенных суспензий, которые смешивались в стаканах и перемешивались с помощью мешалки. Точные объемы измерялись с использованием пипеток и мерных цилиндров.

Образцы почвы отбирались с разных глубин (0-25 см, 26-50 см, 51-75 см, 76-100 см) в количестве, достаточном для анализа. Образцы высушивались до постоянной массы при температуре 105°C, чтобы удалить влагу, и просеивались

через сито с диаметром отверстий 2 мм для удаления крупных частиц и органических остатков.

Для каждого образца почвы бралась навеска массой 10 г, к которой добавлялась дистиллированная вода в соотношении 1:2 (10 г почвы + 20 мл воды). Суспензия тщательно перемешивалась с использованием мешалки в течение 5 мин для равномерного распределения солей в растворе, затем оставлялась на 24 ч при комнатной температуре для достижения равновесия.

Кондуктометр калибровался с использованием стандартных растворов хлорида калия (KCl) с известной электропроводностью. Электродная ячейка помещалась в почвенную суспензию, и кондуктометром измерялась электропроводность раствора в десисименсах на 1 м (dS/m). Для достижения требуемой точности проводились 3-кратные измерения для каждого образца, после чего рассчитывалось среднее значение электропроводности. При необходимости значения корректировались с учетом температуры измерений (стандартно – 25°C).

Полученные данные интерпретировались с учетом стандартов и норм по электропроводности для различных типов почв и условий, и результаты сравнивались с контрольными значениями для оценки эффективности применения биомелиорантов.

Схема полевого опыта. Исследования проводились в условиях полевого эксперимента в аридной зоне Сирии. Были организованы следующие варианты внесения в почву биологических мелиорантов: контроль (без внесения мелиорантов); компост из люцерны;

биопрепараты на основе бактерий вида *Bacillus*; компост + биопрепарат. Схема полевого опыта представлена рандомизированным размещением вариантов и контроля в 3-кратной повторности. Данные о электропроводности по вариантам опыта на разной глубине почвы представлены в таблице 1.

Представленные на рисунках 1, 2 ящики с усами отображают распределение электропроводности почв на различных глубинах для каждого варианта опыта. Эти графики позволяют визуально оценить медиану, интерквартильный размах и наличие выбросов в данных по электропроводности.

В целом графики по вариантам опыта характеризуются следующим образом:

1. В варианте «Контроль» электропроводность имеет тенденцию уменьшения с глубиной. Самые высокие значения электропроводности наблюдаются на глубине 0-25 см.

2. В варианте «Компост» – похожая тенденция уменьшения электропроводности с увеличением глубины. Значения электропроводности ниже, чем на контроле.

3. В варианте «Биопрепарат» электропроводность также снижается с глубиной, но менее выражено по сравнению с контролем и компостом. На глубине 76-100 см наблюдаются самые низкие значения электропроводности.

4. В варианте «Компост + биопрепарат» – самые низкие значения электропроводности. Уменьшение электропроводности с глубиной менее выражено, чем в других вариантах.

Заключения свидетельствуют о том, что различные виды биомелиоранта влияют

Таблица 1. Данные электропроводности почвы по вариантам опыта на разной глубине профиля почвы

Table 1. Data on the electrical conductivity of the soil according to the experimental variants at different depths of the soil profile

Глубина слоя почвы, см <i>Depth of soil layer, cm</i>	Варианты опыта / <i>Variants of the experiment</i>			
	Контроль <i>control</i>	Компост <i>compost</i>	Биопрепарат <i>biopreparation</i>	компост + биопрепарат <i>compost + biopreparation</i>
0-25	8,19	7,43	6,18	5,93
0-25	8,21	7,47	6,20	5,57
0-25	8,23	7,45	6,22	5,31
26-50	7,66	6,93	6,15	5,95
26-50	7,63	6,96	6,20	5,87
26-50	7,66	6,96	6,16	5,88
51-75	6,75	6,18	5,58	5,60
51-75	6,74	6,20	5,60	5,76
51-75	6,76	6,19	5,59	5,41
76-100	6,17	5,71	5,22	5,10
76-100	6,19	5,67	5,22	5,33
76-100	6,25	5,73	5,19	5,22

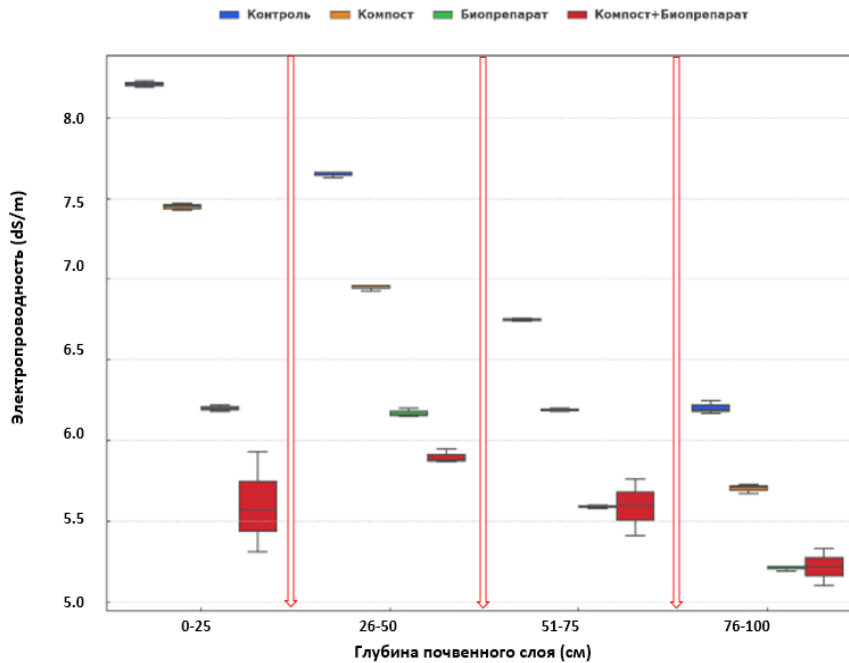


Рис. 1. Ящики с усами распределения электропроводности по вариантам опыта и глубине забора образцов почвы

Fig. 1. Boxes with whiskers for the distribution of electrical conductivity according to the experimental variants and the depth of soil sampling

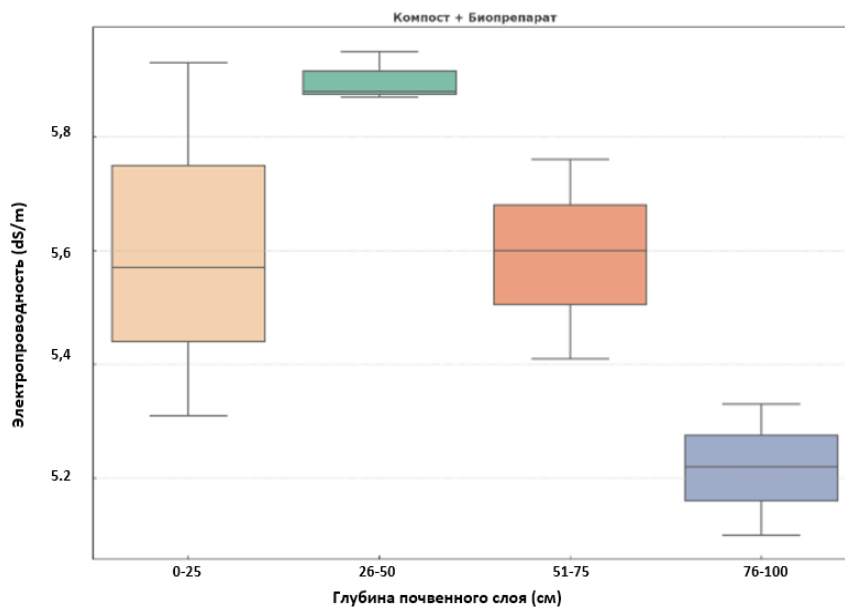


Рис. 2. Ящики с усами распределения электропроводности по лучшему варианту опыта «Компост + биопрепарат» на разной глубине забора образцов почвы

Fig. 2. Boxes with whiskers for the distribution of electrical conductivity according to the best version of the experiment "Compost + biopreparation" at different depths of soil sampling

на электропроводность, что в свою очередь связано с изменением засоленности и других физико-химических свойств почвы.

Результаты и их обсуждение. Данные были проанализированы с использованием двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями для выявления значимости влияния факторов «Вариант опыта» и «Глубина взятия образца» (табл. 2).

Результаты дисперсионного анализа (табл. 2) показали значительное влияние как типа мелиоранта, так и глубины забора образца на электропроводность почвы ($p < 0,05$). Взаимодействие между этими факторами также было статистически значимым. Во всех случаях F-критерий Фишера оказался больше теоретического на 1- и 5-процентном уровне значимости для соответствующего числа степеней свободы.

Таблица 2. Результат двухфакторного дисперсионного анализа оценки влияния на электропроводность биомелиорантов и глубины почвенного

Table 2. Result of two-factor ANOVA analysis assessment of the effect on electrical conductivity of biomeriorants and soil layer depth

Показатели <i>Indicators</i>	Контроль <i>Control</i>	Компост <i>Compost</i>	Биопрепарат <i>Biopreparation</i>	Компост + биопрепарат <i>Compost + biopreparation</i>	Итого <i>Total</i>
Глубина 0-25 см / Depth 0-25 cm					
Повторности / <i>Repetitions</i>	3	3	3	3	12
Сумма / <i>Sum</i>	24,63	22,35	18,60	16,81	82,39
Среднее / <i>Average</i>	8,2100	7,4500	6,2000	5,6033	6,8658
Дисперсия / <i>Dispersion</i>	0,0004	0,0004	0,0004	0,0969	1,1593
Глубина 26-50 см / Depth 26-50 cm					
Повторности / <i>Repetitions</i>	3	3	3	3	12
Сумма / <i>Sum</i>	22,95	20,85	18,51	17,70	80,01
Среднее / <i>Average</i>	7,6500	6,9500	6,1700	5,9000	6,6675
Дисперсия / <i>Dispersion</i>	0,0003	0,0003	0,0007	0,0019	0,5138
Глубина 51-75 см / Depth 51-75 cm					
Повторности / <i>Repetitions</i>	3	3	3	3	12
Сумма / <i>Sum</i>	20,25	18,57	16,77	16,77	72,36
Среднее / <i>Average</i>	6,7500	6,1900	5,5900	5,5900	6,0300
Дисперсия / <i>Dispersion</i>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0307	0,2596
Глубина 76-100 см / Depth 76-100 cm					
Повторности / <i>Repetitions</i>	3	3	3	3	12
Сумма / <i>Sum</i>	18,61	17,11	15,63	15,65	67
Среднее / <i>Average</i>	6,2033	5,7033	5,2100	5,2167	5,5833
Дисперсия / <i>Dispersion</i>	0,0017	0,0009	0,0003	0,0132	0,1864
Итого / Total					
Повторности / <i>Repetitions</i>	12	12	12	12	-
Сумма / <i>Sum</i>	86,44	78,88	69,51	66,93	-
Среднее / <i>Average</i>	7,2033	6,5733	5,7925	5,5775	-
Дисперсия / <i>Dispersion</i>	0,6600	0,4951	0,1881	0,0901	-
Дисперсионный анализ / Dispersion (ANOVA) analysis					
Источник вариации <i>Source of variation</i>	SS	df	MS	F_{расч.}	F_{05/01}
Вариант опыта <i>Variant of the experiment</i>	12,4923	3	4,1641	448,6	2,90/4,49
Глубина, см / Depth, cm	20,0349	3	6,6783	719,4	2,90/4,49
Взаимодействие / Interaction	2,9774	9	0,3308	35,6	2,19/2,98
Внутри / Inside	0,2971	32	MSE = 0,0093		
Итого / Total	35,8017	47			

После дисперсионного анализа и доказательства статистических различий между вариантами опыта и глубиной взятия образцов почвы было произведено парное сравнение средних значений. Для этого был использован тест Тьюки – статистический метод для проведения множественных сравнений средних значений. Основная цель теста Тьюки – выявить, какие конкретные варианты отличаются друг от друга, обеспечивая контроль уровня ошибки при множественных сравнениях (табл. 3).

Шаги для расчета HSD (Tukey's Honest Significant Difference – точная и необходимая разница (ТНР) по Тьюки):

Расчёт HSD производится по формуле:

$$HSD = Q \times \sqrt{\frac{MSE}{n}}$$

где: Q – критическое значение распределения Тьюки, которое выбирается из таблицы стандартных значений коэффициента Q для 5%-ного уровня значимости соответствующего числа вариантов опыта (k) и числа степеней свободы для внутригрупповых ошибок (df). Для k = 4 и степени свободы внутри групп df = 32 коэффициент Q имеет значение 3,8; n – число повторности в вариантах опыта; MSE – значение среднеквадратического отклонения составляет 0,0093 и берется из итоговых результатов дисперсионного анализа (табл. 2).

Таблица 3. Результаты множественных сравнений электропроводности по вариантам опыта и глубинам профиля почв тестом Тьюки
 Table 3. Results of multiple comparisons of electrical conductivity by experimental variants and depths of soil profile by the Tukey test

Сравниваемые варианты опыта Comparison of the experiment options		Разница средних Difference of averages	HSD (ТНР)	р-значение Accurate necessary difference of Turkey	Различия Differences
Глубина 0-25 см					
Контроль / Control	Компост / Compost	0,76	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Контроль / Control	Биопрепарат / Biopreparation	2,01	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Контроль / Control	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	2,61	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Компост / Compost	Биопрепарат / Biopreparation	1,25	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Компост / Compost	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	1,85	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Биопрепарат Biopreparation	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	0,60	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Глубина 26-50 см					
Контроль / Control	Компост / Compost	0,70	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Контроль / Control	Биопрепарат / Biopreparation	1,48	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Контроль / Control	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	1,75	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Компост / Compost	Биопрепарат / Biopreparation	0,78	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Компост / Compost	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	1,05	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Биопрепарат Biopreparation	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	0,27	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Глубина 51-75 см					
Контроль / Control	Компост / Compost	0,56	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Контроль / Control	Биопрепарат / Biopreparation	1,16	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Контроль / Control	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	1,16	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Компост / Compost	Биопрепарат / Biopreparation	0,60	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Компост / Compost	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	0,60	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Биопрепарат Biopreparation	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	0,00	1,000	>0,05	Нет
Глубина 75-100 см					
Контроль / Control	Компост / Compost	0,50	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Контроль / Control	Биопрепарат / Biopreparation	0,99	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Контроль / Control	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	0,99	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Компост / Compost	Биопрепарат / Biopreparation	0,49	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Компост / Compost	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	0,49	0,211	<0,05	ЕСТЬ
Биопрепарат Biopreparation	Компост + биопрепарат Compost + biopreparation	0,00	1,000	>0,05	Нет

При всех указанных условиях значение точной и необходимой разницы по Тьюки (*HSD*) рассчитывается по формуле:

$$HSD = 3,8 \times \sqrt{\frac{0,00928}{3}} = 0,211.$$

Таблица 3 включает пары сравниваемых вариантов, разницу средних значений по вариантам опыта, которая оценивается с критическим

значением *HSD*. Если разница средних значений между вариантами опыта больше критического ($HSD = 0,211$), то различия считаются значимыми на 5-ти процентном уровне значимости ($p < 0,05$).

Подтверждением существенности различий в электропроводности между вариантами опыта и глубиной почвенного профиля служит столбчатая диаграмма (рис. 3).

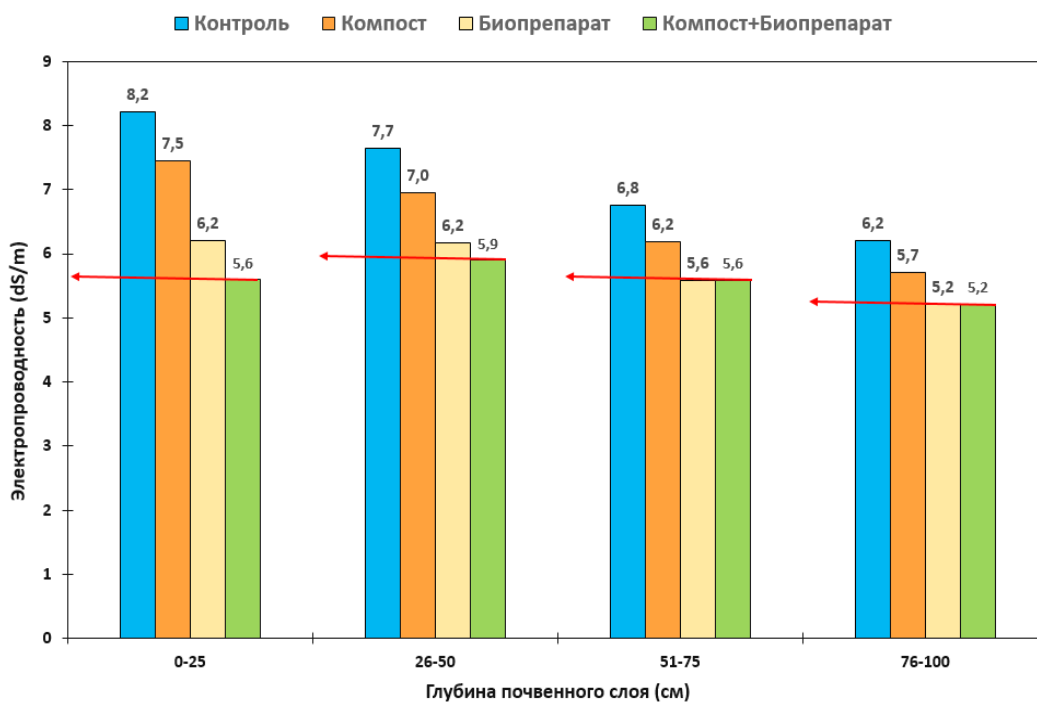


Рис. 3. Изменения параметров электропроводности по вариантам опыта и с глубиной профиля почв

Fig. 3. Changes of electrical conductivity parameters by the experiment variants and depths of soil profile

Наряду со статистической оценкой электропроводности по вариантам опыта с учётом глубины её измерения следует указать на уже известную взаимосвязь электропроводности и водно-физических и химических свойств почв. Так, электропроводность почвы тесно связана с ее водно-физическими и химическими свойствами. При этом важно учитывать следующие явления и параметры:

1. Влажность почвы влияет на электропроводность, так как вода в почве действует как растворитель для солей, повышая проводимость.

2. Гранулометрический состав и плотность почвы влияют на пористость, и соответственно – на движение воды и растворимых веществ.

3. Высокое содержание органического вещества может связывать соли, влияя на электропроводность.

4. Кислотность почвы влияет на растворимость различных солей, что в свою очередь изменяет ее электропроводность.

Также следует учитывать, что засоленность почвы определяется концентрацией растворимых солей, которые могут существенно влиять на электропроводность. Такие соли, как хлориды, сульфаты, карбонаты и бикарбонаты натрия, кальция и магния, увеличивают электропроводность почвы. Таким образом, существует прямая корреляционная связь между содержанием солей и электропроводностью: чем больше концентрация солей, тем выше электропроводность.

Применение биомелиорантов привело к значительному снижению электропроводности почвы, что свидетельствует о снижении содержания растворимых солей. Это особенно важно для верхнего слоя почвы, который наиболее подвержен засолению и наиболее важен для корневой системы растений. Компост и биопрепараты могут способствовать улучшению структуры почвы и увеличению содержания органического вещества, что в свою очередь уменьшает концентрацию солей в почвенном растворе.

Результаты исследований особенно важны для аридных условий Сирийской Арабской Республики, где проблема засоленности почв является сверхактуальной. Введение биомелиорантов может существенно улучшить состояние почв и способствовать устойчивости сельского хозяйства в регионе.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности биомелиорантов для улучшения почвенных условий и снижения засоленности, что может способствовать повышению урожайности сельскохозяйственных культур.

Выводы

1. Применение биомелиорантов значительно снижает электропроводность почвы.
2. Наибольшее снижение электропроводности наблюдается в верхнем слое почвы (0-25 см).
3. Комбинированное применение компоста и биопрепарата оказывает наибольший эффект влияния на снижение электропроводности.

Список использованных источников

1. Поздняков А.И. Использование полевых электрофизических методов с целью улучшения методики исследования почв // Пленарные доклады Всероссийской конференции «Экспериментальная информация в почвоведении: теория и пути стандартизации». М.: МГУ, 2005. С. 67-72.
2. Байбеков Р.Ф. Оценка деградации почв с использованием метода вертикального электрического зондирования / Седых В.А., Савич В.И., Устюжанин А.А., Саидов А.К. // Плодородие. 2012. № 5. С. 24-26.
3. Безбородов Г.А., Безбородов А.Г., Безбородов Ю.Г. Совершенствование методики мониторинга солевого режима орошаемых земель // Мелиорация и водное хозяйство. 2008. № 6. С. 29-31.
4. Slanker F., Miller G. Use of Time Domain Reflectometry for Measuring Soil Conductivity // Soil Science Society of America Journal. 1976. Vol. 40, № 4. Pp. 498-502.
5. Carter M.R., Gregorich E.G. Multiple Electrode Systems for Soil Conductivity Measurement // Soil and Tillage Research. 1992. Vol. 24, Iss. 2. Pp. 137-145.
6. Smith P., Fang C., Dawson J. Impact of biochar application on soil properties and crop yield // Agronomy Journal. 2008. Vol. 100, № 3. Pp. 463-472.
7. Jones D.L., Willett V.B. Experimental evaluation of methods to determine soil organic matter and microbial biomass in a range of soil types // Soil Biology and Biochemistry. 2006. Vol. 38, Iss. 6. Pp. 1094-1103.
8. Hillel D. Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations // Academic Press. San Diego. 1998. Pp. 771.
9. Brady N.C., Weil R.R. The Nature and Properties of Soils // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2008. Pp. 975.

Об авторах

Исмаил Хеба, аспирантка кафедры землеустройства и лесоводства, ihiba873@gmail.com

Виталий Константинович Хлюстов, д-р с.-х. наук, профессор кафедры землеустройства и лесоводства; ORCID0000-0001-8323-5750, Scopus 57210104945, WOS Researcher ID: AAE-7093-2022, РИНЦ ID: 507286, vkhlyustov@rgau-msha.ru

Юрий Германович Безбородов, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой землеустройства и лесоводства; ORCID0000-0001-5293-2342, Scopus 6603491005, WOS Researcher ID: G-7544-2018, РИНЦ ID: 271273, ubezborodov@rhau-msha.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Хеба И., Хлюстов В.К., Безбородов Ю.Г. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Authors' contributions

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 16.05.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 25.06.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 25.06.2024

References

1. Pozdnyakov A.I. Use of field electro physical methods for the purpose of improving the methods of soil research // Plenary reports of the All-Russian conference "Experimental information in soil science: theory and ways of standardization. Moscow: Faculty of soil science of Moscow State University, 2005. P. 67-72.
2. Baybekov R.F. Assessment of soil degradation using the method of vertical electric sensing / Sedykh V.A., Savich V.I., Ustyuzhanin A.A., Saidov A.K. // Fertility. 2012. № 5. P. 24-26.
3. Bezborodov G.A. Improvement of the monitoring method of the salt regime of irrigated lands / G.A. Bezborodov, A.G. Bezborodov, Yu.G. Bezborodov // Land reclamation and water economy. 2008. № 6. P. 29-31.
4. Slanker F., Miller G. (1976). Use of Time Domain Reflectometry for Measuring Soil Conductivity. Soil Science Society of America Journal, 1976, Vol. 40, No. 4, pp. 498-502.
5. Carter M.R., Gregorich E.G. (1992). Multiple Electrode Systems for Soil Conductivity Measurement. Soil and Tillage Research, 1992, Vol. 24, Issue 2, pp. 137-145.
6. Smith P., Fang C., Dawson J. (2008). Impact of biochar application on soil properties and crop yield. Agronomy Journal, 2008, Vol. 100, No. 3, pp. 463-472.
7. Jones D.L., Willett V.B. (2006). Experimental evaluation of methods to determine soil organic matter and microbial biomass in a range of soil types. Soil Biology and Biochemistry, 2006, Vol. 38, Issue 6, pp. 1094-1103.
8. Hillel D. (1998). Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations. Academic Press, San Diego, 1998, pp. 771.
9. Brady N.C., Weil R.R. (2008). The Nature and Properties of Soils. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2008, pp. 975.

Information about the authors

Ismail Heba, post graduate student of the department of land management and forestry; ihiba873@gmail.com

Vitaliy K. Khlyustov, DSc (Agro), professor of the department of land management and forestry; ORCID0000-0001-8323-5750, Scopus 57210104945, WOS Researcher ID: AAE-7093-2022, RSCI ID: 507286, vkhlyustov@rgau-msha.ru

Yuriy G. Bezborodov, DSc (Eng), associate professor, head of the department of the department of land management and forestry; ORCID0000-0001-5293-2342, Scopus 6603491005, WOS Researcher ID: G-7544-2018, RSCI ID: 271273, ubezborodov@rhau-msha.ru

I. Heba, V.K. Khlyustov, Yu.G. Bezborodov carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-52-57>

УДК 631.623:626.861



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ МЕЛИОРАТИВНЫХ ОСУШИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

М.А. Карапетян[✉], С.К. Тойгамбаев, Х.А. Абдулмажидов

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

Аннотация. Цель экспериментальных исследований – моделирование откосов мелиоративных осушительных каналов под нагрузкой со стороны обслуживающих машин через гусеничное или пневмоколесное ходовые устройства для оценки устойчивости при разных углах заложения. В статье представлены результаты экспериментальных исследований устойчивости откосов мелиоративных каналов. Экспериментальные исследования проведены на Большом канале лаборатории дождевальных машин и гидропривода кафедры организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова. Работа мелиоративной осушительной системы сопровождается появлением наносов, заиления травянистой и кустарниковой растительности на дне и откосах канала. Для нормального функционирования мелиоративной осушительной системы необходимо поддерживать проектные размеры каналов в течение всего срока их эксплуатации. Для очистки осушительных каналов применяются специальные каналоочистительные машины периодического или непрерывного действия на гусеничном или пневмоколесном ходу, часто используются также общестроительные экскаваторы с уширенными ковшами. Работа всех перечисленных машин с большой эксплуатационной массой характеризуется особенностью, которая заключается в их передвижении в процессе очистки вдоль канала по участкам бермы, близким к бровке. Такая ситуация может приводить к нарушению устойчивости откосов, что в свою очередь нарушает пропускную способность русла канала и его проектные геометрические размеры. Исследования нарушений устойчивости откосов от нагрузок каналоочистительных машин позволяют правильно проектировать сечение канала и формировать технологию очистки.

Ключевые слова: устойчивость откосов, коэффициент заложения откосов, берма и бровка канала, распределенная нагрузка на берму, влажность грунтов, категория грунтов, пропускная способность канала, норма осушения, коэффициент запаса устойчивости откосов

Формат цитирования: Карапетян М.А., Тойгамбаев С.К., Абдулмажидов Х.А. Экспериментальные исследования устойчивости откосов мелиоративных осушительных каналов // Природообустройство. 2024. № 4. С. 52-57. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-52-57>

Original article

EXPERIMENTAL STUDIES OF SLOPE STABILITY OF RECLAMATION DRAINAGE CHANNELS

М.А. Karapetyan[✉], S.K. Toygambayev, Kh.A. Abdulmazhidov

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Pryanishnikova, 19, bldg. 28. Russia

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the stability of slopes of reclamation channels. Experimental studies were carried out on the Grand Channel of the Laboratory of Sprinkler Machines and Hydraulic Drive of the Department of Organization and Technologies of Irrigation and Reclamation and Construction Works of the Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov. The work of the reclamation drainage system is accompanied by the appearance of sediments, siltation of herbaceous and shrubby vegetation at the bottom and slopes of the channel. For the normal functioning of the reclamation drainage system, it is necessary to maintain the design dimensions of the channels during the entire period of their operation. To clean drainage channels, special channel cleaning machines of periodic or continuous action on caterpillar or pneumatic wheels are used, and general construction excavators with widened buckets are also often used. The operation of all these machines with a large operating weight has

a peculiarity, which consists in their movement in the process of cleaning along the channel along the berm sections close to the edge. Such a situation can lead to a violation of the stability of the slopes, which in turn disrupts the capacity of the channel bed and its design geometric dimensions. The study of slope instability from the loads of channel cleaning machines allows you to correctly design the channel section and form a cleaning technology.

Keywords: slope stability, slope formation coefficient, berm and channel edge, distributed load on the berm, soil moisture, soil category, channel capacity, drainage rate, slope stability factor

Format of citation: Karapetyan M.A., Toygambayev S.K., Abdulmashidov Kh.A. Experimental studies of slope stability of reclamation drainage channels // Prirodoobustrojstvo, 2024. № 4. P. 52-57. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-52-57>

Введение. Обеспечение устойчивости откосов мелиоративных осушительных каналов в процессе их эксплуатации является сложной задачей. Наряду с очисткой дна и прилегающих ко дну частей откосов от наносов, заилений, травянистой и кустарниковой растительности соблюдение устойчивости откосов – это наиболее распространенная составляющая полноценного функционирования элементов осушительной сети [1-4]. Проведение очистных работ на каналах с соблюдением устойчивости откосов связано с восстановлением проектных размеров каналов. Все машины, входящие в комплексы по обслуживанию, очистке и восстановлению русел каналов, обычно перемещаются по берме параллельно оси канала, создавая при этом условия для нарушения устойчивости откоса. Каналоочистители, используемые при этом по режиму работы, относятся к машинам непрерывного или периодического действия. Машины циклического действия обычно работают позиционно, создавая при этом большие статические нагрузки на бровке канала [5-8]. Если используется машина на гусеничном ходу, по всей ее длине по центрам крайних опорных катков возникает распределенная нагрузка [9, 10]. При колесной базе машины нагрузки на бровке имеют нагрузки по пятну контакта с поверхностью грунта [11, 12].

Цель исследований: моделирование откосов мелиоративных осушительных каналов под нагрузкой со стороны обслуживающих машин через гусеничное или пневмоколесное ходовые устройства для оценки устойчивости при разных углах заложения.

Материалы и методы исследований. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на Большом грунтовом канале на специально сформированном профиле канала (рис. 1) по правилам приближенного физического моделирования В.И. Баловнева [13, 14].

Для моделирования процесса нагружения кромки бермы через уширенную гусеницу базового трактора ВТГ-90 каналоочистителя принято

решение использовать швеллер № 14 с распределением нагрузок на полке, а для узких гусениц – с распределением нагрузок по ребру. Масштабный коэффициент в первом случае составляет 4,78, во втором случае – 6,5.

Задачи исследования:

1. Определить устойчивость откосов канала при их заложении в 54° , при наличии распределенных нагрузок по полке и ребру швеллера № 14 длиной 2,8 м на кромке бермы.

2. Определить устойчивость откоса канала при его заложении в 75° при наличии распределенных нагрузок по ребру швеллера № 14 длиной 2,8 м на кромке бермы.

3. Определить устойчивость откоса канала – вертикальная стенка (90°) при наличии распределенных нагрузок по полке швеллера № 14 длиной 2,8 м на кромке бермы.

В грунте Большого канала был сформирован трапецеидальный профиль осушительного канала длиной 3,0 м.

Согласно правилам приближенного физического моделирования линейные параметры модели при исследованиях задавались с учетом масштабного коэффициента. Угловые параметры принимались равными для природы и модели [15, 16]. Переход от силовых параметров модели к параметрам оригинала (природы) при приближенном моделировании рабочих процессов осуществлялся по формуле:

$$P_n = P_m i^n, \quad (1)$$

где P_m – усилия для модели, Н; P_n – усилия для природы, Н; i – масштабный коэффициент; n – показатель степени, зависящий от характера подобия объектов, определяемый экспериментально ($n = 2$ при мерзлых грунтах, $n = 3$ при талых грунтах).

Грунт исследуемого канала представлял собой суглинок с примесью песка и каменистых включений. Перед формированием профиля канала осуществляли увлажнение, разрыхление и уплотнение грунта. Влажность грунта составляла 18% при I-II категориях плотности по трудности разработки.

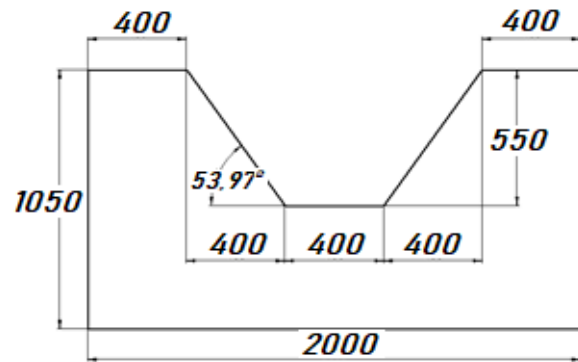


Рис. 1. Общий вид и размеры канала в поперечном сечении
Fig. 1. General view and dimensions of the channel in cross-section

План проведения работ включал в себя следующие условия исследований:

1. Определение устойчивости нагруженного левого откоса с заложением 54° .
2. Определение устойчивости нагруженного правого откоса с заложением 75° .
3. Определение устойчивости нагруженного левого откоса с заложением 90° .

Приближенное физическое моделирование нагрузок на берме со стороны гусеничного ходового устройства осуществлялось посредством швеллера № 14, ширина полки которого соответствует ширине гусеницы базового трактора с учетом масштабного коэффициента.

Результаты и их обсуждение. Проведенные опыты показали, что для первого случая с заложением откосов 54° коэффициент запаса устойчивости при соизмеримых нагрузках на модель оказался достаточным. Для второго случая при заложении откоса 75° в целом устойчивость соблюдается, но определены признаки его разрушения под данной нагрузкой. В третьем случае при угле заложения 90° откос с нагрузкой по полке швеллера на кромке бермы был полностью разрушен. Очевидно, что при данных нагрузках по ребру швеллера меньшей площади контакта с поверхностью кромки откос также будет разрушен.

Исследования показывают, что при расчете коэффициента устойчивости откосов необходимо учитывать не только геометрические размеры, силовые составляющие, но и наличие влаги между слоями грунтов, их категорию и степень влажности:

$$k_{уст} = \frac{M_{уд}}{M_{сд}} = \left(\sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=1}^n c_i \cdot \Delta l_i \right) / \sum_{i=1}^n T_i, \quad (2)$$

где $M_{уд}$ – момент от удерживающих сил, кН м; $M_{сд}$ – момент от сдвигающих сил, кН м; Q_i – сила трения на поверхности сдвига i -го отсека, кН; l_i – длина дуги следа поверхности сдвига i -го отсека, м; c_i – удельная сила сцепления на поверхности сдвига i -го отсека, кПа; T_i – сдвигающая сила

(касательная составляющая силы веса), кН, $T_i = G_i \sin \alpha_i$; G_i – вес i -го отсека; α_i – угол наклона радиуса поверхности скольжения к вертикальной оси.

В числитель формулы для определения устойчивости откосов целесообразно вводить полученный по результатам исследований поправочный коэффициент $k_{п}$. В итоге формула (2) примет вид:

$$k_{уст} = \frac{M_{уд}}{M_{сд}} = \left(\sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=1}^n c_i \cdot \Delta l_i \right) \cdot k_{п} / \sum_{i=1}^n T_i, \quad (3)$$

где $k_{п}$ – поправочный коэффициент, учитывающий реальные условия состояния откоса с учетом влажности;

$$k_{п} = W \cdot k_{пр} \cdot k_{\phi} \cdot f_r, \quad (4)$$

где W – влажность грунта; $k_{пр}$ – коэффициент, зависящий от характеристики грунта, для связных грунтов $k_{пр} = 0,8 \dots 0,9$, для несвязных – $k_{пр} = 1,2 \dots 1,3$; f_r – коэффициент трения грунта о грунт, $f_r = 0,5 \dots 1,0$; k_{ϕ} – коэффициент эксплуатации.

Значения коэффициента эксплуатации определяются по эмпирической формуле:

$$k_{\phi} = k_{вл} \cdot k_{пл} \cdot k_{кат}, \quad (5)$$

где $k_{вл}$ – коэффициент, учитывающий наличие влаги между слоями грунта, $k_{вл} = 0,7 \dots 1,0$; $k_{пл}$ – коэффициент, учитывающий плотность грунта $k_{пл} = 0,7 \dots 1,0$; $k_{кат}$ – коэффициент, учитывающий категорию грунта, $k_{кат} = 0,7$ для I категории; $0,8$ – II; $0,9$ – III; $1,0$ – IV.

Распределение слоев грунтов и почвогрунтов является неравномерным и не строго горизонтальным. Результаты экспериментальных исследований по определению устойчивости откосов канала показывают, что данная характеристика в большей степени зависит от вида грунта, его влажности, величины нагрузки и заложения откосов.

Разрушение откосов наблюдалось при проведении опыта, когда основные факторы имели следующие значения: 1) влажность грунта – 18%; 2) категория грунта – I (3-4 удара ударника ДорНИИ); 3) вид грунта – суглинок; 4) вид нагрузки и ее величина, распределенная на полке

швеллера № 14 по кромке бермы левого откоса (вертикальной стенки), доведена до 91,144 кг; 5) состояние вертикального откоса – устойчивость нарушена (рис. 2).

При пересчете критических значений нагрузок, при которых модель откоса разрушается, на откос в натуральную величину получены нагрузки величиной 10500 кг. Такое значение соизмеримо с массой каналоочистителя РР-303, и можно сделать вывод о том, что использование

данной машины в условиях рассматриваемого случая с вертикальным откосом исключается.

Результаты расчетов по данному опыту расчета коэффициента устойчивости левого вертикального откоса с распределенной нагрузкой на полке швеллера № 14 в системе GeoStab 8.1 по методу Филлениуса и анализ призмы сдвига при расчете откоса (величина суммарной силы; угол наклона основания) в системе GeoStab 8.1 представлены на рисунке 3.

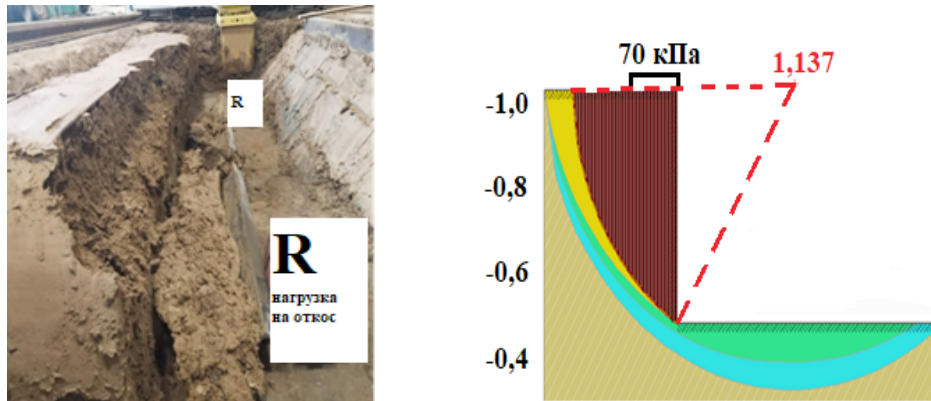


Рис. 2. Величина запаса устойчивости при вертикальном откосе канала с распределенной нагрузкой на берме, недостаточная в данных условиях

Fig. 2. The value of the safety margin at the vertical slope of the channel with a distributed load on the berm is insufficient under these conditions

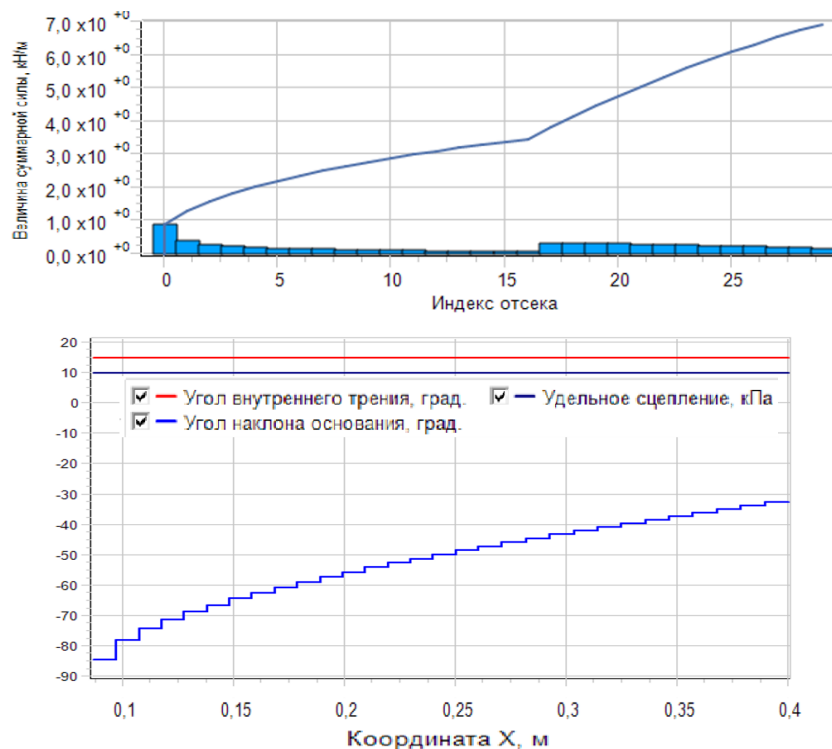


Рис. 3. Расчет коэффициента устойчивости левого вертикального откоса с распределенной нагрузкой на полке швеллера № 14 в системе GeoStab 8.1 по методу Филлениуса и анализ призмы сдвига при расчете откоса (величина суммарной силы; угол наклона основания)

Fig. 3. Calculation of the stability coefficient of the left vertical slope with distributed load on the channel flange No14 in the GeoStab 8.1 system according to the Fillenius method and analysis of the shear prism in the slope calculation (total force value; base inclination angle)

Выводы

– При нагружении откоса с заложением 54° по полке швеллера до нагрузки величиной 214,744 кг, что составляет $1322,3 \text{ Н/м}^2$, – устойчивость откоса соблюдается.

– При идентичных нагрузках на кромке бермы откоса с заложением 75° по ребру швеллера – устойчивость откоса нарушена.

– При нагружении вертикального откоса по полке швеллера, как показано на рисунке 2, до нагрузки величиной 91,144 кг, что составляет $232,5 \text{ Н/м}^2$, – устойчивость вертикального откоса нарушена.

Список использованных источников

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

2. **Абдулмажидов Х.А.** Обоснование геометрических параметров ковшей каналоочистителя // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2013. № 2 (58). С. 30-33.

3. **Карапетян М.А., Абдулмажидов Х.А.** Теоретическое исследование динамики рабочего органа каналоочистителя РР-303 // Природообустройство. 2015. № 2. С. 78-80.

4. **Свиридович Т.Г.** Подбор травосмесей для укрепления русловой части мелиоративных каналов // Мелиорация. 2023. № 2 (104). С. 35-40.

5. **Тойгамбаев С.К., Шмонин В.А., Теловов Н.К.** Математическая модель теории планирования экспериментов по использованию глубокого рыхлителя // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2013. № 1 (57). С. 40-45.

6. **Карнаухов В.Н.** Способы ремонта и реконструкции русел рек-водоприемников и проводящих каналов // Мелиорация. 2006. № 2 (56). С. 37-44.

7. **Кондратьев В.Н., Свиридович Т.Г.** Обобщение результатов экспериментальных исследований укрепления откосов и русловой части каналов армированными травяными коврами // Мелиорация. 2015. № 1 (73). С. 171-188.

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

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

10. **Авраменко Н.М., Карнаухов В.Н., Солтан О.Г.** Технологические схемы проведения ремонтных

Экспериментальные исследования показали, что на устойчивость откоса канала в значительной степени влияют угол заложения откосов, влажность и категория грунта.

Результаты экспериментов подтверждены расчетными данными, полученными в компьютерной программе GeoStab 8.1. Опытное определение устойчивости откосов с учетом поправочного и эксплуатационного коэффициентов подтверждают результаты экспериментальных данных, полученных на Большом грунтовом канале лаборатории кафедры организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ.

References

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

2. **Abdumazhidov Kh.A.** Substantiation of geometric parameters of canal cleaner buckets // Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin". 2013. № 2(58). P. 30-33.

3. **Karapetian M.A., Abdumazhidov Kh.A.** Theoretical study of the dynamics of the working organ of the RR-303 canal cleaner. 2015. № 2. P. 78-80.

4. **Sviridovich T.G.** Selection of grass mixtures for strengthening the channel part of reclamation canals. 2023. № 2(104). P. 35-40.

5. **Toygambaev S.K., Shmonin V.A., Telovov N.K.** Mathematical model of the theory of planning experiments on the use of a deep ripper / S.K. Toygambaev, V.A. Shmonin, N.K. Telovov // Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin" 2013. № 1(57). P. 40-45.

6. **Karnaukhov V.N.** Methods of repair and reconstruction of riverbeds of water receivers and conducting canals. 2006. № 2(56). P. 37-44.

7. **Kondratiev V.N., Sviridovich T.G.** Generalization of the results of experimental studies of strengthening slopes and channel part of canals with reinforced grass carpets / V.N. Kondrat'ev, T.G. Sviridovich // 2015. № 1(73). P. 171-188.

8. **Linkevich N.N.** Main measures to improve the reliability and safety of channels // Innovative technologies in water, communal economy and water transport: Materials of the II Republican Scientific and Technical Conference, Minsk, April 28-29, 2022. Minsk: Belarusian National Technical University, 2022. P. 171-178.

9. **Mikhnevich E.I.** Calculation of the throughput capacity and stability of channels. 2020. № 1. P. 23-31. – DOI 10.35688/2413-8452-2020-01-003.

10. **Avramenko N.M., Karnaukhov V.N., Soltan O.G.** Technological schemes for repairing work on an open network / N.M. Avramenko, V.N. Karnaukhov, O.G. Soltan // Land reclamation. 2011. № 1(65). P. 68-75.

11. **Rogunovich V.P., Vael A.I.M., Shkadun A.I.** Improving the effectiveness of the fastening of earth canals

работ на открытой сети // Мелиорация. 2011. № 1 (65). С. 68-75.

11. **Рогуневич В.П., Ваэль А.И.М., Шкадун А.И.** Повышение эффективности крепления земляных каналов // Мелиорация. 2016. № 2 (76). С. 46-51.

12. **Басаревский А.Н., Мажугин И.Е.** Аналитический обзор рабочих органов активного типа планировщика-рыхлителя для откосов мелиоративных каналов // Механизация и электрификация сельского хозяйства: Межведомственный тематический сборник. Минск: Беларуская навука, 2018. Вып. 51. С. 34-39.

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

14. **Фоминых М.С., Юшков Б.С.** Расчет устойчивости высоких насыпей // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. 2013. Т. 2. С. 487-497.

15. **Можина А.М., Преснов О.М., Стогниева А.В., Утяганова А.И.** Усиленные конструкции из габионов. Область их применения // Перспективы науки. 2022. № 2 (149). С. 30-33.

16. **Богомолов А.Н., Богомолова О.А., Абрамов Г.А.** Критерий безопасной эксплуатации грунтового откоса гидротехнического сооружения // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, North Charleston, USA, 19-20 декабря 2017 г. Т. 3. North Charleston, USA: CreateSpace, 2017. С. 61-65.

/ V.P. Rogunovich, A. I.M. Vael, A.I. Shkadun // Land reclamation. 2016. № 2(76). P. 46-51.

12. **Basarevsky A.N., Mazhugin I.E.** Analytical review of working bodies of the active type of the planer-ripper for slopes of reclamation canals / A.N. Basarevskiy, I.E. Mazhugin // Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental thematic collection. Vol. 51. Minsk: Belaruskaya navuka, 2018. P. 34-39.

13. **Karlikhanov T.K., Kuanyshbaev O.Zh., Daldabaeva G.T.** Current state of the problem of the stability of earth channels / T.K. Karlikhanov O.Zh. Kuanyshbaev, G.T. Daldabaeva // Science and new technologies. 2013. № 1. P. 33-36

14. **Fominykh M.S.** Calculation of stability of high embankments / M.S. Fominykh, B.S. Yushkov // Ecology and scientific and technical progress. Urbanism. 2013. V. 2. P. 487-497.

15. **Mozhina A.M.** Reinforced structures from gabions. Area of their application / A.M. Mozhina, O.M. Presnov, A.V. Stognieva, A.I. Utyaganova // Perspektivy nauki. 2022. № 2(149). P. 30-33.

16. **Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Abramov G.A.** Criterion of safe operation of the ground slope of the hydraulic structure / A.N. Bogomolov, O. A., Abramov G.A. Actual directions of fundamental and applied research: Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference, North Charleston, USA, December 19-20, 2017. Volume 3. – North Charleston, USA: CreateSpace, 2017. P. 61-65.

Об авторах

Мартик Аршалуйсович Карапетын, д-р техн. наук, профессор; WoS ResearcherID: ADQ-5014-2022; Scopus AuthorID: 57222131481; ORCID: 0000-0002-6524-0561; SPIN-код: 3008-0720; AuthorID: 780469; karapetyn@rgau-msha.ru

Серик Кокибаевич Тойгамбаев, д-р техн. наук, профессор; WoS ResearcherID: JRY-8643-2023; Scopus AuthorID: 57221221969; ORCID: 0000-0002-7649-6036; SPIN-код: 9931-9900; AuthorID: 753942; kokibaewich@yandex.ru

Хамзат Арсланбекович Абдулмажидов, канд. техн. наук, доцент; WoS ResearcherID: AAE-5817-2022; Scopus AuthorID: 57224176106; ORCID: 0000-0002-7699-4799; SPIN-код: 7201-8282; AuthorID: 756348; abdulmajidov@rgau-msha.ru

About the authors

Martik A. Karapetyan, D. Sc. (Eng.), Professor; WoS ResearcherID: ADQ-5014-2022; Scopus AuthorID: 57222131481; ORCID: 0000-0002-6524-0561; SPIN-code: 3008-0720; AuthorID: 780469; karapetyn@rgau-msha.ru

Serik K. Toygambaev, D. Sc. (Eng.), Professor; WoS ResearcherID: JRY-8643-2023; Scopus AuthorID: 57221221969; ORCID: 0000-0002-7649-6036; SPIN-code: 9931-9900; AuthorID: 753942; kokibaewich@yandex.ru

Khamzat A. Abdulmajidov, CSc (Eng.), Associate Professor; WoS ResearcherID: AAE-5817-2022; Scopus AuthorID: 57224176106; ORCID: 0000-0002-7699-4799; SPIN-code: 7201-8282; AuthorID: 756348; abdulmajidov@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Authors' contributions

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 17.05.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 21.06.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 21.06.2024

Karapetyan M.A., Toygambaev S.K., Abdulmajidov Kh.A. carried out experimental and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-58-66>

УДК 624.21: 627.8

**ОЦЕНКА УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВ В СОСТАВЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ****Б.А. Бондарев^{1✉}, П.В. Борков^{2✉}, И.И. Попов²,
А.Б. Бондарев¹, В.К. Жидков³, Д.А. Хрипунков¹**¹ Липецкий государственный технический университет; г. Липецк, ул. Московская, 30, Россия² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия³ Тамбовский государственный технический университет; г. Тамбов, ул. Советская, 106/5, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема возникновения эксплуатационных повреждений бетонных и железобетонных конструкций мостов. Цель исследований – определение уровня безопасности эксплуатируемых инженерных конструкций моста в составе гидротехнического сооружения. На примере работ по обследованию технического состояния произведен расчет устойчивости железобетонных конструкций моста шлюза № 11 Перервинского гидроузла канала им. Москвы. Приведены результаты обследования технического состояния и оценки безопасности моста в составе шлюза. Полученные данные позволили определить уровень безопасности эксплуатируемых инженерных сооружений на основе установления категории технического состояния.

Ключевые слова: мост, гидротехническое сооружение, дефект, категория технического состояния, критерий безопасности

Формат цитирования: Бондарев Б.А., Борков П.В., Попов И.И., Бондарев А.Б., Жидков В.К., Хрипунков Д.А. Оценка уровня безопасности железобетонных конструкций мостов в составе гидротехнических сооружений // Природообустройство. 2024. № 4. С. 58-66. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-58-66>

Scientific article

ASSESSMENT OF THE SAFETY LEVEL OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE STRUCTURES AS PART OF HYDRAULIC STRUCTURES**B.A. Bondarev^{1✉}, P.V. Burkov^{2✉}, I.I. Popov²,
A.B. Bondarev¹, V.K. Zhidkov³, D.A. Khripunkov¹**¹ Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Moskovskaya str., 30, Russia² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskaya str., Moscow, Russia³ Tambov State Technical University, Tambov, ul. Sovetskaya str., 106/5, Russia

Abstract. This article discusses the issue of operational damage to concrete and reinforced concrete bridge structures. The purpose of the study is to determine the safety level of the operated engineering structures of the bridge as part of a hydraulic structure. Using the example of work on the technical condition survey, the stability of reinforced concrete structures of the lock bridge No. 11 of Perervinsky hydroelectric complex of the Moscow Canal is calculated. The results of the technical condition survey and safety assessment of the bridge as part of the lock are presented. The data obtained made it possible to determine the safety level of the operated engineering structures based on the establishment of the category of technical condition.

Keywords: bridge, hydraulic structure, defect, category of technical condition, safety criterion

Format of citation: Bondarev B.A., Borkov P.V., Popov I.I., Bondarev A.B., Zhidkov V.K., Khripunkov D.A. Assessment of the safety level of reinforced concrete bridge structures as part of hydraulic structures // Prirodoobustrojstvo. 2024. № 4. P. 58-66. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-58-66>

Введение. Обеспечение безопасности гидротехнических объектов, сохранение эксплуатационных свойств и конструкций, входящих в состав сооружений – ответственная задача как проектировщиков, так и специалистов, обеспечивающих исправное и работоспособное состояние подобных объектов на протяжении всего срока службы [1, 2]. Неудовлетворительное состояние отдельных строительных конструкций, когда создается угроза возникновения чрезвычайных ситуаций, в ряде случаев может привести к ликвидации сооружения [3, 4]. Особое внимание при этом следует уделять состоянию транспортных сооружений в составе гидротехнических [5-7].

Длительность службы структурных компонентов водных технологических объектов зависит от следующих основных факторов:

- силы динамического влияния (многократное и повторное) на конструкцию моста, вызванного движением воды;
- переменные нагрузки от транспортных средств, передвигающихся по верхнему слою покрытия (поверхности дороги);
- вредные химические элементы, взвеси, содержащиеся в воде и проникающие сквозь несущие конструкции [8].

Цель исследований: определение уровня безопасности используемых технических сооружений при установлении категории технического состояния моста как части гидротехнического сооружения, что необходимо главным образом для оценки оставшегося ресурса, будь то отдельные конструкции или сооружение в целом.

Материалы и методы исследований. В 2017 г. были выполнены работы по обследованию технического состояния и расчету устойчивости железобетонных конструкций моста шлюза

№ 11 Перервинского гидроузла канала им. Москвы. Особенности подобного вида работ для мостов в составе гидротехнических сооружений уже представлялись [8]. Мост в составе шлюза № 11 длиной 43,0 м имеет статическую схему 10,5 + 22,5 + 10,25 м. Пролетные строения состоят из двух главных и поперечных балок, выполненных из монолитного железобетона. Мост рассчитан на временную подвижную нагрузку Н-10. Опоры (быки) – массивные на естественном основании. Мостовое полотно состоит из однополосной проезжей части шириной 3,5 м. Верхний слой покрытия, выполненный из асфальтобетона, составляет 0,06 м. Водоотвод с проезжей части осуществляется за счет продольных и поперечных уклонов через водоотводные трубки под мост. Ограждения безопасности отсутствуют. Перильные ограждения секционные, декоративные, выполненные из чугуна, высотой 1,10 м. Деформационные швы в начале и в конце моста – закрытого типа. В качестве тротуаров используются служебные проходы шириной по 0,80 м с двух сторон. Общий вид моста приведен на рисунке 1, схема расположения моста – на рисунке 2.

Фактическая прочность бетона в конструкциях была определена с использованием методов неразрушающего контроля включая метод отрыва со скалыванием, метод упругого отскока, метод ударного импульса и ультразвуковой метод. Для нахождения требуемых величин были использованы стандарты: ГОСТ 22690-2015, ГОСТ 17624-2012, МИ 2016-03, СТО 36554501-009-2007 и МДС 62-2.01.

Для метода отрыва со скалыванием использовался прибор типа ПОС-50МГ4 с анкерным устройством II типа при глубине заделки анкера 48 мм., для метода упругого отскока – склерометр Proseq Digi_Schmidt type ND.



Рис. 1. Общий вид моста в составе шлюза
(фото Б.А. Бондарева)

Fig. 1. General view of the bridge as part of the lock
(photo by B.A. Bondarev)

Прочность бетона на отдельных участках определялась с помощью специальных графиков, которые были построены на основе исследований одних и тех же элементов конструкций с использованием метода отрыва со скалыванием, а также иных методов неразрушающего

контроля в соответствии с ГОСТ 22690-2015, ГОСТ 17624-2012 и другими нормативными документами. Это позволило включить в анализ участки с максимальной и минимальной величиной прочности, а также получить промежуточные значения. Схемы представлены на рисунках 3, 4.

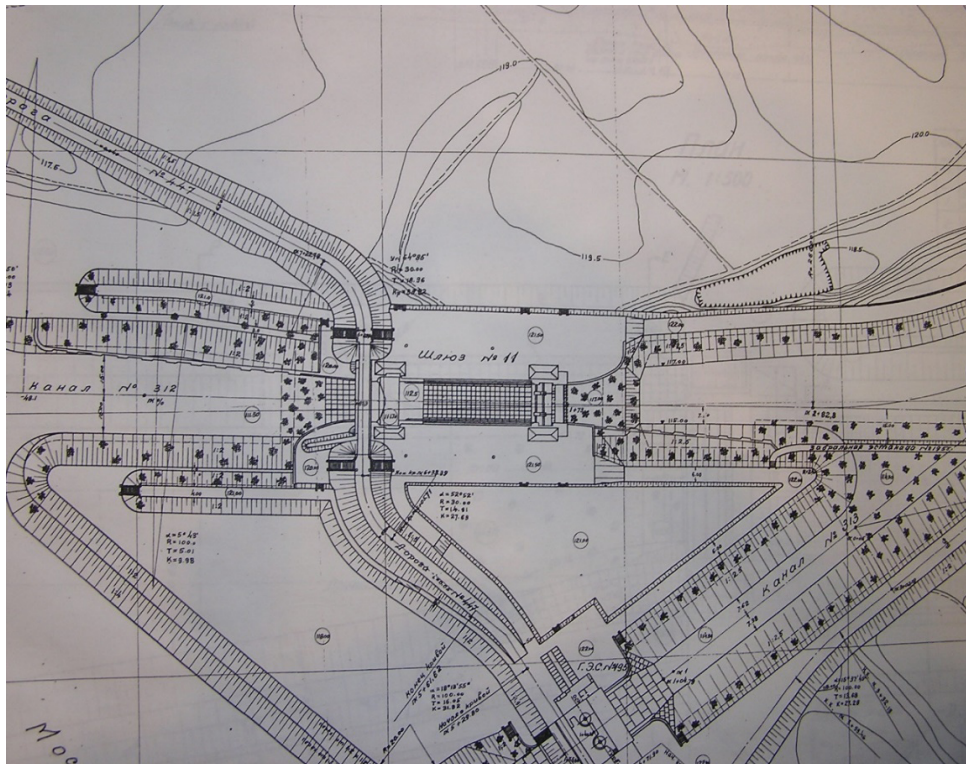


Рис. 2. Общая схема расположения моста и шлюза № 11 с подходами по проекту

Fig. 2. General scheme of the layout of the bridge and lock No 11 with approaches according to the project

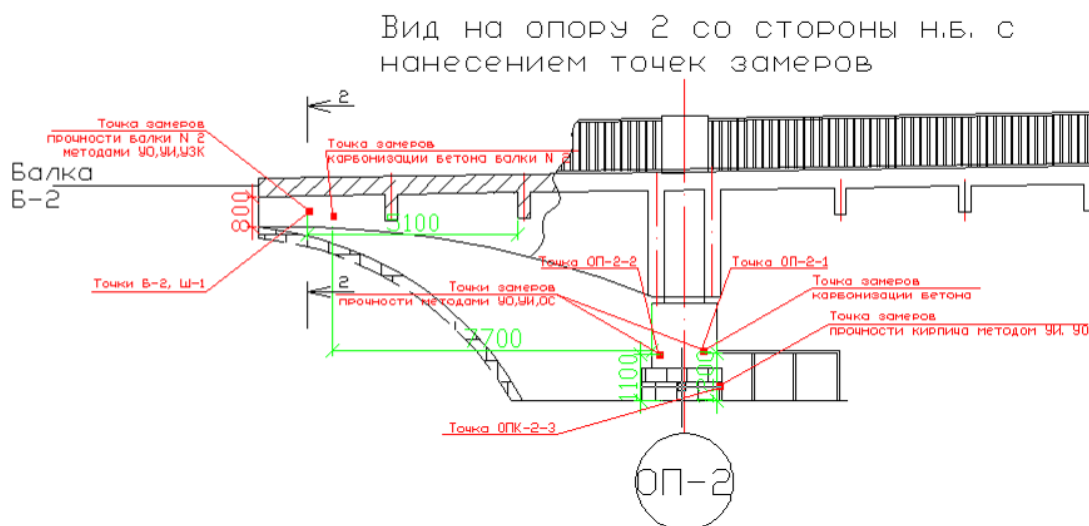


Рис. 3. Схема расположения точек замеров прочности конструкций опоры ОП-2 и балки Б-2 методами:

УО – упругого отскока; УИ – ударного импульса; ОС – отрывом со скалыванием.

Вид на опору со стороны нижнего бьефа

Fig. 3. Layout of the strength measurement points of the structures of the support OP-2 and beam B-2 by the following methods:
 УО – elastic rebound, УИ – shock pulse, ОС – separation with chipping.
 View of the support from the downstream side

Таблица 1. Определение прочности бетона методом отрыва со скалыванием
Table 1. Determination of concrete strength by the method of tearing off with chipping

№	Конструкция, отм., в/о Support, mark	Показания прибора Proceq Digi-Schmidt, Мпа The readings of the Proceq Digi-Schmidt device, Мpa	Прочность на сжатие по результатам испытаний методом отрыва со скалыванием, R_{if} Compression strength according to the results of the method of tearing off with chipping
1	Опора ОП-2 (средняя ступень), т.ОП-2-2 Support OP-2 (middle step), b. OP-2-2	27,8	30,7
2	Балка 2 у правого устоя, т.Б-2-1 Beam 2 at the right pier, b.B-2-1	26,7	29,1
3	Балка 2 у правого устоя, т.Б-2-2 Beam 2 at the right pier, b.B-2-2	22,1	26,8
4	Балка 2 у правого устоя, т.Б-2-3 Beam 2 at the right pier, b.B-2-3	29,3	30,0
5	Балка 1 у правого устоя, т.Б-1-1 Beam at the right pier, b. B-1-1	31,4	34,2
6	Балка 1 у правого устоя, т.Б-1-2 Beam 1 at the right pier, b.B-1-2	30,6	32,2

По результатам контроля прочности методами ОС и УО с обеспеченностью 95% класс бетона составляет: для пролетных балок – не ниже В31, для опор – не ниже В26,7.

Прочность штукатурки балок соответствует классу бетона В25.

Марка кирпича нижней ступени опоры ОП-2 соответствует М-150.

Расчет показателей технического состояния и безопасности шлюза производился на основе сценария, относящегося к 3-й группе аварий [9].

Развитие рассматриваемого сценария позволяет оценить 4 критерия безопасности (ϕ_i), выбранных из указанных групп:

a_2 – отметка верха пролетного строения моста;

a_6 – дефекты и повреждения бетона пролетных строений;

a_{16} – дефекты и повреждения промежуточной опоры (быка);

b_2 – трещины в бетоне конструкций промежуточных опор (быков) и устоев.

Остановимся на каждом из вышеперечисленных показателей и методах их определения. Отметка верха ездового полотна мостового сооружения определяется с помощью нивелирования проезжей части моста в 6 точках в поперечном направлении на опорах. В таблице 3 приведены результаты нивелирования.

Дефекты и повреждения конструкций балок пролетных строений определялись в соответствии с инструкцией [9] путем визуального и инструментального обследования. На рисунках 5-7

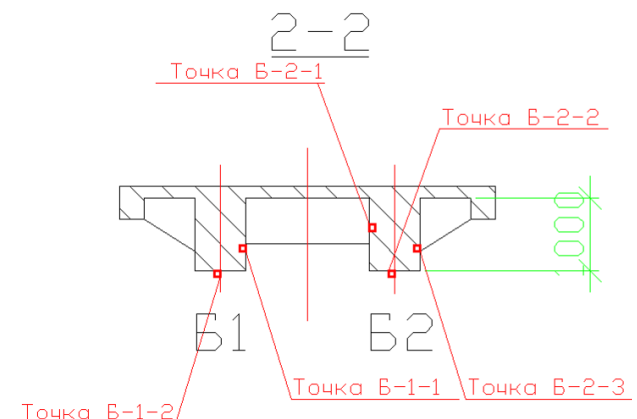


Рис. 4. Схема расположения точек замеров прочности конструкций балок Б-1 и Б-2

Fig. 4. Layout of strength measurement points of beam structures B-1 and B-2

приведены вышеуказанные дефекты. Трещины в бетонных конструкциях промежуточных опор и устоев, их параметры фиксировались и заносились в ведомость дефектов. Дефекты и повреждения опор представлены на рисунке 8.

Результаты и их обсуждение. После анализа результатов нивелирования нами была определена степень влияния каждого из отобранных параметров безопасности, причем расчеты производились для нестроогого ранжирования [10]. В таблице 4 приведены результаты оценки критериев безопасности.

На следующем этапе критерии располагаем в порядке убывания их предпочтения. Затем выстраиваем критерии таким образом, чтобы определить предпочтение одного критерия над другим (табл. 5).

Таблица 2. Определение прочности опоры ОП-2 методом УО при помощи склерометра Proceq Digi Schmidt

Table 2. Determination of the strength of the OP-2 support by the UO method using the Proceq Digi Schmidt sclerometer

№ опоры Support	Место измерения Place of measurement	Средняя прочность R_{cp} , МПа Average strength R_{av} , МПа	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	Класс бетона В, прочность с 95% обеспечен. Concrete B class, strength with 95% is provided
2	Тело опоры (средняя ступень) <i>Body of the support (middle step)</i>			
	- с правой стороны, т.ОП-2-4; <i>- from the right side, b. OP-2-4</i>	37,25	12,6	29,6
	- с левой стороны, т.ОП-2-5 <i>- from the left side, b.OP-2-5</i>	33,40	11,6	27,1
	- со стороны опоры 1, т.ОП-2-6; <i>from the support side 1, OP-2-6</i>	36,94	12,4	29,4
	- со стороны правого устоя, т.ОП-2-7. <i>- from the right pier, b. OP-2-7</i>	34,18	13,4	26,7

Таблица 3. Результаты нивелирования проезжей части моста

Table 3. Results of leveling the roadway of the bridge

Номера точек Numbers of points	Сечения нивелирования Cross-sections of leveling	Отсчеты по рейке, м Rod reading, m	Относительные отметки, м Relative marks, m	Номера точек Numbers of points	Сечения нивелирования Cross-sections of leveling	Отсчеты по рейке, м Rod reading, m	Относительные отметки, м Relative marks, m
1	1	2,024	0,976	21	5	0,919	2,081
2	1	1,918	1,082	22	5	0,920	2,080
3	1	1,925	1,075	23	5	0,880	2,120
4	2	1,378	1,622	24	5	0,860	2,140
5	2	1,368	1,362	25	5	0,882	2,118
6	2	1,925	1,075	26	5	0,910	2,090
7	3	0,951	2,049	27	5	0,890	2,110
8	3	0,960	2,040	28	6	0,970	2,030
9	3	0,943	2,057	29	6	0,942	2,058
10	3	0,930	2,070	30	6	0,930	2,070
11	3	0,941	2,059	31	6	0,903	2,079
12	3	0,929	2,071	32	6	0,911	2,089
13	3	0,952	2,048	33	6	0,970	2,030
14	4	0,960	2,040	34	6	0,928	2,072
15	4	0,960	2,040	35	7	1,240	1,760
16	4	0,940	2,060	36	7	1,280	1,720
17	4	0,900	2,100	37	7	1,360	1,640
18	4	0,920	2,080	38	8	1,500	1,500
19	4	0,900	2,100	39	8	1,470	1,530
20	4	0,925	2,075	40	8	1,420	1,580



Рис. 5. Горизонтальная трещина опоры в результате морозного разрушения левой консоли 1-й балки у правого устоя (фото Б.А. Бондарева)

Fig. 5. Horizontal crack of the support as a result of frosty destruction of the left console of the 1st beam at the right abutment (photo by B.A. Bondarev)



Рис. 6. Горизонтальная трещина до 1 мм в нижнем поясе балки № 2 в растянутой зоне в пролете 2 (фото Б.А. Бондарева)

Fig. 6. Horizontal crack up to 1 mm in the lower chord of beam No 2 in the stretched zone in span 2 (photo by B.A. Bondarev)

Далее рассчитываем стандартизованный ранг, разделив сумму рейтингов, имеющих равные критерии предпочтительности, на количество этих критериев. Затем производим вычисление приоритетов критериев w_i :

$$w_i = (n - r_i + 1) / \sum r_i, \quad (1)$$

где r_i – стандартизованный ранг критерия x_i ; $\sum r_i = 10$ – сумма стандартизованных рангов критериев; $n = 4$ – число критериев.

Затем определяем коэффициент значимости критериев $K_{зн,i}$:

$$K_{зн,i} = \frac{w_i}{w_{max}}, \quad (2)$$

где w_i – приоритет критерия x_i ; $w_{max} = 0,200$ – максимальный приоритет сопоставляемых критериев.

Далее уточняем фактическую оценку критериев с учетом их коэффициентов значимости по формуле (1) методики [9]:

$$\varphi_i = 2 + (\varphi_{\varphi_i} - 2) \times K_{зн,i}. \quad (3)$$

Вычисляем оценку показателя технического состояния (ТС) сооружения по формуле (2) методики [9]:

$$ТС = l_{max} - \Pi (l_{max} - \varphi_i), \quad (5)$$

где φ_i – уточненные значения критериев безопасности групп А, Б, В.

Значения критериев безопасности $\varphi_i \leq 3$ не учитываются, поскольку в этом случае они не оказывают существенного влияния на ТС [9].

Поскольку уточненные значения критериев безопасности располагаются в интервалах $3,0 \leq \varphi_i \leq 4,0$, то в соответствии с п. 5.16 методики [9] в формулу (5) подставляем только значения φ_i , расположенные в интервале $3,0 \leq \varphi_i \leq 4,0$. При этом $l_{max} = 4,0$. В результате получаем оценку показателя ТС сооружения:

$$ТС = 4,0 - (4,0 - 3,8) \times (4 - 3,2) = 3,84.$$

Затем проводим оценку показателя ТС сооружения с учетом уровня ответственности сооружения в соответствии с методикой [9]:

$$ТС_\gamma = 2,0 + (ТС - 2) \times K_\gamma, \quad (6)$$

где $K_\gamma = 1,05$ – коэффициент, зависящий от уровня ответственности сооружения;

$$ТС_\gamma = 2,0 + (3,84 - 2,0) \times 1,05 = 3,93.$$

Величина обобщающего критерия безопасности для групп Г и Д составила 4,0. Это свидетельствует о том, что эксплуатация данного сооружения лишь отчасти соответствует проектным и нормативным требованиям.

Коэффициент условия эксплуатации составляет $K_{ус} = 0,8$ (для сооружения II класса в соответствии с таблицей 6 методики [9]). Для рассматриваемого сооружения показатель соответствия проекта действующим нормам и правилам проектирования составил 3,8 балла.

Определение показателя безопасности сооружения (БС) выполнили по формуле (4) методики [9]:

$$БС = l_{max} - (l_{max} - ТС_\gamma) \times (l_{max} - K_{ус} \times УЭ) \times (l_{max} - НП). \quad (7)$$



Рис. 7. Повреждения левого устоя:

- 1 – оголение арматуры 1-й диафрагмы консоли 2-й балки;
 2 – трещина, отраженная под 2-й диафрагмой 1-й балки со следами высолов, ширина раскрытия трещины – до 0,15 мм;
 3 – горизонтальные трещины тротуарной балки № 4 (фото Б.А. Бондарева)

Fig. 7. Damage to the left pier:

- (1) exposure of the reinforcement of the 1st diaphragm of the 2nd beam console,
 (2) crack reflected under the 2nd diaphragm of the 1st beam with traces of efflorescence, crack opening width up to 0.15 mm,
 (3) horizontal cracks of paving beam No 4 (photo by B.A. Bondarev)



Рис. 8. Поверхностная коррозия опорных элементов (фото Б.А. Бондарева)

Fig. 8. Surface corrosion of support elements (photo by Bondarev B.A.)

Таблица 4. Критерии безопасности

Table 4. Safety criteria

Критерии безопасности групп А, Б и В Safety criteria of groups A, B and V	Величина оценки критерия ϕ_i Value of safety criteria ϕ_i
a_2	2,8
a_6	2,9
a_{16}	3,0
b_2	3,4

Таблица 5. Эквивалентность критериев

Table 5. Equivalence of criteria

Критерии безопасности групп А, Б и В Safety criteria of groups A, B and V	a_2	a_6	a_{16}	b_2
Ранг r_i / Rank r_i	3	1	2	4
Порядковое место / Ordinary position	3	1	2	4
Стандартизированный ранг r_{iy} / Standardized rank r_{iy}	3	1	2	4
Приоритет критерия w_i / Priority of the criterion w_i	0,2	0,4	0,3	0,1
Коэффициент важности $K_{зн, i}$ / Importance factor $K_{зн, i}$	1,0	2,0	1,5	0,5

Таблица 6. Уточнённая оценка критериев

Table 6. Updated assessment of criteria

Критерии безопасности групп А, Б и В <i>Safety criteria of groups A, B and V</i>	Величина оценки критерия ϕ_i <i>Value of the assessment of criterion ϕ_i</i>	Коэффициент значимости $K_{ан, i}$ <i>Importance factor $K_{ан, i}$</i>	Уточнённая оценка критерия ϕ_i <i>Updated assessment of criteria ϕ_i</i>
a_2	2,8	1,0	2,80
a_6	2,9	2,0	3,80
a_{16}	2,8	1,5	3,20
b_2	3,4	0,5	2,70

Таблица 6. Уточнённая оценка критериев

Table 6. Updated assessment of criteria

Критерии безопасности групп А, Б и В <i>Safety criteria of groups A, B and V</i>	Величина оценки критерия ϕ_i <i>Value of the assessment of criterion ϕ_i</i>	Коэффициент значимости $K_{ан, i}$ <i>Importance factor $K_{ан, i}$</i>	Уточнённая оценка критерия ϕ_i <i>Updated assessment of criteria ϕ_i</i>
a_2	2,8	1,0	2,80
a_6	2,9	2,0	3,80
a_{16}	2,8	1,5	3,20
b_2	3,4	0,5	2,70

Оценка показателя БС составляет:

$$БС = 4,0 - (4,0 - 3,93) \times (4,0 - 3,2) \times (4 - 3,8) = 3,98.$$

Показатель безопасности для рассматриваемого сценария аварии уточняется по формуле:

$$БС_{сч} = 2 + K_{сч} \times (БС - 2), \quad (8)$$

где $K_{сч} = 0,8$ – коэффициент, учитывающий степень опасности аварий для сооружения и окружающей среды;

$$БС_{сч} = 2 + 0,8 \times (3,98 - 2,0) = 2 + 0,8 \times 2,98 = 3,584.$$

Выполненные расчеты показывают, что по сценарию, относящемуся к III группе аварий, техническое состояние моста шлюза № 11 оценивается как ограниченно

работоспособное ($ТС = 3,84$), а уровень безопасности – как пониженный ($БС_{сч} = 3,584$).

Максимальная расчетная вероятность возникновения аварии III группы на обследуемом сооружении составила $6,9 \times 10^{-4}$ 1/год.

Выводы

Результаты обследования состояния моста и оценки безопасности гидротехнического сооружения при эксплуатации в реальных условиях позволяют не только установить соответствие проектным и нормативным требованиям, но и определить влияющие на безопасность факторы. Приведенные результаты исследований могут быть «масштабированы» и для расчета других конструкций подобных сооружений.

References

1. О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=455852>.
2. Бальзаников М.И., Иванов Б.Г., Михасек А.А. Система управления состоянием гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 119-124.
3. Жарницкий В.Я., Смирнов А.П. Факторы, влияющие на интенсивность износа бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических объектов // Природообустройство. 2021. № 2. С. 43-49.
4. Жезмер В.Б. Факторы, определяющие целесообразность эксплуатации гидротехнического сооружения // Природообустройство. 2022. № 3. С. 77-82.
5. Бондарев В.А., Бондарев А.Б., Борков П.В. Повышение транспортно-эксплуатационного состояния элементов мостовых конструкций // Строительство и реконструкция. 2017. № 5 (73). С. 81-85.
1. Federal Law No. 117-FZ dated 07/21/1997 "On the safety of hydraulic structures".
2. Balzannikov M.I., Ivanov B.G., Mikhasek A.A. Management system for the condition of hydraulic structures // Bulletin of the MGSU. 2012. No. 7. P. 119-124.
3. Zharnitsky V.Ya., Smirnov A.P. Factors influencing the intensity of wear of concrete and reinforced concrete structures of hydraulic engineering facilities // Prirodobustrojstvo. 2021. No. 2. P. 43-49.
4. Zhezmer V.B. Factors determining the expediency of operation of a hydraulic structure // Prirodobustrojstvo. 2022. No. 3. P. 77-82.
5. Bondarev V.A., Bondarev A.B., Borkov P.V. Improving the transport and operational condition of bridge structure elements // Construction and reconstruction. 2017. No. 5(73). P. 81-85.
6. Bondarev V.A., Borkov P.V., Bondarev A.B. Assessment of the transport and operational

6. **Бондарев Б.А., Борков П.В., Бондарев А.Б.** Оценка транспортно-эксплуатационного состояния мостовых сооружений на основе теории риска // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции «Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (ТРАНСЭНЕРГОКОМ-2018)». Саратов, 2018. С. 269-273.

7. **Бондарев А.Б., Борков П.В., Бондарев Б.А., Жариков В.А.** Ремонт и восстановление элементов конструкций транспортных сооружений с использованием полимерных композиционных материалов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура». 2015. № 39 (58). С. 17-25.

8. **Бондарев Б.А., Ерофеев В.Т., Бондарев А.Б.** и др. Особенности оценки эксплуатационной надежности мостов в составе гидротехнических сооружений // Транспортные сооружения. 2021. Т. 8, № 1.

9. Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценке безопасности судоходных гидротехнических сооружений / Министерство транспорта РФ. Федеральное Агентство морского и речного транспорта (РОСМОРРЕЧФЛОТ). М., 2011. 136 с.

10. Научно-технический отчет по результатам обследования технического состояния и расчету устойчивости железобетонных конструкций моста плюза № 11 Перевинского гидроузла канала им. Москвы. ООО «ЛипецкНИЦстройпроект». Липецк, 2017. 127 с.

Об авторах

Борис Александрович Бондарев, д-р техн. наук, профессор; SPIN-код: 3529-1603, ORCID0000-0001-7194-9270, linsp-48@mail.ru

Павел Валерьевич Борков, канд. техн. наук, доцент; SCOPUS57190971331, ORCID0000-0003-4081-3260, SPIN-код: 1875-1662, AuthorID: 278834, borkovpv@mail.ru

Иван Иванович Попов, PhD, директор центра межвузовской научной коммуникации, <https://orcid.org/0000-0003-0860-4311>; WOS Researcher ID: T-4467-2019; Scopus ID: 56763512000; 89042149140@mail.ru

Александр Борисович Бондарев, канд. техн. наук, доцент; SPIN-код: 4421-6450, ORCID0000-0002-2902-7528, ialex-86@mail.ru

Владимир Константинович Жидков, аспирант; SPIN-код: 8083-1937, Leader ID6038852, ORCID0009-0007-0681-5226, gidkov_vova_1999@mail.ru

Дмитрий Андреевич Хрипунков, магистрант, sm@stu.lipetsk.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Бондарев Б.А., Борков П.В., Попов И.И., Бондарев А.Б., Жидков В.К., Хрипунков Д.А. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Authors' contributions

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 26.03.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 07.06.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 07.06.2024

condition of bridge structures based on the theory of risk // In the collection of scientific papers based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference "The role of a reference university in the development of the transport and energy complex of the Saratov region (TRANSENERGOCOM-2018)", 2018. P. 269-273.

7. **Bondarev A.B., Borkov P.V., Bondarev B.A., Zharikov V.A.** Repair and restoration of structural elements of transport structures using polymer composite materials // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2015. No. 39 (58). P. 17-25.

8. **Bondarev B.A., Yerofeev V.T., Bondarev A.B.** Features of assessing the operational reliability of bridges as part of hydraulic structures / B.A. Bondarev, V.T. Yerofeev, A.B. Bondarev [et al.] // Transport structures. 2021. Vol. 8, No. 1.

9. Methodological recommendations for monitoring the technical condition and safety assessment of navigable hydraulic structures / Ministry of Transport of the Russian Federation. Federal Agency for Maritime and River Transport (ROSMORRECHFLOT) / Moscow: 2011 136 p.

10. Scientific and technical report on the results of a survey of the technical condition and calculation of the stability of reinforced concrete structures of the gateway bridge No. 11 of the Perervinsky hydroelectric complex of the Moscow Canal. – LLC "Lipetskknitsstroyproekt", Lipetsk, 2017. 127 p.

About the authors

Boris A. Bondarev, DSc (Eng), professor; SPIN-code: 3529-1603, ORCID0000-0001-7194-9270, linsp-48@mail.ru

Pavel V. Borkov, CSc, associate professor; SCOPUS57190971331, ORCID0000-0003-4081-3260, SPIN-код: 1875-1662, AuthorID: 278834, borkovpv@mail.ru

Ivan I. Popov, PhD, director of the center of the inter-universities scientific communication, <https://orcid.org/0000-0003-0860-4311>; WOS Researcher ID: T-4467-2019; Scopus ID: 56763512000; 89042149140@mail.ru

Alexander B. Bondarev, CSc (Eng), associate professor; SPIN-code: 4421-6450, ORCID0000-0002-2902-7528, ialex-86@mail.ru

Vladimir K. Zhidkov, post graduate student; SPIN-код: 8083-1937, Leader ID6038852, ORCID0009-0007-0681-5226, gidkov_vova_1999@mail.ru

Dmitry A. Khripunkov, holder of master's degree, sm@stu.lipetsk.ru

Bondarev B.A., Borkov P.V., Popov I.I., Bondarev A.B., Zhidkov V.K., Khripunkov D.A. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-67-74>

УДК 627.8:69.05



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-БИОЛОГИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ АПК

Н.В. Ханов^{1✉}, С.О. Курбанов^{2✉}, О.Н. Черных¹, Ф.Т. Дударова²

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

² Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова; 360030, КБР, г. Нальчик, пр-т Ленина, 1В, Россия

Аннотация. Цель исследований: подготовка и рекомендация к внедрению ряда технических решений по возведению биоинженерных систем для небольших оросительных систем поверхностного полива по бороздам с использованием новых природоохранных приемов мелиорации земель. Гидротехнические элементы и земли мелиоративных систем, которые по ряду причин эродированы, должны быть надежно защищены от эрозии. В рамках проекта «Совершенствование методов инженерно-мелиоративного обустройства малых водных объектов АПК» были разработаны и проверяются в натуральных условиях биоинженерные системы и технологии защиты не только прибрежных территорий малых рек и прудов, подрусовых водозаборов, но и каналов небольших оросительных систем поверхностного полива по бороздам с использованием новых природоохранных приемов мелиорации земель. Биопозитивные конструкции состоят из местных и экологически безопасных искусственных материалов. Миксированные конструкции содержат: габионные тюфяки; геоматы; металлические решетки; георешетки, заполненные щебнем; гибкие трубопроводы и другие природные и природоподобные компоненты. Отмечено, что внедрение и использование для подачи воды на орошение в мелиоративных системах предгорных зон Северо-Кавказского федерального округа биопозитивных сооружений разработанных конструкций ведут к росту экономического эффекта примерно в 2 раза и снижению себестоимости подаваемой воды более чем на 40%.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-29-00928; <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>.

Ключевые слова: мелиоративная система, биопозитивные конструкции, подрусовой водозабор, полив по бороздам

Формат цитирования: Ханов Н.В., Курбанов С.О., Черных О.Н., Дударова Ф.Т. Инновационные технологические решения инженерно-биологических сооружений на мелиоративных системах АПК // Природообустройство. 2024. № 4. С. 67-74. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-67-74>

Original article

INNOVATIVE TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR ENGINEERING AND BIOLOGICAL STRUCTURES ON AGRICULTURAL INDUSTRIAL INVESTIGATION SYSTEMS

N.V. Khanov^{1✉}, S.O. Kurbanov^{2✉}, O.N. Chernikh², F.T. Dudarova²

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

² Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov. 360030 Nalchik, Lenina avenue, 1B, Russia

Abstract. The purpose of the research is to prepare and recommend the implementation of a number of technical solutions for the construction of bioengineered systems for small irrigation systems of surface irrigation along furrows using new environmental techniques of land reclamation. Hydraulic elements and lands of reclamation systems, which are eroded for a number of reasons, must be reliably protected from erosion. As part of the project “Improving the methods of engineering and reclamation of small water bodies of the agro-industrial complex”, bioengineering systems and technologies for protecting not only the coastal areas of small rivers and ponds, under-river water intakes, but also the canals of small surface irrigation systems along furrows were developed and tested under natural conditions using new environmental protection techniques for land reclamation. Biopositive designs are made of local and environmentally friendly man-made materials. Mixed structures contain: gabion

mattresses; geomats; metal gratings; geogrids filled with crushed stone; flexible pipelines and other natural and nature-like components. It is noted that the introduction and use of biopositive structures of the developed structures for supplying water for irrigation in reclamation systems of the foothill zones of the North Caucasus Federal District leads to an increase in the economic effect by approximately 2 times and a reduction in the cost of supplied water by more than 40%.

The work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-29-00928, <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>.

Keywords: reclamation system, biopositive structures, under-river water intake, furrow irrigation

Format of citation: Khanov N.V., Kurbanov S.O., Chernykh O.N., Dudarova F.T. Innovative technological solutions for engineering and biological structures on reclamation systems of the agro-industrial complex // Prirodoobustroystvo. 2024. No. 4. P. 67-74. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-67-74>

Введение. Традиционные мелиоративные системы поверхностного полива с громоздкими водозаборными сооружениями из малых рек характеризуются высокой материалоемкостью и энергоемкостью. Необходимые эксплуатационные затраты на содержание этих систем, нередко находящихся на завершающей стадии эксплуатации, становятся неподъемными для многих хозяйств.

Поверхностный полив осуществляется с помощью орошения дождевальными установками и полива по бороздам, и оба эти вида полива вызывают эрозию почвенного слоя. Но при этом интенсивность эрозионных процессов в значительно большей степени возрастает при поливе по бороздам. Этот способ полива в последние десятилетия используют в основном по причине дороговизны системы орошения дождеванием [1-3]. В связи с этим, например, в регионах Северо-Кавказского федерального округа РФ ежегодно выводятся из строя десятки тысяч гектар сельскохозяйственных земель. Кроме того, при поверхностном поливе по бороздам теряется до 30% оросительной воды ввиду нерациональной системы устройства и эксплуатации поливных борозд. Существующие мелиоративные системы поверхностного полива, построенные еще в Советском Союзе на прибрежных зонах малых рек, характеризуются низкой эффективностью работы, часто находятся в нерабочем эксплуатационном состоянии, нуждаются в реконструкции, сдерживают восстановление деградированных земель и развитие комплексной мелиорации в целом.

Цель исследований: подготовка и рекомендация к внедрению ряда технических решений по возведению биоинженерных систем для небольших оросительных систем поверхностного полива по бороздам с использованием новых природоохранных приемов мелиорации земель.

Материалы и методы исследований. В настоящее время отсутствуют полновесные научно обоснованные методы и рекомендации

по проектированию и строительству экологически эффективных водозаборных сооружений, мелиоративных систем поверхностного полива по бороздам, предназначенных для восстановления земель, подверженных эрозии, а также для восстановления их локальных нарушенных участков [4, 5]. Для их создания в качестве методов исследований были использованы натурные обследования и аналитические разработки, базирующиеся на оценке состояния существующих водозаборных сооружений мелиоративных систем поверхностного полива и гидротехнических сооружений, входящих в их состав. Наряду с этим оценивались современное состояние оросительных систем, эффективность и экологическая безопасность их работы.

В рамках направления «Биоинженерные технологии защиты и обустройства земель прибрежных и рекреационных зон», разрабатываемого под руководством С.О. Курбанова, и выполнения проекта РНФ «Совершенствование методов инженерно-мелиоративного обустройства малых водных объектов АПК» была выдвинута концепция создания биоинженерных систем для защиты и восстановления нарушенных земель. Помимо большого количества вариантов новых защитно-регуляционных сооружений биопозитивной конструкции [6, 7], были предложены и разработаны 4 варианта малой мелиоративной системы поверхностного полива по бороздам с максимальным использованием местных и безопасных искусственных материалов [9, 10]. Особенно подробно натурные и аналитические исследования были проведены на гидросооружениях оросительных системах поверхностного полива, расположенных в границах предгорных участков малых рек Кабардино-Балкарской Республики. Их базовой основой являются биопозитивные изделия в виде гибких тьюфяков цилиндрической формы, выполненных из природных и экологически безопасных искусственных материалов, завернутых в геосетку, одновременно

являющиеся эффективной противоэрозионной защитой мелиорируемых земель и средством заполнения поливных борозд. В результате проведенных исследований подготовлен и рекомендован к внедрению ряд технических решений по возведению биоинженерных систем для небольших оросительных систем поверхностного полива по бороздам с использованием новых природоохранных приемов мелиорации земель.

Результаты и их обсуждение. При создании экологически ориентированных гидромелиоративных систем из всего многообразия гидротехнических сооружений, входящих в их состав, можно вычлени ряд основных, рассмотреть особенности их предлагаемых инновационных решений с признаками биоинженерных систем защиты, аналогичных решениям, используемым при обустройстве прибрежных участков малых

водных объектов [11-16]. По истечении времени эти новые конструктивные элементы выполняются необходимые для обеспечения надежности гидротехнических сооружений и биологической безопасности орошаемых земель, а также водных объектов, задействованных вместе с ними, защитные функции и служат для повышения продукционного потенциала мелиорированных агроландшафтов АПК, незаметно «сливаясь» с природным ландшафтом (рис. 1).

В качестве крепления откосов мелиоративного канала хорошо показала себя в работе конструкция из габионных тюфяков с армирующими гибкими плитами, запатентованная сотрудниками Кабардино-Балкарского ГАУ им. В.М. Кокова и РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева (рис. 2) [11]. Крепление откоса в виде подпорной стенки состоит

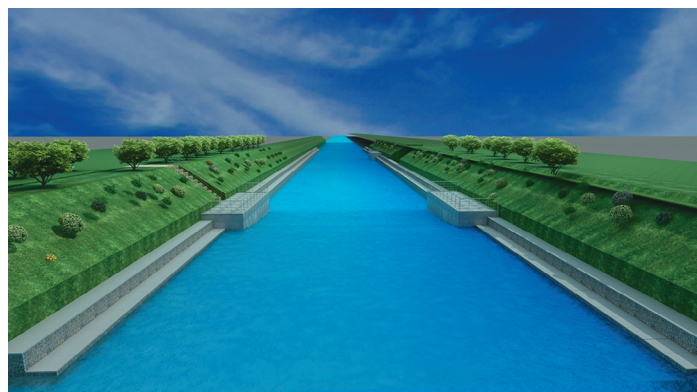


Рис. 1. Модель берегоукрепительных мероприятий на канале экологически ориентированной мелиоративной системы или малого водотока при ревитализации (разработана под руководством канд. техн. наук С.О. Курбанова)

Fig. 1. Model of bank protection measures on the canal of an ecologically oriented reclamation system or a small watercourse during revitalization (developed under the guidance of S.O. Kurbanov, candidate of technical sciences)

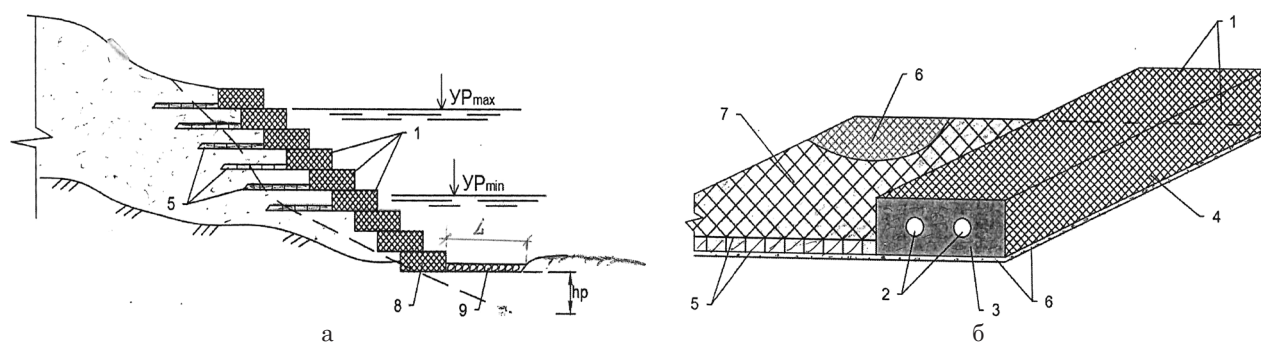


Рис. 2. Укрепление мелиоративного канала армогрунтовой конструкцией, патент № 2801714, 2023 г. [11]:

а – ступенчатое крепление откоса; б – габионный тюфяк с гибкой армирующей плитой
1 – габионный тюфяк, 2 – дренажные перфорированные трубы, 3 – геомат, 4 – габионная сетка,
5 – гибкие армирующие плиты, 6 – стеклопластиковая сетка, 7 – объемные георешетки

Fig. 2. Reinforcement of the reclamation canal with a reinforced soil structure, patent No 2801714, 2023 [11]:

a – stepped slope fastening; b – gabion mattress with flexible reinforcing plate
1 – gabion mattress, 2 – perforated drainage pipes, 3 – geomat, 4 – gabion mesh,
5 – flexible reinforcing plates, 6 – fiberglass mesh, 7 – volumetric geogrid

из многоступенчато уложенных габионных тюфяков, выполненных из дренажных перфорированных труб, геомата и габионной сетки. К основанию габионных тюфяков прикреплены гибкие армирующие плиты, состоящие из стеклопластиковой сетки и объемных георешеток. К основанию первого ряда габионных тюфяков прикреплена гибкая плита с направлением в наружную сторону в виде фартука, устроенного вдоль русла водотока и нагруженного сверху гравием и галькой.

Такое крепление обладает высокой степенью гибкости и водопроницаемости. При этом основные гидродинамические нагрузки грунтового массива и фильтрационного потока воды воспринимают габионные тюфяки с армирующими элементами, ступенчато врезанными в откосе. Виду гибкости входящих в него тюфяков и плит, связывающих грунт слоями, возникает их совместная работа с грунтовым массивом, обеспечивающая стабильную устойчивость обрушаемого откоса, перехват и отвод фильтрационного потока из окружающего грунтового массива. Вследствие этого по линии поверхности возможного обрушения грунтового массива и вдоль границ армирующих плит возникают необходимые силы трения и сцепления грунтов, эффективно удерживающие обрушаемый грунтовой массив от возможного сползания.

С использованием объемных георешеток, прикрепленных к сеткам из стеклопластика и габионным тюфякам, удерживающие силы растут более чем в 2 раза, чем при сдвигающих силах. Кроме того, предусмотренный у подошвы сооружения гибкий фартук, нагруженный сверху гравием и галькой, предотвращает подмыв у подошвы сооружения и сдвиг откосного крепления. При таком конструктивном решении одновременно обеспечиваются полный перехват и безопасный отвод профильтрованной грунтовой воды из дренажных устройств тюфяков и поверхностного стока с прибрежного склона.

Геоматы – геокомпозиционные искусственные материалы из полимерных скрепленных монофиломентов, считающиеся в настоящее время универсальными и экологически безопасными материалами, интенсивно используются по всему миру для борьбы с эрозией почв и без ограничения применяются во многих отраслях водохозяйственного строительства для любых почв по характеристике и состоянию [8]. Использование геомата в габионных тюфяках не только повышает водопроницаемость и гибкость конструкции, но и способствует сохранению влаги в теле сооружения в течение длительного времени. Это

благоприятно влияет на фитомелиоративную ситуацию на укрепленном участке: улучшаются условия для прорастания трав и кустарников на откосах водопроницающего сооружения, на приканальном участке создается устойчивый растительный слой.

Полевые обследования показали, что в целом подпорная стенка армогрунтовой конструкции обеспечивает надежную защиту прибрежным зонам естественных и искусственных водотоков на их предгорных и равнинных участках в местах потенциально возможного размыв русла и обрушения грунтовых откосов. По результатам теоретических и полевых исследований с учетом опыта эксплуатации в четырех вариантах разработана новая, более эффективная мелиоративная система поверхностного полива по бороздам. Первые две конструкции природоохранной мелиоративной системы (варианты 1 и 2) базируются на основе использования природных материалов в виде тюфяков и фашинов из камыша [13, 14]. Третий и четвертый варианты используют искусственные, экологически безопасные материалы (геоматы, геосетки и др.). Их по выполняемым функциям можно отнести к противоэрозионным мелиоративным системам поверхностного полива по бороздам [15, 16].

Все 4 варианта малых мелиоративных систем поверхностного полива рассчитаны для условий прибрежных зон малых водотоков и предгорных участков мелиоративного агроландшафта. Для обеспечения их стабильной водоподдачи вкуче с ними разработаны подрусовые водозаборные сооружения, которые обеспечивают одновременно и очистку от наносов, и забор воды из-под русел малых рек. Один из таких вариантов противоэрозионной мелиоративной системы поверхностного полива по бороздам приведен на рисунке 3.

Противоэрозионная мелиоративная система поверхностного полива по бороздам состоит из гибкого трубопровода с водовыпускными шлангами, поливных борозд (разработанных с уклоном на определенном расстоянии друг от друга), дренажных тюфяков, уложенных в борозды и выполненных из перфорированных полимерных труб с ребрами жесткости и геомат, обмотанных вокруг труб в 2...3 слоя. При этом трубчатые дренажные тюфяки с ребрами жесткости вокруг завернуты в сетчатую оболочку. Все борозды сверху дренажных тюфяков засыпаны выравнивающим слоем растительного грунта толщиной 8...12 см.

В малой мелиоративной системе поливные борозды, заполненные дренажными

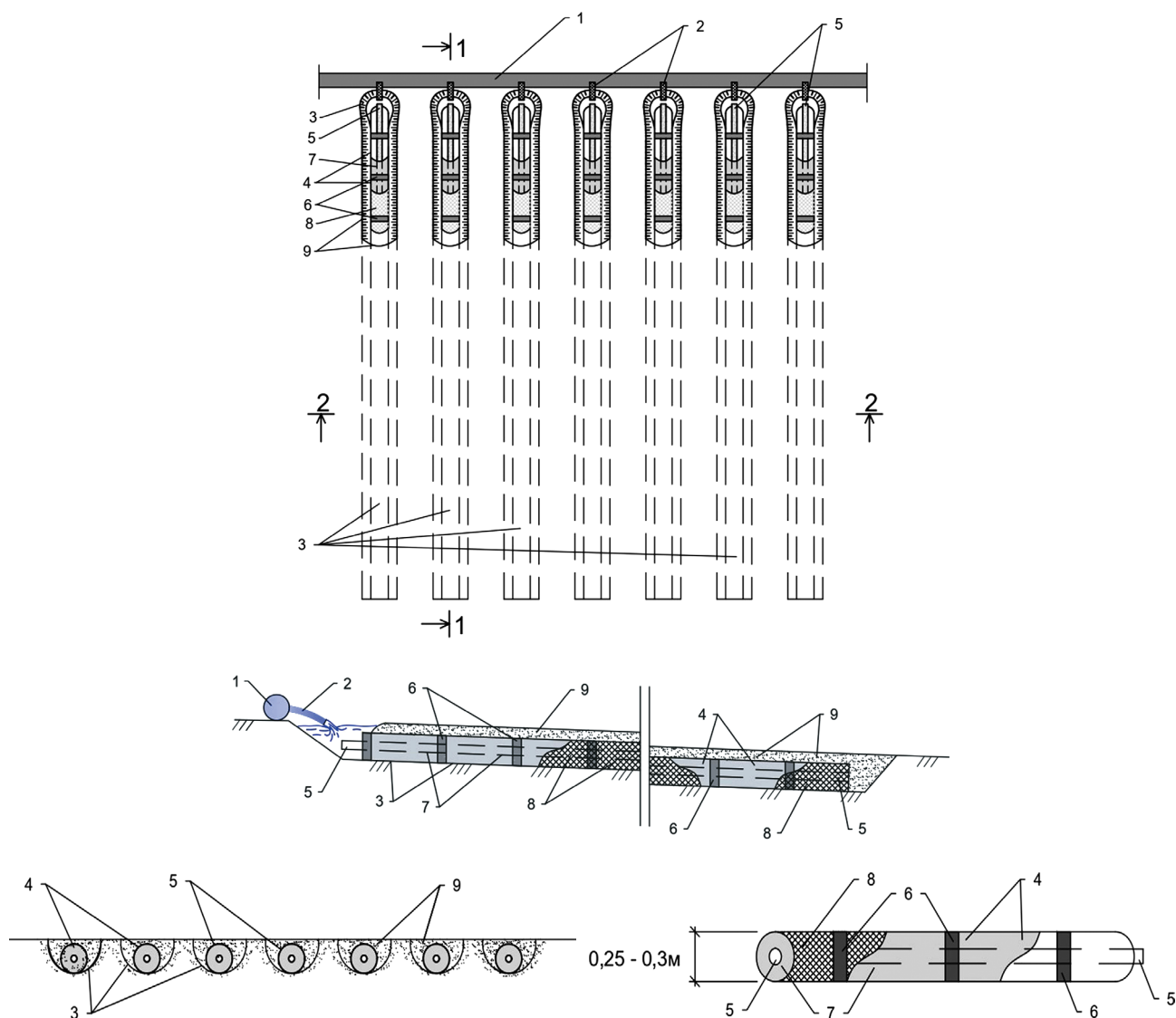


Рис. 3. Противоэрозионная мелиоративная система поверхностного полива по бороздам.

Патент № 2800368, 2023 г. [15]:

а – план участка мелиоративной системы поверхностного полива по бороздам;

б – сечение гибкого трубопровода по продольной оси борозды; в – поперечное сечение борозд

с трубчатыми дренажными тюфяками; г – трубчатый дренажный тюфяк

1 – гибкий трубопровод, 2 – водовыпускные планги, 3 – поливные борозды, 4 – дренажные тюфяки,

5 – перфорированные полимерные трубы, 6 – ребра жесткости, 7 – геомат, 8 – сетчатая оболочка,

9 – слой растительного грунта

Fig. 3. Anti-erosion reclamation system of surface irrigation along furrows. Patent No. 2800368, 2023 [15]

a – site plan of the surface irrigation reclamation system along the furrows;

b – the section of the flexible pipeline along the longitudinal axis of the furrow;

b – cross-section of furrows with tubular drainage mattresses; g – tubular drainage mattress

1 – flexible pipeline, 2 – outlet hoses, 3 – irrigation furrows, 4 – drainage mattresses,

5 – perforated polymer pipes, 6 – stiffeners, 7 – geomat, 8 – mesh shell, 9 – a layer of vegetable soil

водонасыщенными тюфяками, работают эффективно и надежно, долгое время удерживают воду, тем самым способствуя сохранению и повышению качества растительного слоя. В результате эффективность работы поливных борозд повышается до 30%. Вместе с тем наличие в дренажных тюфяках ребер жесткости и металлической габионной сетки (как оболочка) обеспечивает надежную работу поливных

борозд и защиту от воздействия колес сельхозтехники. Для этого толщина ребер жесткости и расстояние между ними, диаметр металлических проволочек и размер ячеек габионной сетки принимают из условия обеспечения несущей способности борозд и дренажных тюфяков с учетом возможных нагрузок используемой сельхозтехники при посеве и уборке урожая. В любом случае расстояние участка дренажной трубы

между ребрами жесткости должно составлять не более 1,0...1,2 м. Из этих условий и обеспечения технологичности изготовления и укладки тюфяков наиболее эффективной является их длина в 2,0...2,5 м.

Предлагаемые (в 4-х вариантах) мелиоративные системы поверхностного полива по бороздам характеризуются высокой эффективностью работ. Конструктивно-технологические особенности обустройства их поливных борозд благоприятно влияют на противэрозионную защиту и сохранение растительного слоя земли, а также на снижение потерь оросительной воды. Один из разработанных подрусловых водозаборов комбинированной конструкции, предназначенный для водообеспечения малой мелиоративной системы поверхностного полива по бороздам, представлен на рисунке 4 [12].

Подрусловой водозабор содержит водосборную галерею с фильтрующим водоприемником, которая выполнена в виде лотка. По его верху устроена водоприемная часть из расположенных друг над другом слоев металлической решетки, габионных дренирующих тюфяков и георешеток с заполненными ячейками из щебня. Дренирующий наполнитель тюфяков изготовлен из нескольких слоев геомата и двух ниток перфорированных труб, которые укладываются послойно

и заворачиваются в габионную сетку с приданием призматической формы тюфяку. В концевой части лотка 1 устроен водосборный колодец 8 призматической формы, по верху которого уложена водоприемная часть, аналогичная лотку, так, чтобы металлические решетки, ряды габионных тюфяков и георешеток с щебнем по уровню и уклону совпадали. Предлагаемый водозабор комбинированной конструкции наиболее эффективно может быть использован на горных и предгорных участках малых рек со сложными гидрологическими и климатическими условиями в формировании нового мелиоративного комплекса, в том числе при поверхностном поливе по бороздам [13-16].

Более 10 вариантов аналогичных подрусловых и горизонтальных водозаборных сооружений, защищенных патентами на изобретения, разработаны под руководством С.О. Курбанова. Документально доказано, что их внедрение и использование для подачи воды на орошение в мелиоративных системах предгорных зон имеют значительный экономический эффект. Поэтому отсутствует необходимость устройства ирригационных отстойников, соответственно энергетические затраты уменьшаются не менее чем в 2 раза, а себестоимость подаваемой оросительной воды снижается более чем на 40%.

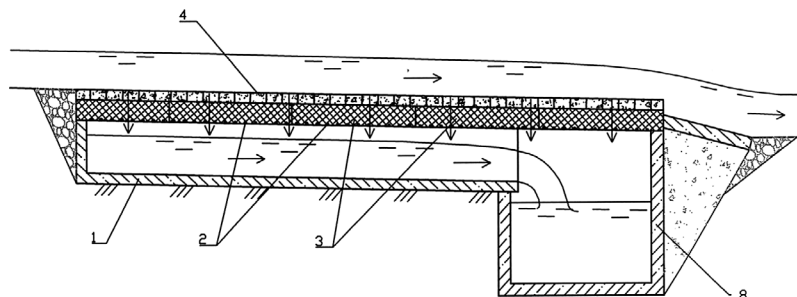


Рис. 4. Подрусловой водозабор комбинированной конструкции.

Патент № 2747488, 2021 г. [12]

1 – лоток, 2 – слой металлической решетки, 3 – габионные дренирующие тюфяки, 4 – георешетки

Fig. 4. A sub-surface water intake of a combined design. Patent No. 2747488, 2021 [12]

1 – tray, 2 – layer of metal grating, 3 – gabion drainage mattresses, 4 – geogrid

Выводы

Результаты выполненных натурных исследований и мониторинговых наблюдений на мелиоративных системах предгорных и горных участков мелиоративных систем АПК в границах Северо-Кавказского федерального округа, полученные в последние годы, позволяют оценить обоснованность применения биоинженерных технологий при защите и обустройстве малых водных объектов и мелиоративных систем поверхностного полива по бороздам. Разработанные биопозитивные элементы мелиоративных

систем поверхностного полива по бороздам (крепление, водозаборы, дренажные устройства и пр.) из природных и геокомпозитных материалов характеризуются высокой эффективностью, конструктивно-технологические особенности обустройства их поливных борозд благоприятно влияют на противэрозионную защиту и сохранение растительного слоя земли, а также на снижение потерь воды на орошение. При их использовании затраты уменьшаются примерно в 2 раза, а себестоимость подаваемой воды снижается более чем на 40%.

Список использованных источников

1. Краснощекоев В.Н., Ольгаренко Д.Г. Модернизация мелиоративных систем как главный фактор обеспечения продовольственной и экологической безопасности страны // Природообустройство. 2016. № 4. С. 51-57.
2. Кривицкий С.В. Методы биоинженерной геэкологии при проведении экологической реабилитации природных объектов // Вестник МГСУ. 2009. № 4. С. 285-290.
3. Черных О.Н., Ханов Н.В. Водные объекты в АПК и их эксплуатация // Картофель и овощи. 2019. № 11. С. 6-10.
4. Курбанов С.О., Ханов Н.В., Черных О.Н. Проблемы и пути решения вопросов инженерной защиты и восстановления прибрежных нарушенных земель городских территорий // Природообустройство. 2023. № 1. С. 38-46.
5. Курбанов С.О., Созаев А.А. Новые конструктивные и технологические решения по водозаборным сооружениям мелиоративных систем предгорных зон // Вода и экология: проблемы и решения. № 4 (84). С. 24-31.
6. Курбанов С.О. Экологически эффективные технологии регулирования малых рек и строительства мелиоративных водозаборов / Созаев А.А., Чапаев Т.М., Сасиков А.С. // International agricultural journal: Электронный научный журнал. 2020. № 6. URL: <https://iaceu/index.php/ia/article/view/315>.
7. Курбанов С.О., Созаев А.А. Обоснование концепции создания биоинженерных систем защиты и восстановления земель прибрежных и рекреационных зон // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 8. С. 34-39.
8. Гурьев А.П. Использование композиционных геоматов для борьбы с водной эрозией / Ханов Н.В., Еремеев А.В., Козлов К.Д. Монография. М.: РГАУ-МСХА, 2020. 253 с.
9. Kurbanov S., Sozaev A., Shogenov A., Karshiev A. Bioengineering systems for the protection and improvement of urbanized areas of coastal and recreational areas // In the collection: Innovative Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems (ITEEA 2021). E3S Web of Conferences 1st International Scientific and Practical Conference. 2021. Pp. 30-35.
10. Kurbanov S.O., Sozaev A.A., Balkizov A.B. Effective technical solutions for channel regulation small rivers and construction of reclamation water intakes // Science Education Practice proceedings of the International University Science Forum (Canada, Toronto). 2020. September 30. Infinity Publishing. Pp. 117-130.
11. Подпорная стенка армогрунтовой конструкции для защиты прибрежных зон от обрушения и размыва: Патент № 2801714. Российская Федерация, МПК E02B 3/06 / Ханов Н.В., Курбанов С.О., Черных О.Н. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Российский государственный аграрный университет имени К.А. Тимирязева». № 2022128586. Заяв. 03.11.2022; Опубл. 15.08.2023. Бюл. № 23.
12. Подрусловой водозабор комбинированной конструкции: Патент 2747488. Российская Федерация, МПК E02B 9/14 / Курбанов С.О., Балкизов А.Б. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова». № 2020131884. Заяв. 25.09.2020; Опубл. 05.05.2021. Бюл. № 13.

References

1. Krasnoshchekov V.N., Olgarenko D.G. Modernization of reclamation systems as the main factor in ensuring the country's food and environmental security // Prirodoobustrojstvo. 2016. No. 4. P. 51-57.
2. Krivitsky S.V. Methods of bioengineering geocology when carrying out environmental rehabilitation of natural objects // Bulletin of MGSU. No. 4. 2009. P. 285-290.
3. Chernykh O.N., Khanov N.V. Water bodies in the agro-industrial complex and their exploitation // Potatoes and vegetables: scientific and practical. magazine 2019. No. 11. P. 6-10.
4. Kurbanov S.O., Khanov N.V., Chernykh O.N. Problems and ways to solve issues of engineering protection and restoration of coastal disturbed lands in urban areas // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 1. P. 38-46.
5. Kurbanov S.O., Sozaev, A.A. New design and technological solutions for water intake structures of reclamation systems in foothill zones // Water and ecology: problems and solutions. No. 4(84). P. 24-31.
6. Kurbanov S.O. Environmentally effective technologies for regulating small rivers and constructing reclamation water intakes / Sozaev A.A., Chapaev T.M., Sasikov A.S. // Electronic science. magazine "International agricultural journal" and published in No. 6/2020: <https://iaceu/index.php/ia/article/view/315>.
7. Kurbanov S.O., Sozaev A.A. Justification of the concept of creating bioengineering systems for the protection and restoration of lands in coastal and recreational zones // Ecology and Industry of Russia. 2020. V. 24. No. 8. P. 34-39.
8. Guryev A.P. The use of composite geomats to combat water erosion / Guryev A.P., Khanov N.V., Eremeev A.V., Kozlov K.D., Monograph.M.: RGAU-MSHA, 2020. 253 p.
9. Kurbanov S., Sozaev A., Shogenov A., Karshiev A. Bioengineering systems for the protection and improvement of urbanized areas of coastal and recreational areas / In the collection: innovative Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems (ITEEA 2021). E3S Web of Conferences 1st International Scientific and Practical Conference. 2021. P. 30-35.
10. Kurbanov S.O., Sozaev A.A., Balkizov A.V. Effective technical solutions for channel regulation of small rivers and construction of reclamation water intakes / Science Education Practice proceedings of the International University Science Forum (Canada, Toronto), September 30, 2020. – Infinity Publishing. P. 117-130.
11. Patent No. 2801714 Russian Federation MPK E02B 3/06 Retaining wall of reinforced soil structure to protect coastal zones from collapse and erosion. Khanov N.V., Kurbanov S.O., Chernykh O.N.; applicant and patent holder FSBEI HPE Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev. No. 2022128586; application 03.11.2022; publ. 08/15/2023, Bulletin. No. 23. 6 p.: ill.
12. Patent 2747488 Russian Federation IPC E02B9/14. Under-river water intake of a combined design. Kurbanov S.O., Alkmzov A.B.; applicant and patent holder FSBEI HPE Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokova. No. 2020131884; application 09.25.2020; publ. 05/05/2021, Bulletin. No. 13. 6 p.: ill.
13. Patent 2760475 Russian Federation IPC A01G 25/00. Environmental reclamation system of surface irrigation along furrows. Kurbanov S.O., Sozaev A.A., Dudarova F.T.; applicant and patent holder FSBEI HPE Kabardino-Balkarian State Agrarian University named

13. Природоохранная мелиоративная система поверхностного полива по бороздам: Патент 2760475. Российская Федерация, МПК А01G 25/00 / Курбанов С.О., Созаев А.А., Дударова Ф.Т. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова». № 2021116066. Заяв. 02.06.21; Опубл. 25.11.2021. Бюл. № 33.

14. Способ возведения природоохранной мелиоративной системы поверхностного полива по бороздам: Патент 2760474. Российская Федерация, МПК А01G 25/06 / Курбанов С.О., Дударова Ф.Т. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова». № 2021116062. Заяв. 02.06.21; Опубл. 01.12.2021. Бюл. № 34.

15. Способ возведения противозерозионной мелиоративной системы поверхностного полива по бороздам: Патент 2800368. Российская Федерация, МПК А01G 25/00 / Курбанов С.О., Абдулхаликов Р.З., Дударова Ф.Т. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова». № 2022131539. Заяв. 01.12.22; Опубл. 20.07.2023. Бюл. № 20.

16. Противозерозионная мелиоративная система поверхностного полива по бороздам: Заявка № 2022131452 / Курбанов С.О., Дударова Ф.Т. Заявитель «ФГБОУ ВПО Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова». Заяв. 01.12.2022. Положительное решение на выдачу патента на изобретение от 03.07.2023 г.

Об авторах

Ханов Нартмир Владимирович, д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой гидротехнических сооружений; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Курбанов Салигаджи Омарович, канд. техн. наук, доцент; WoS ResearcherID: AAB-7875-2020; Scopus AuthorID: 70062553868; ORCID: 0000-0001-5230-7053; SPIN-код: 2067-1130; AuthorID: 361638; Kurbanov-salih@rambler.ru

Черных Ольга Николаевна, канд. техн. наук, доцент; WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-код: 7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Дударова Фатима Толовна, научный сотрудник; ORCID: 0000-0003-0191-5950; fdudarova@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Ханов Н.В., Курбанов С.О., Черных О.Н., Дударова Ф.Т. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Authors' contributions

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 06.03.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 10.06.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 10.06.2024

after. V.M. Kokova. No. 2021116066; application 02.06.21; publ. 11/25/2021, Bulletin. No. 33. 6 p.: ill.

14. Patent 2760474 Russian Federation IPC A01G 25/06. A method for constructing an environmental reclamation system for surface irrigation along furrows. Kurbanov S.O., Dudarova F.T.; applicant and patent holder FSBEI HPE Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after. V.M. Kokova. No. 2021116062; application 02.06.21; publ. 12/01/2021, Bulletin. No. 34. 6 p.: ill.

15. Patent 2800368 Russian Federation IPC A01G 25/00. A method for constructing an anti-erosion reclamation system for surface irrigation along furrows. Kurbanov S.O., **Abdulkhalikov R.Z.**, Dudarova F.T.; applicant and patent holder FSBEI HPE Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after. V.M. Kokova. No. 2022131539; application 01.12.22; publ. 07/20/2023, Bulletin. No. 20. 6 p.: ill.

16. **Application No.** 2022131452. Anti-erosion reclamation system for surface irrigation along furrows. Kurbanov S.O., **Dudarova F.T.** Applicant FSBEI HPE Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after. V.M. Kokova. Application 12/01/2022. Positive decision to issue a patent for an invention dated 07/03/2023.

About the authors

Nartmir V. Khanov, DSc (Eng), professor, Head of the Department of Hydraulic Engineering Structures; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Saligadzi O. Kurbanov, CSc (Eng), associate professor, WoS ResearcherID: AAB-7875-2020; Scopus AuthorID: 70062553868; ORCID: 0000-0001-5230-7053; SPIN-код: 2067-1130; AuthorID: 361638; Kurbanov-salih@rambler.ru

Olga N. Chernikh, DSc (Eng), professor WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-код: 7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Fatima T. Dudarova, researcher, ORCID: 0000-0003-0191-5950; fdudarova@mail.ru

Khanov N.V., Kurbanov S.O., Chernykh O.N., Dudarova F.T. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-75-82>

УДК 626.01: 504.45:627.142.2

**ИСТОЧНИКИ ПЕСЧАНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ БЕРЕГОЗАЩИТЫ
МОРСКОГО БЕРЕГА БАЛТИЙСКОЙ КОСЫ**Р.Б. Закиров^{1✉}, Б.В. Чубаренко¹, Е.М. Бурнашов²¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН; 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36, Россия² ГБУ КО «Балтберегозащита»; 238560, г. Светлогорск, ул. Хуторская, 1, Россия

Аннотация. Цель исследования – выполнить расчет объема песчаного материала для укрепления размываемого участка берега Балтийской косы (Юго-Восточная Балтика, Калининградская область), обсудить возможные источники песчаного материала и сравнить положительные и отрицательные стороны их использования. В работе представлена схема планируемого берегоукрепления размываемого участка морского берега Балтийской косы и текущее состояние уже установленных фрагментов берегозащиты. Площадь и объем намыва оценивались с помощью ГИС-инструментов. Установлено, что для реализации комплексного берегозащитного проекта требуется от 100 до 200 тыс. м³ песчаного материала. В качестве источников материала рассмотрены вдольпляжевый байпасинг, а также использование дополнительного материала: либо материала дноуглубления Калининградского морского канала, либо запасов морских донных отложений нагонной дельты в Калининградском заливе. Вдольпляжевый байпасинг и использование запасов нагонной дельты являются наиболее дешевыми и дорогими способами (соответственно), и оба требуют специальной оценки последствий своего применения. Использование материала дноуглубления (вернее изменение района его сброса) может оказаться наиболее оптимальным, так как весь процесс по его изъятию и дампингу в морскую среду уже налажен, но потребуются серьезные вложения из организации рефулерной станции. В принципе любой подход с добавлением песчаного материала из внешних источников в систему вдольберегового переноса является наиболее привлекательным для аварийного участка морского берега Балтийской косы с точки зрения устойчивости берегозащитного решения.

Работа выполнена при поддержке темы № FMWE-2024-0025 государственного задания ИО РАН. Авторы выражают благодарность коллегам из ГБУ КО «Балтберегозащита» за предоставленные данные.

Ключевые слова: береговая абразия, берегоукрепление, песчаный материал, байпасинг, Балтийское море, Балтийская коса

Формат цитирования: Закиров Р.Б., Чубаренко Б.В., Бурнашов Е.М. Источники песчаного материала для берегозащиты морского берега Балтийской косы // Природообустройство. 2024. № 4. С. 75-82. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-75-82>

Original article

**SOURCES OF SAND MATERIAL FOR COASTAL PROTECTION
OF THE BALTIC SPIT SEASHORE**R.B. Zakirov^{1✉}, B.V. Chubarenko¹, E.M. Burnashov²¹ P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; 117997, Moscow, Nakhimovsky Prospekt, 36, Russian Federation² State Budgetary Organization of Kaliningrad Oblast "Baltberegozashchita"; 238560, Svetlogorsk, Khutorskaya str., 1, Russia

Abstract. The purpose of the article is to calculate the volume of sand material required for coastal protection of the eroded section of the shore of the Baltic Spit (South-Eastern Baltic, Kaliningrad Oblast), discuss possible sources of sand material and compare the positive and negative aspects of their use. A scheme of the best effective planned protection structure and the current state of the already installed coast

protection fragments are presented. The area and volume of alluvium needed to complete the protection were assessed using GIS tools. It was found that the implementation of a comprehensive coastal protection project requires from 100 thousand to 200 thousand m³ of sand material. As sources of material, the along-beach bypassing was considered, as well as the use of extra material – either material from dredging the Kaliningrad Sea Canal, or the sea bottom sediments of the near-inlet surge delta in the Vistula Lagoon. Along-beach bypass and the use of surge delta material are the cheapest and most expensive methods, respectively, and both require a special assessment of the consequences of their use. The use of dredging material (or rather, the changing the area of its discharge) may turn out to be the most optimal, because the entire process for dredging and dumping of the material into the marine environment has already been established technically and legally, but it will require serious investments in organizing a refill station. In principle, any approach with the addition of sandy material from external sources to the alongshore transport system is most attractive due to the sustainability of this coastal protection solution.

The work was carried out with the support of the topic no. FM-2024-0025 of the state assignment of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences. The authors express their gratitude to colleagues from SBO KO “Baltbergozashchita” for the data provided.

Keywords: coastal abrasion, shore protection, sandy material, bypass, Baltic Sea, Baltic spit

Format of citation: Zakirov R.B., Chubarenko B.V., Burnashov E.M. Sources of sand material for coastal protection of the Baltic Spit seashore // Prirodoobustrojstvo. 2024. № 4. P. 75-82. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-75-82>

Введение. Дефицит песчаных наносов в прибрежной морской зоне юго-восточной Балтики приводит к постоянной береговой абразии [1, 2]. Штормовая обстановка в юго-восточной Балтике характерна для осенне-зимнего периода, а весной и летом, когда море спокойно, пляж формируется снова [3], что служит индикатором механизма накопления песчаных наносов и эолового материала вдоль уреза.

Активному размыву подвергается 3-километровый сегмент морского побережья Балтийской косы (рис. 1) [4], примыкающий к оградительным молам входного участка Калининградского морского канала. Средняя за последние 100 лет скорость отступления берега составляет до 1 м/год [5]. Из исторических данных известно, что на данном участке берега предпринимались попытки замедлить абразию, но берегозащитные сооружения до наших дней не уцелели, и берег продолжает размываться [6]. В последние десятилетия данная тенденция только усиливается, что обостряет угрозу окончательного разрушения исторического форта «Западный», расположенного вблизи уреза воды, и подтопления расположенного на берегу поселка Коса [7, 8].

Основной причиной размыва служит нарушение естественного хода гидро-литодинамических процессов в результате строительства в 1768-1840 гг. оградительных молов Калининградского морского канала, выдвинутых в море фактически на 1 км [9]. Под воздействием преобладающих сильных ветров юго-западных и западных румбов происходит локальный нагон воды в образованный между береговой линией и южным оградительным молом угол. При оттоке

воды формируются компенсационные придонные течения, которые уносят песчаный материал и препятствуют образованию пляжей – естественной защиты от прямого воздействия волн.

В рамках концепции развития комплексной системы защиты побережья Калининградской области до 2025 года на аварийных участках морского побережья предусмотрено строительство пляжеудерживающих сооружений в сочетании с искусственным поддержанием состояния пляжей путем механического перемещения песчаного материала (механический вдольбереговой байпасинг) [10]. Данный подход в совокупности со строительством пляжеудерживающих сооружений планируется для реализации в том числе на морском побережье Балтийской косы.

Материалы и методы исследований.

В качестве исходных материалов использованы архивные батиметрические данные подводного берегового склона морского берега Балтийской косы, фрагмент спутникового снимка и современная схема берегоукрепления. Батиметрические данные получены в 2018-2020 гг. в ходе полевых экспедиций лаборатории прибрежных систем Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и в ходе изыскательных работ ГБУ КО «Балтбергозащита». Фрагмент спутникового снимка получен в программе QGIS с использованием модуля «QuickMapServices», схема берегозащиты (рис. 2) предоставлена ГБУ КО «Балтбергозащита».

В программе QGIS схема берегозащиты была привязана к фрагменту спутникового снимка, затем на их основе оцифрованы элементы берегозащитных сооружений, оценена площадь

гидротехнических работ. По батиметрическим данным и положению линии уреза воды построена цифровая модель рельефа (ЦМР) с размером сетки 10×10 м. Объем подсыпки песчаного материала рассчитывался в границах расчетной области от поверхности ЦМР к референтным значениям высоты от относительного уровня моря с шагом 1 м.

Сравнение источников песчаного материала проводилось с учетом расстояния до района берегоукрепления, доступности необходимого объема материала, наличия механизма естественного восполнения после изъятия, степени антропогенного воздействия во время изъятия, методов транспортировки, критерия гранулометрического соответствия с материалом окружающих пляжей.

Проект комплексного берегоукрепления и современное состояние сооружения. Проект

берегозащиты рассматриваемого участка побережья предусматривает строительство пляжеудерживающих сооружений в сочетании с искусственным намывом берега (рис. 2). Основание разрушенной авандоны планируется укрепить заполненными песком мешками (биг-бегами).

Между корнем южного мола и прилегающим берегом планируется возвести непроницаемую шпунтовую стенку с внешней каменной отсыпкой. Конфигурация шпунтовой стенки будет сглаживать существующий угол между берегом и молом, а область между шпунтом и линией уреза планируется заполнить песчаным материалом (область намыва). Южнее намывной области планируется установить несколько рядов свайных бун, а мористее (на 5-метровой глубине) установить 3 секции подводных волноломов параллельно берегу.

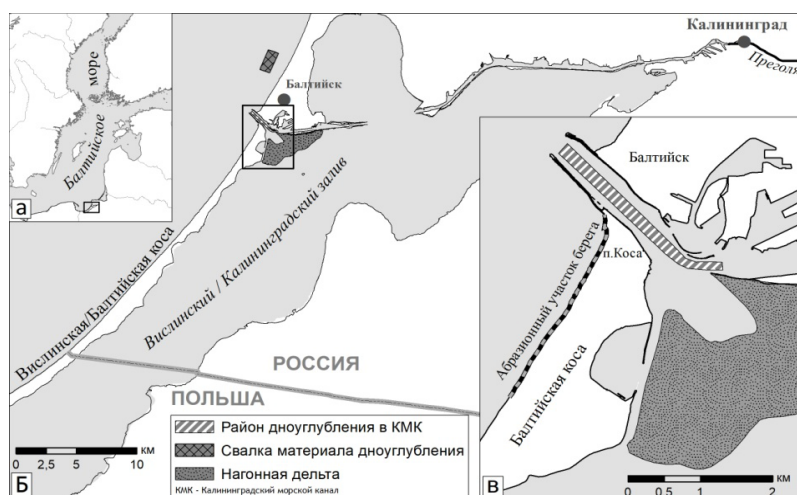


Рис. 1. Район исследования:

а – юго-восточная часть Балтийского моря;

б – Балтийская коса, входные ворота Калининградского морского канала;

в – абразионный участок Балтийской косы с указанием возможных источников песчаного материала

Fig. 1. Study area: a – the south-eastern part of the Baltic Sea and the Baltiysk Spit;

б – the inlet gates of the Kaliningrad Sea Canal;

с – the eroded shore segment of the Baltic Spit with indication of potential sources of sand material

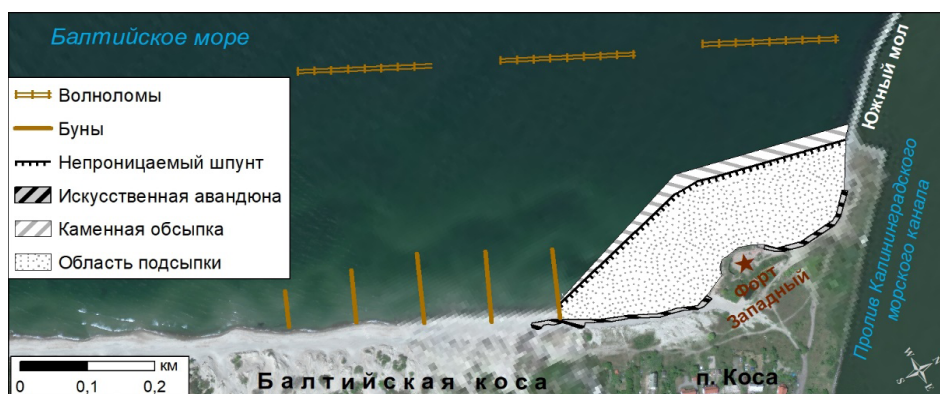


Рис. 2. Схема планируемого берегоукрепления (источник – ГБУ КО «Балтберегозащита»)

Fig. 2. Scheme of the planned sea shore protection (source: State Budgetary Organisation of Kaliningrad Oblast «Baltberegozaschita»)

Биг-бэги для сооружения искусственной авандюны и область намыва планируется заполнить отложениями надводной части пляжа: с применением экскаваторов и грузовиков на стабильных участках пляжа планируется изъять 0,5-метровый слой пляжных отложений. Предполагается, что изъятый песок будет восполняться под воздействием эолового переноса и вдольбереговых течений. Такой метод механического перемещения наносов пляжа (вдольбереговой байпасинг) ранее успешно применялся на аварийных участках побережья Куршской косы, городов Зеленоградска и Балтийска, где уклоны подводного берегового склона составляют менее 0,015. В благоприятный летний период под действием умеренного волнения, вдольбереговых течений и эолового переноса через 2-3 недели после извлечения песка происходило восстановление морфологических характеристик пляжа.

ГБУ КО «Балтберегозащита» приступила к реализации первой очереди данного проекта берегоукрепления летом 2022 г. На участке берега между основанием южного мола и историческим фортом «Западный», а также далее по берегу южнее форта на длине 0,3 км были проведены временные ремонтно-восстановительные работы, сооружена искусственная авандюна (рис. 3). Данное сооружение состоит из четырех слоев (в каждом слое – 4 ряда) геосинтетических мешков (биг-бэгов), объем каждого мешка составляет 1 м³. Мешки в слоях и рядах не скреплены, но обернуты полотнами геосинтетического материала таким образом, что ряды консолидированы между собой. Эти полотна поддерживают мешки верхнего слоя двух первых рядов за счет того, что верхние слои третьего и четвертого рядов прижимают их концы своим весом. Для заполнения геосинтетических мешков использовался песчаный материал с надводной части пляжа, при этом профиль участка пляжа, с которого брался материал (в летний период 2022 г.), восстановился к зимнему штормовому сезону (2022-2023 гг.).

После штормового осенне-зимнего сезона 2023-24 гг. в центральной части северного сегмента искусственной авандюны (длина сегмента – 125 м) биг-бэги переднего ряда нижнего слоя порвались, а песок из них был вымыт. Биг-бэги верхних слоев (2 ряда) обрушились, и в искусственной авандюне образовался разрыв шириной более 30 м (рис. 3). Сложившаяся ситуация является неустойчивой, и ширина разрыва искусственной авандюны будет увеличиваться.

Причина повреждения мешков нижнего слоя заключается в том, что на мелководье перед

северным сегментом искусственной авандюны много гальки, кусков кирпича и обломков бетона, источником которых служат стены форта. Во время шторма обломочный материал подхватывается волнами и при ударе разрывает геотекстильную ткань. В результате повреждения нижнего слоя произошла частичная просадка конструкции с последующим обрушением верхних рядов. Однако южнее форта «Западный», где крупный обломочный материал не скапливается, конструкция искусственной авандюны находится в стабильном состоянии.

Искусственная авандюна – это сооружение, которое может быть подвержено повреждениям, и проект предусматривает достаточную толщину конструкции, чтобы штормовые волны не разрушили объект за несколько штормов. Тем не менее ядро искусственной авандюны из геосинтетического материала не предназначено для прямого контакта с крупными наносами во время воздействия прибоя, так как геотекстильная ткань не защищена от механического воздействия обломочного материала.

К настоящему времени угроза полного разрушения северного участка искусственной авандюны обостряется, поэтому необходимо ее либо регулярно восстанавливать, либо реализовать комплексный проект берегоукрепления путем намыва участка суши.

Объем необходимого для проекта берегозащиты песчаного материала. Исходя из схемы планируемого берегозащитного сооружения, область подсыпки песчаного материала со стороны моря будет ограничена непроницаемым шпунтом, а со стороны берега – искусственной авандюной, размеры планируемой области подсыпки составляют 500 × 100 м, площадь – 53 000 м², глубины в ее пределах – до 3 м (рис. 4).

По результатам расчета установлено, что для заполнения области подсыпки до отметки уровня воды необходимо около 70 000 м³ песчаного материала. Если затем поднимать уровень подсыпки с шагом 1 м, то необходимо добавлять примерно по 50 000 м³ (табл. 1).

Возможные источники песчаного материала. Для реализации изложенного проекта берегозащиты главным на повестке дня остается вопрос об источнике необходимого объема песка для заполнения области подсыпки.

Следуя уже отработанной технологии ГБУ КО «Балтберегозащита» по изъятию отложений надводной части пляжей, можно оценить протяженность участка, который необходимо задействовать для получения требуемого объема песчаного материала. Исходя из данных спутниковых



а

б

в

Рис. 3. Повреждение искусственной авандюны из биг-бэгов (сегмент укрепления севернее исторического форта «Западный»):

а – снимок от 7 октября 2023 г.; б – снимок от 4 ноября 2023 г.; в – снимок от 28 января 2024 г.

Fig. 3. Damage of the foredune made from artificial bigbags (protection segment north of the historical fort “Zapadny”):

a – photo dated 10.07.2023; b – photo dated 04.11.2023; c – photo dated 01.28.2024

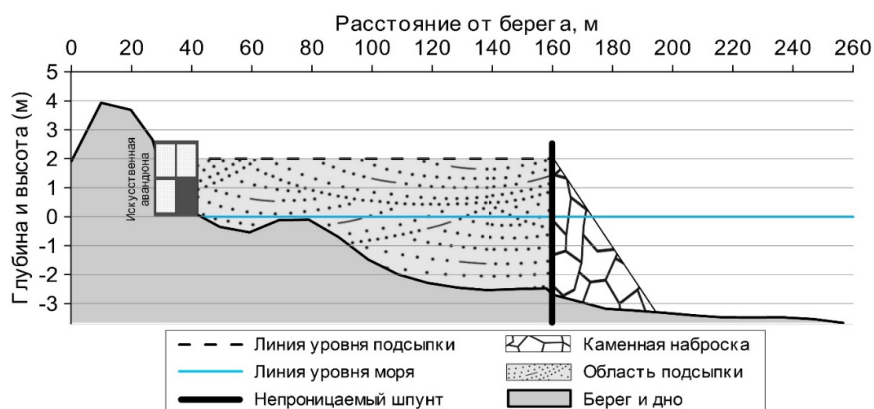


Рис. 4. Схематичный разрез области подсыпки планируемого берегозащитного сооружения

Fig. 4. Schematic section of backfilling area of the planned coast protection structure

Таблица 1. Объем песчаного материала до достижения референтной отметки уровня

Table 1. Volume of sand material until the reference level is reached

Мощность слоя подсыпки, м / Backfill layer thickness, m	1,0	2,7	3,7	4,7
Объем подсыпки, м ³ / Backfill volume, m ³	70 000	110 000	160 000	210 000

снимков стабильные участки морского берега Балтийской косы расположены на удалении более 3 км от рассматриваемого района берегоукрепления, средняя ширина пляжей на этих участках составляет 21 м. Учитывая, как минимум, 3-метровый отступ от основания авандюны и уреза воды, для изъятия песка допустимо использовать участок пляжа шириной 15 м. Таким образом, при изъятии 0,5-метрового слоя песка для разового получения 70000 м³ протяженность рабочего участка составит 9,3 км (табл. 2). Для разового получения каждой добавки в 50000 м³ протяженность рабочего участка должна удлиниться еще на 6,6 км, или же для последующего изъятия очередных 50000 м³ необходимо ожидать полного восстановления профиля пляжа в следующем сезоне либо еще дольше.

В качестве альтернативных источников песка могут быть использованы продукты дноуглубления морской части Калининградского

морского канала, которые в настоящее время сбрасываются на морском подводном отвале, расположенном в акватории Балтийского моря севернее входных молов на удалении 6 км от рассматриваемого района берегоукрепления (рис. 1). Ранее в [11] предлагалось использование этого материала для целей берегозащиты и отмечалась достаточная однородность и необходимая крупность песка, получаемого при дноуглублении. Суть данного предложения заключается в подаче материала дноуглубления с земснаряда через южный мол напрямик на пляж и в область подсыпки, при этом длина необходимого для рефулирования пульпопровода составит менее 300 м (табл. 2). По данным 2008-2016 гг., в районе входной части Калининградского морского канала ежегодно извлекается около 30000 м³/год [12]. Исходя из этого, для заполнения области подсыпки до отметки референтного значения высоты 1 м потребуется 4 года (табл. 2).

Еще одним источником песчаных отложений может служить нагонная дельта Калининградского залива (рис. 1), расстояние от которой до рассматриваемого района берегоукрепления составляет 4-5 км, кратчайшее расстояние до берега Балтийской косы – 2 км (табл. 2).

По последним оценкам, объем доступных отложений нагонной дельты составляет более 6,5 млн м³, и она подпитывается преимущественно мелкозернистым морским песком (0,1-0,25 мм), который квалифицируется как чистый, так как он (аналогично материалу, изымаемому при дноуглублении), заносится со стороны моря [13, 14]. Отложения нагонной дельты в достаточном количестве обеспечивают необходимый объем для области подсыпки, однако для его извлечения необходимо организовать полный комплекс изыскательных, дноуглубительных и транспортировочных работ.

Результаты и их обсуждение. Вдольбереговой и эоловый переносы песчаных наносов определяют общее состояние морского побережья Балтийской косы. Если во время работ по сбору песчаных наносов надводной части пляжа (для вдольберегового байпасинга) будет соблюден баланс между извлекаемым объемом и скоростью восполнения, то метод механического перемещения наносов пляжа не нарушит природного равновесия. Однако к настоящему времени для

побережья Балтийской косы отсутствуют количественные оценки эолового и подводного вдольберегового переносов, поэтому сейчас невозможно оценить, извлечение какого объема песка с надводной части пляжа не нарушит природного равновесия.

Использование материала донных наносов (либо материала дноуглубления, либо отложений нагонной дельты в Калининградском заливе) обеспечивает добавление в систему существующего вдоль берегового переноса материала извне, поэтому данный подход наиболее устойчив с точки зрения обеспечения устойчивости равновесного состояния побережья.

Использование материала нагонной дельты в силу большого объема запасов и возможности за один сезон обеспечить все потребности проекта берегоукрепления может показаться привлекательным, но для его реализации необходимы крупные капиталовложения и анализ оценки воздействия.

Работы по дноуглублению Калининградского морского канала осуществляются регулярно в течение многих лет, а изъятый материал сбрасывается на морской отвал севернее входных ворот канала. Использование материала дноуглубления для намыва берега будет сопровождаться изменением места дампинга. Конечно, для реализации этой схемы придется организовывать постоянно действующую рефулерную

Таблица 2. Характеристика сравнения способов обеспечения необходимого песчаного материала

Table 2. Characteristics of comparison of methods for providing the required sand material

Характеристика сравнения источников песчаного материала <i>Characteristics of comparison of sources of sand material</i>	Песчаные наносы пляжа <i>Beach sand deposits</i>	Отложения нагонной дельты <i>Sediments of the surge delta</i>	Материалы дноуглубления <i>Dredging materials</i>
Критерий гранулометрического соответствия <i>Granulometric compliance criterion</i>	Идентичны <i>Identical</i>	Среднезернистый, мелкозернистый <i>Medium and fine grain</i>	Крупнозернистый, среднезернистый <i>Coarse, medium grain</i>
Расстояние до района берегоукрепления, км <i>Distance to the sea shore protection area, km</i>	3-12	4-5	0,3
Доступный объем для разового изъятия, м³ <i>Available volume for one-time extraction, m³</i>	Неизвестно <i>Unknown</i>	4,5 млн <i>4.5 million</i>	30 000
Скорость восполняемости, м³/год <i>Replenishment rate, m³/year</i>	Неизвестно <i>Unknown</i>	Неизвестно <i>Unknown</i>	30 тыс./год <i>30 thousand / year</i>
Время заполнения области подсыпки <i>Required time to fill the area</i>	Более одного сезона <i>More than one season</i>	Возможно за один сезон <i>Possibly in one season</i>	4 года <i>4 years</i>
Степень загрязнения окружающей среды во время изъятия <i>Degree of environmental contamination at the time of extraction</i>	Низкая <i>Low</i>	Высокая <i>High</i>	Средняя <i>Average</i>
Вред биологическим сообществам во время изъятия <i>Damage to biota during extraction</i>	Да <i>Yes</i>	Да <i>Yes</i>	Да <i>Yes</i>

станцию в основании южного мола и получать необходимые разрешения.

Следует отметить, что использование любых подводных запасов подразумевает работы с извлечением песчаного материала из моря или залива, и для реализации этого подхода необходимо пройти соответствующие экспертизы на федеральном уровне. К тому же, разработка донных отложений и выброс пульпы на берег требуют выплаты компенсации за ущерб биоресурсам.

Выводы

Критическое состояние северного сегмента искусственной авандоны требует скорейшего обновления работ по берегоукреплению, так как при текущей скорости разрушения имеющееся сооружение утратит берегозащитную функцию уже через 1-2 штормовых сезона.

Реализация комплексного берегозащитного проекта (волноломы, буны, шпунтовая стенка с каменным укреплением, искусственная территория и пляж) дистальной 3-километровой части Балтийской косы требует от 100 до 200 тыс. м³ песчаного материала.

В качестве источников материала возможен вдольпляжевый байпасинг (сбор,

перемещение и использование песчаного материала верхнего слоя пляжа на расстоянии до 9 км от объекта), а также использование дополнительного материала: либо материала дноуглубления Калининградского морского канала, либо запасов морских донных отложений нагонной дельты в Калининградском заливе.

В принципе любой подход с добавлением песчаного материала в систему вдольберегового переноса извне наиболее привлекателен с точки зрения устойчивости берегозащитного решения и поддержания равновесного состояния берега, но является заведомо более дорогим.

Вдольпляжевый байпасинг и использование запасов нагонной дельты являются наиболее дешевыми и дорогими способами соответственно, и оба требуют специальной оценки воздействия на окружающую среду и последствий своего применения.

Использование материала дноуглубления (вернее изменение района его сброса) может оказаться наиболее оптимальным, так как весь процесс по его изъятию и дампингу в морскую среду уже налажен. Реализация этого подхода потребует капиталовложений по организации рефулерной станции.

Список использованных источников

1. **Бабаков А.Н., Чубаренко Б.В.** Береговая абразия // В кн.: Система Балтийского моря / Под ред. А.П. Лисицына. М.: Научный мир, 2017. С. 122-178.
2. **Karmanov K., Burnashov E., Chubarenko B.** Contemporary dynamics of the sea shore of Kaliningrad Oblast // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 2018. Т. 65, № 2. С. 143-159.
3. **Bobykina V., Chubarenko B., Karmanov K.** Morphodynamics of the shore of the Vistula Spit (the Baltic Sea) in a period of 2002-2015 by results of in-situ measurements // In: Managing risks to coastal regions and communities in a changing world. Proc. Int. Conf. EMECS'11-SeaCoasts XXVI, Saint-Petersburg, 22-27 August, 2016. Saint-Petersburg, RSHU, 2016. Pp. 130-140. DOI: 10.21610/conferencearticle_58b4315ec153d.
4. **Бобыкина В.П., Карманов К.В.** Динамика берегов вершины Гданьского залива и связь с антропогенным воздействием // Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ: Труды Международной конференции «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водоемов» (Новосибирск, 20-25 июля 2009 г.). Новосибирск, 2009. С. 119-124.
5. **Закиров Р.Б., Чубаренко Б.В.** Входной участок Калининградского залива как природно-техническая система // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 1. С. 48-59. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.48.59>
6. **Басс О.В.** Эволюция взаимодействия природных и техногенных процессов в ходе строительства порта Балтийск // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2007. № 7. С. 35-43.

References

1. **Babakov A.N., Chubarenko B.V.** Coastal abrasion. // System of the Baltic Sea. / Under. ed. Lisitsyn A.P. (scientific editor), Lukashin V.N., Nemirovkaya I.A., Starodymova D.P. (ed. coll.) M.: Scientific world, 2017. (608 p.). ISBN978-5-91522-445-1. P. 122-178.
2. **Karmanov K., Burnashov E., Chubarenko B.** Contemporary dynamics of the sea shore of Kaliningrad Oblast // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 2018. V. 65. No. 2. P. 143-159.
3. **Bobykina V., Chubarenko B., Karmanov K.** Morphodynamics of the shore of the Vistula Spit (the Baltic Sea) in a period of 2002-2015 by results of in-situ measurements. [In] "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world". Proc. Int. Conf. EMECS'11-SeaCoasts XXVI, Saint-Petersburg, 22-27 August, 2016. Saint-Petersburg, RSHU, 2016. ISBN978-5-369-00829-4. P. 130-140. DOI: 10.21610/conferencearticle_58b4315ec153d.
4. **Bobykina V.P., Karmanov K.V.** Dynamics of the shores of the top of the Gulf of Gdansk and the connection with anthropogenic impact // Creation of artificial beaches, islands and other structures in the coastal zone of seas, lakes and reservoirs: tr. international conf. "Creation and use of artificial land plots on the banks and water areas of reservoirs" (Novosibirsk, July 20-25, 2009). Novosibirsk: 2009. P. 119-124.
5. **Zakirov R.B., Chubarenko B.V.** The entrance area of the Kaliningrad Bay as a natural-technical system // Russian Journal of Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 48-59. – DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.48.59>
6. **Bass O.V.** Evolution of the interaction of natural and man-made processes during the construction of the Baltiysk port // Bulletin of the Russian State University named after. I. Kant. 2007. No. 7. P. 35-43.

7. Соколов А.Н., Чубаренко Б.В., Карманов К.В. Гидродинамические условия в береговой зоне Балтийской, Вислинской косы и Самбийского полуострова: шторм января 2012 года // Известия КИТУ. 2016. № 43. С. 67-77.

8. Stont Zh.I., Bobykina V.P., Ulyanova M.O. «Diving» cyclones and consequences of their impact on the coasts of the South-Eastern Baltic Sea // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Vol. 23. ES2001. <https://doi.org/10.2205/2023ES000827>

9. Бабаков А.Н., Чубаренко Б.В. Структура результирующего вдольберегового транспорта наносов в восточной части Гданьского залива // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 4. С. 370-384. <https://doi.org/10.1134/S0097807819040031>

10. Концепция развития комплексной системы защиты побережья Калининградской области до 2025 года. URL: <http://bbz39.ru/data/file/16f461c05535043566ee01510a006e38.doc> (дата обращения: 05.09.2023).

11. Чечко В.А. О динамике береговой зоны моря в районе оградительных молов Калининградского морского канала / Чубаренко Б.В., Болдырев В.Л., Бобыкина В.П. и др. // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 6. С. 1-11.

12. Закиров Р.Б. Динамика эрозионной депрессии на входе в Калининградский залив / Чубаренко Б.В., Сологуб С.П., Шушарин А.В. // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2018. Т. 26. С. 46-59. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.46>

13. Закиров Р.Б., Чубаренко Б.В., Чечко В.А. Гидролитодинамические условия движения наносов через Балтийский пролив (Калининградский залив, Балтийское море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 52-68. DOI: 10.22449/2413-5577-2022-4-52-68. EDN: ZKQZYX.

14. Закиров Р.Б., Чубаренко Б.В., Чечко В.А. Геоэкологическая оценка песчаных отложений бара на входе в Калининградский-Вислинский залив // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8 (110). Ч. 1. С. 192-198. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.032>

Об авторах

Закиров Руслан Баядитович, канд. географ. наук; научный сотрудник; ORCID ID: 0000-0003-0125-374X, ResearcherID: AFB-2669-2022, Scopus Author ID: 57222497041, AuthorID: 1023893; zakirov.ruslan.kaliningrad@yandex.ru

Чубаренко Борис Валентинович, канд. физико-мат. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией прибрежных систем; ORCID ID: 0000-0001-7988-1717, ResearcherID: I-6118-2016, Scopus Author ID: 6507102508, AuthorID: 61116; chuboris@mail.ru

Бурнашов Евгений Михайлович, канд. географ. наук; директор ГБУ КО «Балтберегозащита», AuthorID: 1182251; beregozaschita@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Закиров Р.Б. – формулировка задачи, сбор, обработка и анализ данных, подготовка схем, работа с текстом статьи.
Чубаренко Б.В. – формулировка проблемы, стилистическое и содержательное редактирование текста статьи.
Бурнашов Е.М. – научная и инженерная консультация в вопросах берегозащиты.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 26.04.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 19.05.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 19.05.2024

7. Sokolov A.N., Chubarenko B.V., Karmannov K.V. Hydrodynamic conditions in the coastal zone of the Baltic/Vistula Spit and the Sambian Peninsula: storm of January 2012 // Izvestia KSTU. 2016. No. 43. P. 67-77.

8. Stont Zh.I., Bobykina V.P., Ulyanova M.O. «Diving» cyclones and consequences of their impact on the coasts of the South-Eastern Baltic Sea. Russian Journal of Earth Sciences, 2023. Vol. 23, ES2001. <https://doi.org/10.2205/2023ES000827>

9. Babakov A.N. Chubarenko, B.V. Structure of the resulting alongshore sediment transport in the eastern part of the Gulf of Gdansk // Water Resources. 2019. V. 46, no. 4. P. 370-384. <https://doi.org/10.1134/S0097807819040031>

10. Concept for the development of an integrated system for protecting the coast of the Kaliningrad region until 2025 [Electronic document]. – Access mode: <http://bbz39.ru/data/file/16f461c05535043566ee01510a006e38.doc>, free. – (date of access 09/05/2023)

11. Chechko V.A. On the dynamics of the coastal zone of the sea in the area of the protective piers of the Kaliningrad Sea Canal / Chubarenko B.V., Boldyrev V.L., Bobykina V.P. // Water resources. 2008. V. 35, No. 6. P. 1-11.

12. Zakirov R.B. Dynamics of erosion depression at the entrance to the Kaliningrad Bay / Chubarenko B.V., Sologub S.P., Shusharin A.V. // News of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences. 2018. V. 26. P. 46-59.

13. Zakirov R.B., Chubarenko B.V., Chechko V.A. Hydrolithodynamic conditions of sediment movement through the Baltic Strait (Kaliningrad Bay, Baltic Sea) // Ecological safety of the coastal and shelf zones of the sea. 2022. No. 4. P. 52-68. EDN: ZKQZYX. doi: 10.22449/2413-5577-2022-4-52-68

14. Zakirov R.B., Chubarenko B.V., Chechko V.A. Geoecological assessment of sand bar deposits at the entrance to the Kaliningrad-Vistula Lagoon. / International scientific research journal. 2021.No. 8(110). Part 1. P. 192-198. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.032>

Author information

Ruslan B. Zakirov, CSc (Geography), PhD in Geography; Researcher; ORCID ID: 0000-0003-0125-374 X, ResearcherID: AFB-2669-2022, Scopus Author ID: 57222497041, AuthorID: 1023893; zakirov.ruslan.kaliningrad@yandex.ru

Boris V. Chubarenko, CSs (Phys-Math), PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Head of the Laboratory for Coastal Systems Study; ORCID ID: 0000-0001-7988-1717, ResearcherID: I-6118-2016, Scopus Author ID: 6507102508, AuthorID: 61116; chuboris@mail.ru

Evgeniy M. Burnashov, CSc (Geography), deputy director for monitoring and safety of the state organization “Baltberegozastita”; AuthorID: 1182251; beregozaschita@mail.ru

Zakirov R.B. – formulation of the problem, collection, processing and analysis of data, preparation of diagrams, work with the text of the article.

Chubarenko B.V. – principal problem statement, stylistic and content editing of the article text.

Burnashov E.M. – scientific and engineering consultation on coastal protection issues.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-83-91>

УДК 556.18:627.41: 626/627



СОСТОЯНИЕ ВОДОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ ОТ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ

Б.А. Середовских[✉], В.В. Дерябина, Д.А. Ярош

Нижевартовский государственный университет; 628609, г. Нижневартовск, ул. Дзержинского, 19, Россия

Аннотация. Для Ханты-Мансийского автономного округа – Югры характерны опасные гидрологические явления, сопровождающиеся воздействием на территории населенных пунктов, причем актуальным становится создание эффективной инженерной защиты территорий, подверженных затоплению и разрушению береговой линии. Цель исследований – анализ состояния водозащитных сооружений в населенных пунктах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Результатом исследований стало обновление сведений о наличии и состоянии системы защиты населенных пунктов от гидрологических опасностей. Выявлена необходимость защиты населения и территорий от негативного воздействия вод для 150 населенных пунктов. В то же время фиксируется значительная часть населенных пунктов, не обеспеченных должным образом водоохранными сооружениями: в 44 поселениях отсутствуют противопаводковые дамбы, а в 32 – сооружения инженерной защиты береговой линии. Установлена необходимость строительства и реконструкции противопаводковых дамб общей протяженностью 57328 пог. м и берегоукрепительных сооружений (36978 пог. м).

Ключевые слова: гидрологические опасности, затопление территории, береговая эрозия, водоохранные сооружения, инженерная защита береговой линии

Формат цитирования: Середовских Б.А., Дерябина В.В., Ярош Д.А. Состояние водозащитных сооружений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры для защиты населения и территорий от гидрологических опасностей // Природообустройство. 2024. № 4. С. 83-91. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-83-91>

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 22-17-20011 «Оценка трансформации ландшафтов в условиях изменения климата на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югры».

Original article

CONDITION OF WATER PROTECTION STRUCTURES OF KHANTY-MANSIYSK AUTONOMOUS OKRUG – YUGRA FOR PROTECTION OF THE POPULATION AND TERRITORIES FROM HYDROLOGICAL HAZARDS

В.А. Seredovskikh[✉], V.V. Deryabina, D.A. Yarosh

Nizhnevartovsk state university, 19 Dzerzhinskogo str., Nizhnevartovsk, 628609, Russia

Abstract. The Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Ugra is characterized by dangerous hydrological phenomena accompanied by impact on the territory of settlements. Moreover, the creation of effective engineering protection of territories prone to flooding and destruction of the coastline becomes an urgent issue. The purpose of the study: to analyze the state of water protection structures in the settlements of the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra. The result of the study was an update of information on the availability and state of the system for protecting settlements from hydrological hazards. The need to protect the population and territories from the negative impact of water for 150 settlements was revealed. At the same time, a significant part of settlements is recorded that are not properly provided with water protection facilities: in 44 settlements there are no flood control dams, and in 32 there are no engineering structures for the protection of the coastline. The need for the construction and reconstruction of flood control dams on the total length of 57328 linear meters and bank protection structures (36978 linear meters) was identified.

Keywords: hydrological hazards, flooding of the territory, coastal erosion, water protection structures, engineering shoreline protection

Format of citation: Seredovskikh B.A., Deryabina V.V., Yarosh D.A. Condition of water protection structures of Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra for protection of the population and territories from hydrological hazards // Prirodoobustrojstvo. 2024. № 4. P. 83-91. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-83-91>

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of the project No 22-17-20011 “Assessment of landscape transformation under the conditions of climate change in the territory of the Khanty-Mansiysk autonomous okrug-Yugra”.

Введение. Масштабы и повторяемость воздействия опасных гидрологических явлений на территории Российской Федерации в последнее время ежегодно возрастают. Масштабные наводнения на реках Курганской, Тюменской и Оренбургской областей в текущем 2024 г. привели к затоплению обширных территорий, под воздействием половодья оказались более 190 населенных пунктов. Несмотря на циклический характер проявления высоких уровней вод в реках, приводящих к затоплению прилегающих территорий, на это накладывают отпечаток, по нашему мнению, и флуктуационные проявления резких климатических изменений, о чем свидетельствуют наблюдения многих авторов [1-3].

Защита населения и территорий является актуальной задачей и для Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, на территории которого ввиду региональных особенностей природных условий большинство населенных пунктов расположено по берегам рек. Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, расположенный в пределах сильно заболоченной и заозеренной Западно-Сибирской низменности, является регионом с развитой гидрологической сетью, принадлежащей бассейну реки Обь [4]. На территории округа имеют проявление такие гидрологические опасности, как наводнение и разрушение береговой линии, что представляет угрозу для жизни и благосостояния людей, а также для инфраструктуры и экологической устойчивости региона.

Решающее значение для снижения риска этих угроз и обеспечения безопасности населения и территорий в ХМАО – Югре должно иметь создание всесторонней и эффективной инженерной защиты от негативного воздействия вод. Такие мероприятия включают в себя использование различных инженерных методов, предназначенных для укрепления берегов рек и озер, защиты поселений от наводнений и предотвращения эрозии.

Следует отметить, что у правительства ХМАО – Югры в приоритете берегоукрепительные мероприятия, особенно в населенных пунктах, подверженных повышенному риску

наводнений и эрозии, инвестиции значительных ресурсов в строительство набережных, противозерозионных сооружений и благоустройство прибрежных зон. В то же время система защиты населения все еще далека до завершения, и для многих населенных пунктов гидрологическая опасность продолжает оставаться.

Цель исследований: анализ состояния водозащитных сооружений в населенных пунктах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Научная новизна исследований заключается в систематизации информации об опасностях гидрологического характера для населенных пунктов, о наличии и состоянии системы инженерной защиты от негативного воздействия вод.

Материалы и методы исследований. Первый, наиболее полный анализ данной проблемы был проведен специалистами ООО «Стройгеопроект» (ГК «Арктик-Энерджи») в 2011 г. на основе комплексного обследования водозащитных сооружений в населенных пунктах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, который позволил выявить существующее состояние и слабые места в инженерной защите территории [5]. В период 2018-2023 гг. специалистами научно-исследовательской лаборатории геоэкологических исследований кафедры географии Нижневартовского государственного университета проводились повторные исследования с целью оценки и уточнения современного состояния водоохраных сооружений на территории ХМАО – Югры. Проведено натурное обследование населенных пунктов, расположенных по берегам рек Оби, Иртыша и их крупных притоков: Конды, Ваха, Агана, Казыма, Северной Сосьвы – с целью выявления и фотофиксации территорий населенных пунктов, попадающих в зоны затопления паводковыми водами, а также других проявлений негативного воздействия вод. Выявлена и произведена фотофиксация существующих водозащитных сооружений, установлены характеристики (протяженности, материалов и конструкций исполнения) существующих водозащитных сооружений,

их состояния и функционирования, а также объектов социальной инфраструктуры и количества населения, попадающих в зону риска.

Информационной базой исследований также являлся анализ исходных данных: картографических материалов, гидрологической информации, интенсивности проявлений негативного воздействия вод (затопления паводковыми водами, скорости переработки береговой линии и т.п.).

Результаты и их обсуждение. На основе картографического материала [8] проведен ландшафтно-типологический анализ местоположения населенных пунктов ХМАО – Югры в разрезе муниципальных образований, который позволил выявить населенные пункты, подверженные риску гидрологических опасностей. К ним относятся поселения, расположенные в поймах и на террасах рек, где проявляются или потенциально возможны затопления во время половодий и разрушения береговой линии (табл. 1).

Анализ показал, что из 194 поселений ХМАО – Югры 160 поселений (82,5%) потенциально находятся в зоне гидрологических опасностей.

На территории ХМАО – Югры наиболее опасными гидрологическими процессами, приводящими к нарушению жизнедеятельности человека, являются затопление и подтопление прибрежных территорий при прохождении весеннего паводка и сопутствующие им эрозионные процессы (береговая и овражная эрозия). Процессы затопления и подтопления развиты практически по всей территории округа. Исключение составляет северо-западная часть в пределах восточного склона Урала, а также незначительные хорошо дренируемые участки на возвышенностях: Люлимвор, Средне-Сосьвинская, Белогорский Материк, Сибирские Увалы и Аганский Увал.

Подтоплению и затоплению в паводковый период наиболее подвержены Березовский,

Таблица 1. Ландшафтно-типологический анализ местоположения населенных пунктов ХМАО – Югры

Table 1. Landscape-typological analysis of the location of settlements of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra

Муниципальные образования <i>Municipalities</i>	Населенные пункты <i>Settlements</i>	Местоположение поселений / <i>Location of settlements</i>					
		в поймах крупных рек <i>in floodplains of big rivers</i>	на террасах крупных и средних рек <i>on the terraces of big and medium-sized rivers</i>	на террасах малых рек <i>on the terraces of small rivers</i>	на берегах озер и межозерных пространствах <i>on lake shores and inter-lake areas</i>	на водораздельных пространствах <i>in the watershed spaces</i>	на заболоченной и заливочной местности <i>in a swampy and forested area</i>
Белоярский район <i>Beloyarsky region</i>	11	3	1	5	1	1	–
Березовский район <i>Berezovsky region</i>	24	3	8	12	–	1	–
Кондинский район <i>Kondinsky region</i>	27	–	18	–	5	3	1
Октябрьский район <i>Oktaybrsky region</i>	23	1	20	–	–	2	–
Нефтеюганский район <i>Nefteyugansky region</i>	11	4	–	5	–	2	–
Нижневартовский район <i>Nizhnevartovsky region</i>	19	5	2	10	–	–	2
Советский район <i>Sovetsky region</i>	9	–	–	–	–	9	–
Сургутский район <i>Surgutsky region</i>	27	7	5	14	1	–	–
Ханты-Мансийский район <i>Khanty-Mansiysky region</i>	29	4	23	–	–	–	2
Города окружного значения <i>Cities of the okrug</i>	14	–	7	3	–	2	2
ИТОГО / TOTAL	194	27 (13,9%)	84 (43,3%)	49 (25,3%)	7 (3,6%)	20 (10,3%)	7 (3,6%)

Октябрьский, Белоярский, Кондинский, Нефтеюганский, Нижневартовский, Сургутский и Ханты-Мансийский районы. Основные причины процесса – равнинность территории, избыточное увлажнение, слабый врез гидрографической сети и длительные подпорные явления. Для рек ХМАО характерно растянутое половодье: высота подъема воды колеблется от 450 до 750 см, иногда достигая 800-1000 см.

По данным Департамента региональной безопасности ХМАО – Югры, ежегодно составляется Реестр населенных пунктов округа, попадающих в зоны затопления (подтопления) при воздействии различных гидрологических и гидродинамических процессов и явлений, в который в 2024 г. вошли 46 поселений с населением 5421 чел. [9].

Кроме того, по результатам проведенного гидрологического и картографического анализа, выявлены еще 27 населенных пунктов, для которых опасность затопления носит эпизодический и частичный (менее 100 кв. м) характер. Итого в зону затопления в регионе попадают 73 поселения, общая площадь затопления населенных пунктов составляет 32750 кв. м (табл. 2).

При прохождении половодий редкой повторяемости в зоны затопления могут попадать жилые дома и производственные сооружения, что приводит к значительному материальному ущербу. В связи с этим представляет большую практическую значимость определение зон возможного затопления и составление перечней объектов, которые могут быть затоплены с различной вероятностью.

Для выявления зон затопления проведен гидрологический анализ критических уровней и расходов воды в реке, вызывающих затопление территории: на основе данных гидрологических ежегодников проанализированы ряды с продолжительностью наблюдений 55 лет и более [10]. Проведенный гидрологический и картографический анализ позволил установить критические уровни воды в реках ХМАО – Югры, при которых происходит затопление территории населенных пунктов (табл. 3).

Для ряда населенных пунктов построена гидрологически корректная цифровая модель рельефа по исходным данным и произведено моделирование зон затоплений, определен перечень объектов, попадающих в зону затопления.

Таблица 2. Населенные пункты ХМАО – Югры, попадающие в зоны затопления

Table 2. Settlements of Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra falling into flood zones

Муниципальные образования <i>Municipalities</i>	Кол-во поселений, подверженных затоплению <i>Number of settlements subject to flooding</i>	Водный объект <i>Water object</i>	Продолжительность затопления, дни <i>Duration of flooding, days</i>	Площадь затопления населенных пунктов, кв.м <i>Area of flooding of settlements, sq.m.</i>
Белоярский район <i>Beloyarsky region</i>	3	р. Обь / r. Ob	120-140	590
Березовский район <i>Berezovsky region</i>	11	р. Обь / r. Ob	120-150	200
		Северная Сосьва <i>Severnaya Sosjva</i>	80-90	1950
		р.Ляпин / r. Lyapin	65-70	540
Кондинский район <i>Kondinsky region</i>	10	р.Конда / r. Konda	120-150	6980
Октябрьский район <i>Oktaybrsky region</i>	7	р. Обь / r.Ob	80-120	2840
Нефтеюганский район <i>Nefteyugansky region</i>	4	р. Обь, Бол.Салым, Вандрас <i>r.Ob, Bolshoj Salym, Vandras</i>	80-120	1210
Нижневартовский район <i>Nizhnevartovsky region</i>	9	р. Обь / r. Ob	60-70	990
		р. Вах / r. Vakh	60-100	1430
Сургутский район <i>Surgutsky region</i>	7	р. Обь, / r. Ob	80-120	2120
Ханты-Мансийский район <i>Khanty-Mansiysky region</i>	17	р. Обь / r. Ob	70-90	4480
		р. Иртыш / r. Irtysh	60-70	4650
Города окружного значения <i>Cities of the okrug</i>	5	р. Обь / r. Ob	120-140	4770
ИТОГО / TOTAL	73			32750

Расчитаны зоны затопления при подъеме уровня воды в реке с шагом 0,1 м. Точность расчетов была оценена на основе сравнения с космическими снимками спутников Landsat и PlanetScore, а также с данными гидрологических постов [11]. Произведено картографирование зон затопления в пределах локальных участков данных населенных пунктов при уровнях половодья 1, 2, 4 и 10% обеспеченности (образец представлен на рис. 1).

Проведенный анализ состояния противопаводковых водоохранных сооружений показал, что в большей части населенных пунктов, подверженных опасности затопления в той или иной

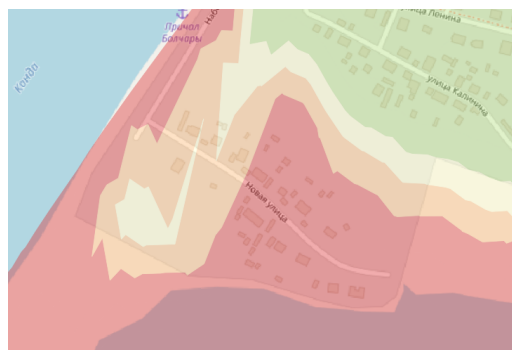
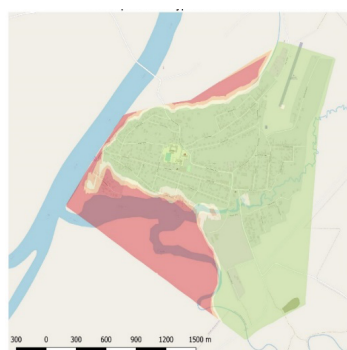
степени, водоохранные сооружения отсутствуют (44%) или представлены простейшими укреплениями в виде земляных валов (22%) (табл. 4). В основном это касается малых сельских поселений, в которых зоны затопления имеют локальный характер.

Противопаводковые дамбы в капитальном исполнении (11%) имеются только в 5 городах окружного значения (Нижневартовск, Сургут, Нефтеюганск, Ханты-Мансийск, Урай) и в поселках городского типа (Излучинск, Сергино и Междуреченский). Основным типом водоохранных сооружений в регионе являются дамбы обвалования (23%) в разном техническом

Таблица 3. Критические уровни воды, при которых происходит затопление территории населенных пунктов

Table 3. Critical water levels of flooding of the territory of settlements

Река <i>River</i>	Уровни воды разной обеспеченности <i>Water levels of different water availability</i>			Населенный пункт <i>Settlement</i>	Максимальные уровни весеннего половодья <i>Maximum spring flood levels</i>	
	5%	10%	50%		Средний многолетний <i>Multi-year average</i>	Критический (затопление территории нас. пунктов) <i>Critical (flooding of the territory of settlements)</i>
Обь <i>Ob</i>	1060	1020	923	Нижневартовск <i>Nizhnevartovsk</i>	857	1020
				Сургут / <i>Surgut</i>	742	860
				Сытомино / <i>Sytomino</i>	856	1150
				Белогорье / <i>Belogorje</i>	1043	1169
				Октябрьское / <i>Oktyabrskoe</i>	923	1040
Иртыш <i>Irtysk</i>	945	908	760	Ханты-Мансийск <i>Khanty-Mansiysk</i>	781	908
				Горноправдинск <i>Gornopravdinsk</i>	884	1030
Северная Сосьва <i>Severnaya Sosjva</i>	854	828	712	Няксимволь / <i>Nyaksimvol</i>	580	743
				Сосьва / <i>Sosjva</i>	679	780
				Игрим / <i>Igrim</i>	738	828
Конда <i>Konda</i>	555	506	484	Болчары / <i>Bolchary</i>	394	506
	272	241	181	Кондинское / <i>Kondinskoe</i>	168	241
	964	917	837	Алтай / <i>Altai</i>	725	917



Условные обозначения

Затопления

10% (раз в 10 лет)

4% (раз в 25 лет)

1% (раз в 100 лет)

Не затопливает

OSM Standard - подложка

Рис. 1. Картограмма зон затопления при уровнях разной обеспеченности (село Болчары)

Fig. 1. Map of flood zones at different levels of probability (Bolchary village)

исполнении и земляные валы, построенные хозяйственным способом без проектной документации (22%) (рис. 2).

Другим видом гидрологических опасностей, характерных для ХМАО – Югры, является береговая эрозия водотоков, приводящая к разрушению береговой линии. Полевые и камеральные исследования, проведенные научными сотрудниками лаборатории геоэкологических исследований НВГУ в 2018-2023 гг., позволили получить сведения о характеристиках размыва берегов и разрушении населенных пунктов, рассчитать прогнозы береговых деформаций. Всего на территории региона выявлено 77 населенных пунктов с риском

размыва береговой линии общей протяженностью 55728 м (табл. 5).

Только в 25 поселениях (32,5%) из всех обследованных населенных пунктов имеются берегоукрепительные сооружения, соответствующие требованиям и построенные на основе проектной документации. В 20 населенных пунктах такие сооружения построены хозяйственным способом без проектной документации, в основном путем отсыпки гравийно-каменной смеси либо в виде бревенчато-земляных насыпей, причем 8 из них находятся в аварийном состоянии (рис. 3).

В 32 поселениях (41,5%) берегоукрепительные сооружения отсутствуют, что в основном касается сельских поселений.

Таблица 4. Наличие и состояние противопаводковых сооружений

Table 4. Availability and condition of flood control structures

Муниципальные образования <i>Municipalities</i>	Кол-во населенных пунктов с риском затопления <i>Number of settlements at risk of flooding</i>	Наличие водоохраных сооружений <i>Availability of water protection structures</i>				
		противопаводковая дамба в капитальном исполнении <i>capitally flood control dam</i>	дамба обвалования <i>protection embankment dam</i>	земляные валы без проектной документации <i>earthfill dam without project documentation</i>	в т.ч. в аварийном состоянии <i>in disrepair</i>	отсутствуют <i>unavailability</i>
Белоярский район / <i>Beloyarsky region</i>	3	–	–	–	–	3
Березовский район / <i>Berezovsky region</i>	11	–	2	1	1	8
Кондинский район / <i>Kondinsky region</i>	10	1	3	4	3	2
Октябрьский район / <i>Oktyabrsky region</i>	7	1	1	–	1	5
Нефтеюганский район <i>Nefteyugansky region</i>	4	–	1	2	–	1
Нижневартовский район <i>Nizhnevartovsky region</i>	9	1	1	2	–	5
Сургутский район / <i>Surgutsky region</i>	7	–	1	1	–	5
Ханты-Мансийский район <i>Khanty-Mansiysky region</i>	17	–	8	6	–	3
Города окружного значения <i>Cities of the okrug</i>	5	5	–	–	–	–
ИТОГО / TOTAL	73	8 (11%)	17 (23%)	16 (22%)	5	32 (44%)

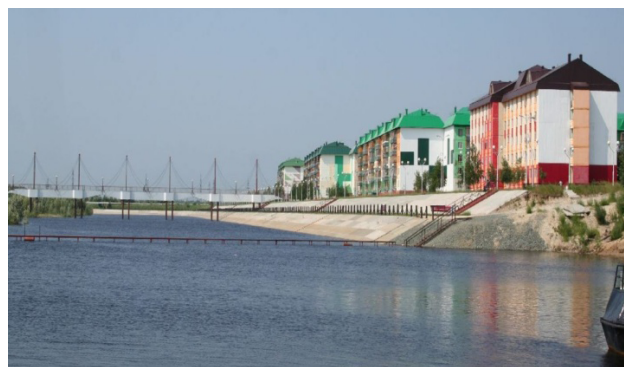


Рис. 2. Противопаводковые дамбы (А. пос. Кирпичный, Б. пос. Излучинск)

Fig. 2. Flood control dams (A. Kirpichny settlement, B. Izluchinsk settlement)

Таблица 5. Наличие и состояние берегоукрепительных сооружений

Table 5. Availability and condition of coastal protection structures

Муниципальные образования <i>Municipalities</i>	Поселения с риском размыва береговой линии <i>Settlements at risk of coastal erosion</i>	Наличие берегоукрепительных сооружений <i>Availability of coastal protection structures</i>				
		в капитальном исполнении <i>capitally</i>	на основе проектной документации <i>based on project documentation</i>	хоз. способ без проектной документации <i>without project documentation</i>	в т.ч. в аварийном состоянии <i>in disrepair</i>	отсутствуют <i>unavailability</i>
Белоярский район / <i>Beloyarsky region</i>	4	–	-	1	1	3
Березовский район / <i>Berezovsky region</i>	7		1	1		5
Кондинский район / <i>Kondinsky region</i>	9	1	-	5	2	3
Октябрьский район / <i>Oktyabrsky region</i>	8	1	2	2	1	3
Нефтеюганский район <i>Nefteyugansky region</i>	4			2		2
Нижневартовский район <i>Nizhnevartovsky region</i>	14	1	4	3	2	6
Сургутский район / <i>Surgutsky region</i>	10		4	2		4
Ханты-Мансийский район <i>Khanty-Mansiysky region</i>	14		4	4	2	6
Города окружного значения <i>Cities of the okrug</i>	7	7				-
ИТОГО / TOTAL	77	10 (13,0%)	15 (19,5%)	20 (26,0%)	8 (18%)	32 (41,5%)



Берегозащитные сооружения
в виде тонкой стенки (поселок Вар-Бор)
*Shore protection structures in the form
of a thin wall (Var-Bor settlement)*



Берегоукрепление сборными железобетонными
плитами в аварийном состоянии (поселок Болчары)
*Shore protection with reinforced concrete slabs
in the emergency condition (Bolchary settlement)*



Берегоукрепление из каменной наброски
(поселок Кондинское)
*Shore protection made of stone fill
(Kondinskoye settlement)*



Сооружение габионного типа
(поселок Выкатной)
*Gabion-type structure
(Vykatnaya settlement)*

Рис. 3. Состояние берегоукрепительных сооружений на реке Конда (фото автора)

Fig. 3. Condition of bank protection structures on the Konda River (author's photo)

Выводы

1. В Ханты-Мансийском автономном округе – Югре имеются 150 поселений, которые потенциально находятся в зоне гидрологических опасностей. Из них 73 населенных пункта подвержены затоплению в период наиболее высоких половодий и 77 поселений – с риском размыва береговой линии. Это вызывает необходимость защиты населения и территорий от негативного воздействия вод, а также долгосрочного прогнозирования гидрологических процессов.

2. Несмотря на принимаемые меры, значительная часть населенных пунктов не обеспечена должным образом водоохранными сооружениями: в 44 поселениях отсутствуют противопаводковые дамбы, а в 32 – сооружения инженерной защиты береговой линии. Значительная часть водоохранных сооружений построена хозяйственным способом и не отвечает

требованиям безопасности. Капитальные гидротехнические сооружения инженерной защиты имеются в основном в городских и крупных сельских поселениях.

3. Для защиты населения и территорий от гидрологических опасностей в регионе необходимы строительство и реконструкция противопаводковых дамб общей протяженностью 57328 пог. м и берегоукрепительных сооружений (36978 пог. м).

4. Полученные результаты исследований могут быть полезны организациям и ведомствам, занимающимся проектированием защиты населенных пунктов от негативного воздействия вод. Разработанные карты могут быть использованы для выявления тенденций и направленности прохождения паводков и половодий редкой повторяемости и прогнозирования зон затопления населенных пунктов.

Список использованных источников

1. Ткачев Б.П., Досанов С.С. Экстремальные наводнения на реках Югры // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 157-162. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37379>.
2. Korkin S.E., Talyneva O.Yu., Kail E.K., Korkina E.A., Isupov V.A. Exogenous geodynamic processes of the central part West Siberia // SGEM 2017: 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (Bulgaria, 29 June – 5 July 2017). Sofia, 2017. Pp. 329-336.
3. Korkin S.E., Isupov V.A., Korkina E.A. Landscape-hydrologic systems and erosion processes across the middle Ob region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 381 (012047). Pp. 1-5.
4. Лезин В.А. Реки Ханты-Мансийского автономного округа: справочное пособие. Тюмень: Вектор Бук, 1999. 160 с.
5. Обследование водозащитных сооружений в населенных пунктах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры с целью комплексной оценки состояния защиты населенных пунктов автономного округа в рамках реализации программы «Обеспечение экологической безопасности Ханты-Мансийского автономного округа – Югры» в 2011-2013 гг.: Отчет. Ханты-Мансийск, 2011. 275 с.
6. Середовских Б.А. Использование картографического метода при обследовании населенных пунктов в бассейне реки Конды, подверженных негативному воздействию вод // Научные труды магистрантов и аспирантов. Вып. 16 / Отв. ред. Д.А. Погоньшев. Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2019. С. 299-305.
7. Korkin S., Isypov V. Analysis of Erosion Processes in Settlements of the Middle Ob Region // SGEM 2020: 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining (Albena, Bulgaria, 18-24 August 2020). Sofia, 2020. Pp. 397-402.
8. Атлас Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Т. 2. Природа. М.: Изд-во МГУ; Ханты-Мансийск: Экология, 2004. 152 с.

References

1. Tkachev B.P., Dosanov S.S. Extreme floods on the rivers of Yugra // Successes of modern natural science. 2020. № 4. P. 157-162. <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37379>
2. Korkin S.E., Talyneva O.Yu., Kail E.K., Korkina E.A., Isupov V.A. Exogenous geodynamic processes of the central part West Siberia // SGEM 2017: 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (Bulgaria, 29 June-5 July 2017). Sofia, 2017. P. 329-336.
3. Korkin S.E., Isupov V.A., Korkina E.A. Landscape-hydrologic systems and erosion processes across the middle Ob region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Volume 381 (012047). P. 1-5.
4. Lezin V.A. Rivers of the Khanty-Mansiysk Autonomous Area. Tyumen: Vector Book. 1999. 160 p.
5. Inspection of water protection structures in settlements of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra in order to comprehensively assess the state of protection of settlements of the Autonomous Okrug, Hanty-Mansiysk. 2011. 275 p.
6. Seredovskikh B.A. Using the cartographic method in the survey of settlements in the Konda river basin, exposed to the negative impact of water // Proceedings of undergraduate and graduate students. Issue 16. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University, 2019. P. 299-305.
7. Korkin S., Isypov V. Analysis of Erosion Processes in Settlements of the Middle Ob Region // SGEM 2020: 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining (Albena, Bulgaria, 18-24 August 2020). Sofia, 2020. P. 397-402.
8. Atlas of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra. Moskva – Hanty-Mansiysk: V. 2: Nature. Ecology. 2004. 152 p.
9. Register of settlements of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, falling into flood (waterlogging) zones under the impact of various hydrological and hydrodynamic processes. <https://clck.ru/3AUvh7>

9. Реестр населенных пунктов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, попадающих в зоны затопления (подтопления) при воздействии различных гидрологических и гидродинамических процессов. URL: <https://clck.ru/3AUVh7>.

10. Гидрологический ежегодник: Бассейн Карского моря (Западная часть). Т. 6. (1962-1989 гг.). Л.: Гидрометеоиздат.

11. **Жбаков К.К., Терский П.Н., Землянов И.В.** Технология определения границ зон затопления. СПб., 2019. С. 73-75.

Об авторах

Борис Анатольевич Середовских, канд. геогр. наук, доцент кафедры географии; ORCID:0000-0003-2715-2146, geoboris@mail.ru

Виктория Валерьевна Дерябина, студент направления подготовки магистратуры «Природообустройство»; 89195342518@inbox.ru

Денис Александрович Ярош, студент направления подготовки магистратуры «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций»; denis.yarosh01@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Середовских Б.А., Дерябина В.В., Ярош Д.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись.

Середовских Б.А., Дерябина В.В., Ярош Д.А. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of authors

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 06.05.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 19.08.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 19.08.2024

10. Hydrological Yearbook. V.6. – Kara Sea Basin (Western Part). (1962-1989). Leningrad: Gidrometeoizdat.

11. **Zhbakov K.K., Tersky P.N., Zemlyanov I.V.** Technology of determining the boundaries of flood zones. FGBU GOIN, St. Petersburg, 2019. P. 73-75.

Author information

Boris A. Seredovskikh, Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor at the Department of Geography, Nizhnevartovsk State University,

Victoria V. Deryabina, student of the Master's degree program "Environmental Engineering", 89195342518@inbox.ru

Denis A. Yarosh, student of the Master's degree program "Protection of Population and Territories from Emergency Situations", denis.yarosh01@mail.ru

Seredovskikh B.A., Deryabina V.V., Yarosh D.A. carried out practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript. Seredovskikh B.A., Deryabina V.V., Yarosh D.A. have a copyright to the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-92-98>

УДК 627.142.2: 504.45



ТРАНСПОРТИРОВКА ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ, ПОДНЯТЫХ СО ДНА ПРИ ОЧИСТКЕ МАЛЫХ РЕК

С.В. Посыпанов^{1✉}, С.П. Карпачёв², В.А. Балякин¹

¹ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, Россия

²Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)»; 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, Россия

Аннотация. Цель исследований: решение проблемы доставки затонувших лесоматериалов переработчикам с сохранением качества древесины в условиях малых глубин. При молевом лесосплаве затонуло огромное количество лесоматериалов. Подъем их осуществлялся преимущественно на объектах, где залежи были концентрированными, – как правило, на крупных реках. Основная часть лесосплавных путей приходилась на многочисленные малые реки. Очистку этих рек от затонувших лесоматериалов в значительной степени сдерживает проблема их доставки переработчикам с сохранением качества древесины в условиях малых глубин. Решение этой проблемы является целью данных исследований. Методической основой при решении задач для достижения поставленной цели послужили положения гидростатики и отрасли знаний, относящихся к водному транспорту лесоматериалов. В результате выполненной работы предложена конструкция устройства, обеспечивающая транспортировку поднятых со дна при очистке малых рек лесоматериалов под поверхностью воды, что предотвращает быстрое ухудшение их качества. Устройство разборной конструкции состоит из параллельных понтонов, соединенных по торцам поперечными балками, и в донной части – промежуточными гибкими связями. Аналитическим путем получены математические зависимости, связывающие параметры предлагаемого устройства и характеристики поднятых лесоматериалов. На базе этих зависимостей разработана методика и даны рекомендации по обоснованию указанных параметров. Приведенная информация позволяет изготовить предлагаемое устройство с предварительным обоснованием его параметров, соответствующих местным условиям, способствуя этим очистке малых рек от затонувших лесоматериалов и сохранению при транспортировке их качества.

Ключевые слова: малые реки, затонувшие лесоматериалы, очистка рек, транспортировка лесоматериалов

Формат цитирования: Посыпанов С.В., Карпачёв С.П., Балякин В.А. Транспортировка лесоматериалов, поднятых со дна при очистке малых рек // Природообустройство. 2024. № 4. С. 92-98. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-92-98>

Original article

TRANSPORTATION OF TIMBER MATERIALS RAISED FROM THE BOTTOM WHEN CLEANING SMALL RIVERS

S.V. Posypanov^{1✉}, S.P. Karpachev², V.A. Baliakin¹

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 163002, Arkhangelsk, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Russia

²Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch); 141005, Moscow Region, Mytishchi, 1-ya Institutskaya St., 1, Russia

Abstract. The purpose of the research is to solve the problem of delivering sunken timber to processors while maintaining the quality of wood in shallow depths. When rafting logs in bulk, a huge number sank. Their raising was carried out mainly at sites where deposits were concentrated, as a rule, on large rivers. The bulk of the timber rafting routes were along numerous small rivers. Clearing these rivers of sunken timber is largely hampered by the problem of delivering it to processors while maintaining wood quality in conditions of low flow depth. Solving this problem is the goal of this work. The methodological basis for solving problems to achieve the set goal was the provisions of hydrostatics and the branch of knowledge related to water transport of timber. As a result of the work performed, a device design has been proposed that ensures transportation of timber raised from the bottom during the cleaning of small rivers under the surface of the water, which prevents the rapid deterioration of their quality.

The collapsible structure consists of parallel pontoons connected at the ends by transverse beams and at the bottom by intermediate flexible connections. Analytically, mathematical dependencies were obtained that connect the parameters of the proposed device and the characteristics of logs raised from the bottom. Based on these dependencies, a methodology and recommendations for substantiating these parameters have been developed. The information provided makes it possible to manufacture the proposed device with a preliminary justification of its parameters corresponding to local conditions, thereby helping to clear small rivers of sunken timber and preserve their quality during transportation.

Keywords: small rivers, sunken logs, cleaning rivers, transportation of logs

Format of citation: Posypanov S.V., Karpachev S.P., Baliakin V.A. Transportation of timber materials raised from the bottom when cleaning small rivers // Prirodoobustrojstvo. 2024. No 4. P. 92-98. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-92-98>

Введение. Во время молевого лесосплава затонуло огромное количество лесоматериалов [1]. Поднимать их начали относительно активно лишь в последние десятилетия перед прекращением молевого сплава с появлением соответствующей техники [2], и преимущественно – на объектах, где залежи были концентрированными. Основная часть лесосплавных путей проходила по малым рекам. На них подъемом древесины практически не занимались по причине, в частности, малых габаритов судового хода, ограничивающих применение топлякоподъемной техники [2]. На дне малых рек по-прежнему находится огромное количество затонувших лесоматериалов (ЗЛ). Оценки экспертов несколько разнятся [1, 3-5], но все они сходятся на том, что их объемы исчисляются миллионами кубометров.

Лесоматериалы в течение длительного времени могут находиться под водой без кардинального ухудшения качества, по крайней мере их древесина нередко относится к категории деловой [1, 3, 6]. У отдельных пород древесины качество улучшается, что не относится к ЗЛ, которые периодически обсыхают.

Попытки освоения ЗЛ [4-7] не всегда были удачными в коммерческом плане. Часто начинали их подъем, не продумав в деталях все этапы технологической цепочки. Поднятые лесоматериалы (ПЛ) нередко долго оставались на берегу или транспортировались к месту переработки при доступе кислорода. При этом их качество быстро ухудшалось, и в лучшем случае они использовались как дрова, которые тоже не являются бесполезными. В результате распространилось мнение о коммерческой бесперспективности подъема ЗЛ.

В связи с противоречивостью имеющейся информации в 2023 г. подняли несколько бревен, которые пролежали на дне не менее 35 лет. Сразу после поднятия выполняли их поперечный распил (рис. 1). Даже при поверхностном осмотре становится очевидным то, что несмотря на некоторое ухудшение качества древесины, она является пригодной для использования. По крайней

мере она не менее ценна, чем отходы на лесосеках и складах сырья, переработке которых сейчас уделяется большое внимание.

Процесс экстрагирования из ЗЛ за длительный период почти прекратился [8, 9]. Однако они сильно захламляют малые реки, в том числе в поселках (рис. 2), национальных парках и на других охраняемых территориях. К числу таких рек относятся, например, Кена, Поча, Ундоша в Кенозерском национальном парке Архангельской области.

На рисунке 2 представлен снимок прибрежной части дна. На большем удалении от берега, где дно при съемке просматривается хуже, захламленность существенного выше. Она должна быть устранена по крайней мере там, где лесоматериалы не замыты частицами твердого стока.

Полагаем, что однозначный подход к решению вопроса о целесообразности подъема ЗЛ и очистки от них малых рек является неверным, и это нужно делать по экологическим соображениям даже при отсутствии коммерческой выгоды. Зачастую при детальной предварительной



Рис. 1. Поперечный распил бревна непосредственно после поднятия его со дна реки

Fig. 1. Cross-cut of a log immediately after lifting it from the bottom of the river

проработке всей технологической цепочки освоение ЗЛ при очистке малых рек может быть экономически выгодным. В любом случае необходимо максимально сократить нахождение ПЛ на воздухе до переработки. Их целесообразно транспортировать и хранить под поверхностью воды.

Цель исследований: решение проблемы доставки затонувших лесоматериалов переработчикам с сохранением качества древесины в условиях малых глубин.

Материалы и методы исследований. Методической основой при решении задач для достижения поставленной цели послужили положения гидростатики и отрасли знаний, относящихся к водному транспорту лесоматериалов.

Постановка задач. Для осуществления транспортировки под поверхностью воды поднятых при очистке малых рек лесоматериалов поставлены задачи: разработать конструкцию устройства соответствующего назначения; получить математические зависимости, связывающие параметры предлагаемого устройства и характеристики ПЛ; создать на основе этих зависимостей методику и рекомендации для обоснования основных параметров указанного устройства, соответствующих предполагаемым условиям эксплуатации.

Результаты и их обсуждение. Изображение предлагаемого устройства схематично представлено на рисунке 3.

Устройство состоит из двух боковых и, возможно, одного или нескольких промежуточных понтонов, выполненных из труб большого диаметра. Понтоны соединяют при помощи двух поперечных балок, примыкающих к их торцам. На этих торцах имеются крепежные кронштейны г-образного профиля, в которые и укладывают поперечные балки. Балки в кронштейнах фиксируют крепежными винтами. Роль днища, на которое укладывают ПЛ, выполняют гибкие поперечные связи из стальной проволоки диаметром 4,0-6,3 мм, снабженные простейшими натяжными устройствами. Связи огибают все понтоны так, что их рабочие ветви проходят на уровне нижних образующих поверхностей понтонов. Такая конструкция позволяет транспортировать ПЛ под поверхностью воды. Проволочное дно дает возможность эффективно использовать лимитированные глубины малых рек и экономить на материале при изготовлении устройства. У торцов понтонов предусмотрены минитумбы для соединения устройств между собой и швартовки.

Подъем лесоматериалов, их погрузка описаны нами в работе [10]. Загруженные устройства соединяют в ленты и буксируют катером

с малой осадкой до места назначения. Также загруженные устройства можно пускать группами по течению в сопровождении рабочих на мотолодке. Тот или иной вариант выбирается в зависимости от конкретных местных условий. В пунктах переработки ПЛ должны сразу поступать в производство. В противном случае



Рис. 2. Фрагмент дна р. Ваймуга в п. Самодед Архангельской области через 50 лет после прекращения молевого сплава

Fig. 2. Fragment of the river bottom Vaimuga in the village of Samoded, Arkhangelsk region, 50 years after the cessation of rafting

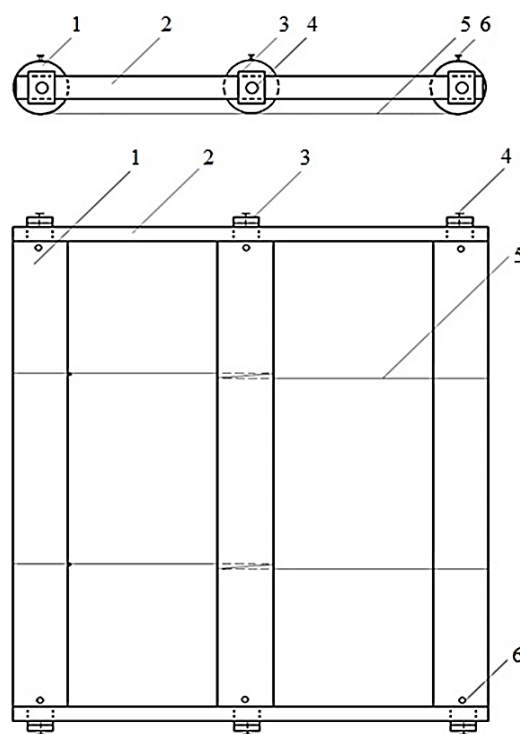


Рис. 3. Общий вид устройства для транспортировки поднятых со дна рек лесоматериалов:

- 1 – понтон; 2 – поперечная балка; 3 – крепежный кронштейн; 4 – крепежный винт; 5 – стальная проволока; 6 – минитумба

Fig. 3. General view of the device for transporting logs raised from the river bottom:

- 1 – pontoon; 2 – transverse beam; 3 – mounting bracket; 4 – fixing screw, 5 – steel wire; 6 – mini-bollard

следует предусмотреть места для концентрированного хранения доставленных лесоматериалов под поверхностью воды. Выгрузка их должна осуществляться по потребности производства. Эти мероприятия позволяют получать наиболее качественную продукцию.

Устройства могут быть легко разобраны и погружены на автолесовоз с манипулятором, доставлены к месту следующего применения и вновь собраны. Не исключается вариант обратной доставки пустых устройств, соединенных в ленты, катером с малой осадкой.

Для получения необходимых математических зависимостей воспользовались расчетной схемой устройства (рис. 4).

На понтоны устройства при транспортировке ПЛ в расчетном случае действует выталкивающая сила (H):

$$F_1 = 0,25 k \pi d^2 L g \rho_1, \quad (1)$$

где k – коэффициент использования плавучести понтонов; i – количество понтонов; d – внешний диаметр понтонов, м; L – длина понтонов, м; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; ρ_1 – плотность воды, kg/m^3 .

Сила тяжести, обусловленная массой самого устройства (H), –

$$G_1 = K m g L i, \quad (2)$$

где m – масса одного погонного метра трубы, из которой изготовлены понтоны, kg/m ; K – коэффициент, учитывающий массу дополнительных элементов устройства.

Выталкивающая сила, действующая на расчетный объем погруженных в устройство лесоматериалов (H), определяется по формуле:

$$F_2 = b(a-d)L\eta(i-1)g\rho_1, \quad (3)$$

где b – расчетная высота загрузки ПЛ, м; a – расстояние между осями соседних понтонов, м; η – коэффициент полноты погружения [2].

Силу тяжести, действующую на расчетный объем погруженных в устройство лесоматериалов (H), можно определить из выражения:

$$G_2 = b(a-d)L\eta(i-1)g\rho_2, \quad (4)$$

где ρ_2 – плотность ПЛ, kg/m^3 .

При нахождении устройства в расчетном положении сумма всех рассмотренных выше сил равна нулю. С учетом этого можно записать:

$$0,25 k \pi d^2 L g \rho_1 - K m g L i - b(a-d)L\eta(i-1)g(\rho_2 - \rho_1) = 0. \quad (5)$$

После преобразования уравнения (5) получили:

$$0,25 k \pi d^2 \rho_1 - K m i - b(a-d)\eta(i-1)(\rho_2 - \rho_1) = 0. \quad (6)$$

С целью повышения универсальности получаемых результатов и их наглядности выразили расчетную высоту загрузки ПЛ в устройство b и расстояние между осями соседних понтонов a через диаметр понтонов d :

$$\begin{aligned} b &= x d; \\ a &= y d, \end{aligned} \quad (7)$$

где x – коэффициент пропорциональности между высотой загрузки ПЛ в устройстве и диаметром понтонов; y – коэффициент пропорциональности между межосевым расстоянием соседних понтонов и их диаметром.

С учетом введенных коэффициентов формулу (6) привели к виду:

$$0,25 k \pi d^2 \rho_1 - K m i - x d (y d - d) \eta (i - 1) g (\rho_2 - \rho_1) = 0. \quad (8)$$

После преобразований выражения (8) получили:

$$0,25 k \pi \rho_1 - K m i / d^2 + x(y-1)\eta(i-1)(\rho_2 - \rho_1) = 0. \quad (9)$$

Выразили из формулы (9) сначала величину y :

$$y = (0,25 k \pi \rho_1 - K m i / d^2) / (x \eta (i - 1) (\rho_2 - \rho_1)) + 1, \quad (10)$$

затем – x :

$$x = (0,25 k \pi \rho_1 - K m i / d^2) / ((y - 1) \eta (i - 1) (\rho_2 - \rho_1)). \quad (11)$$

Площадь сегмента надводной части поперечного сечения понтона, m^2 , при осадке большей половины диаметра (рис. 4), –

$$S_1 = d^2(\Theta - \sin \Theta) / 8, \quad (12)$$

где Θ – угол сегмента (рис. 4), рад.

В данном случае угол сегмента вычисляется с помощью выражения:

$$\Theta = 2 \arccos(1 - 2(d - T) / d). \quad (13)$$

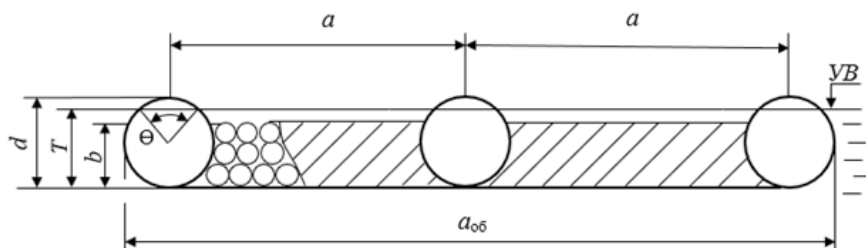


Рис. 4. Расчетная схема устройства для транспортировки ПЛ

Fig. 4. Design diagram of a device for transporting logs raised from the bottom

Площадь подводной части поперечного сечения понтона, m^2 , вычисляется по формуле:

$$S = 0,25 \pi d^2 - S_1 = 0,25 \pi d^2 - d^2(\Theta - \sin \Theta)/8. \quad (14)$$

Коэффициент использования плавучести понтонов находим из выражения:

$$k = 4S/(\pi d^2) = 1 - 0,5(\Theta - \sin \Theta)/\pi. \quad (15)$$

Если осадка понтона T меньше или равна $0,5d$, то площадь подводной части его поперечного сечения по внешнему контуру –

$$S = 0,125 d^2(\Theta - \sin \Theta). \quad (16)$$

В этом случае угол сегмента составляет:

$$\Theta = 2 \arccos(1 - 2T/d), \quad (17)$$

а коэффициента использования плавучести понтонов –

$$k = 4S/(d^2) = 0,5(\Theta - \sin \Theta)/\pi. \quad (18)$$

Габаритную ширину устройства (м) определяют по формуле:

$$a_{ог} = (i - 1)a + d. \quad (19)$$

Расчетный объем лесоматериалов, m^3 , в устройстве:

$$V = (a - d)bL\eta(i - 1). \quad (20)$$

Для обоснования основных параметров устройства с применением полученных формул разработали далее приведенные алгоритм и рекомендации. Методика проектирования предусматривает на первом этапе выбор диаметра труб для понтонов с той или иной толщиной стенки, материала труб, количества понтонов с учетом местных условий, которые диктуют, в частности, величину расчетной осадки, а также с учетом других факторов.

Принимая количество понтонов, следует начать с $i = 2$, предполагая возможность дальнейшего увеличения этого значения. Выбирая диаметр труб для понтонов, рекомендуем принять в проектном положении отношение $T/d = 0,9$. Осадка не должна превышать минимальную сплавную глубину на маршруте за вычетом донного запаса $0,2$ м. Массу одного погонного метра труб устанавливают по справочным данным.

С учетом величин коэффициента полноресурсности, рекомендуемых для лесосплавных пучков [2], и того, что в устройство будут укладываться лесоматериалы разной длины, принятый коэффициент η не должен превышать $0,50-0,55$. После длительного нахождения ПЛ в воде ρ_2 следует принимать в диапазоне $1200-1250$ kg/m^3 [1], в противном случае – от 1050 до 1100 kg/m^3 .

Коэффициент K рекомендуется принять как $1,05-1,10$. При дальнейшей, более детальной

проработке конструкции, он может быть скорректирован. Учитывая, что рекомендованное T/d равно $0,9$, значение x целесообразно принять за $0,75-0,80$, имея в виду то, что ПЛ должны находиться под поверхностью воды.

При принятых исходных данных с использованием зависимости (13) вычисляется угол сегмента, по формулам (12), (14) определяется площадь подводной части поперечного сечения понтона. Значение k в данном случае вычисляется с помощью выражения (15). По формуле (10) определяется величина y . По ней и принятому диаметру согласно выражению (7) устанавливается расстояние между осями соседних понтонов a . По аналогии вычисляется расчетная высота загрузки лесоматериалов b , соответствующая принятому x . Габаритную ширину устройства определяют по формуле (19). Учитывая, что максимальная длина ПЛ составляет $6,5$ м, длину устройства можно принять за $7,0$ м. Объем лесоматериалов в устройстве вычисляют с помощью выражения (20).

Расчеты по данному алгоритму могут быть выполнены для труб из различных материалов, с разными диаметрами и толщиной стенок, с разной массой одного погонного метра, при различном количестве понтонов и т.д. Поскольку при варьировании указанных факторов расчеты осуществляют по одному алгоритму, их целесообразно выполнять в электронных таблицах. С учетом полученных результатов и предполагаемых условий эксплуатации отбирается наиболее приемлемый вариант (варианты).

На втором этапе методика предусматривает для отобранных вариантов проверку условия нахождения ПЛ под водой не только в транспортном положении, но и в процессе их погрузки-выгрузки. При принятых значениях a и y варьируется относительная осадка T/d от максимальной ($0,9$) в сторону уменьшения. При каждом значении T/d необходимо пересчитывать угол Θ , площади S_1 и S , коэффициент k . При $T/d > 0,5$ следует использовать формулы (12)-(15). В случаях, когда $T/d \leq 0,5$, необходимо применять формулы (16)-(18). При полученных величинах k , ранее принятых исходных данных и значении y , соответствующем выбранному варианту, для каждой осадки по формуле (11) рассчитываются значения x . Варьирование T/d осуществляется до получения $x = 0$. В результате сравнения x с соответствующими T/d выясняется, будут ли ПЛ под уровнем воды на протяжении всей погрузки.

Для примера выполнили расчеты по описанной методике. Результаты первого этапа представлены в таблице 1. Во всех случаях

принято: $i = 2$; $\eta = 0,55$; $\rho_2 = 1250 \text{ кг/м}^3$; $K = 1,05$. Мы ограничились рассмотрением только стальных труб разного диаметра с разной толщиной стенок. При реальном проектировании предполагается большее количество вариантов в таблице. В качестве наиболее приемлемого условно принят вариант нижней строки таблицы.

Пример расчета по проверке нахождения ПЛ под уровнем воды в процессе их погрузки для отобранного варианта приведен в таблице 2.

Сопоставление T/d и x или T и b показывает, что при любой степени загрузки ПЛ будут находиться под водой. При пустом устройстве, то есть при $x = b = 0$, его осадка составит $0,186 \text{ м}$, $T/d = 0,372$.

Фактические характеристики ПЛ могут несколько отличаться от расчетных, что не является критичным. При очень плотной их укладке, то есть при повышенном η или при ρ_2 больше расчетной, погрузку просто следует прекратить, когда T/d станет равной $0,9$. При существенном отклонении указанных показателей от расчетных в меньшую сторону верхние ПЛ могут оказаться несколько выше поверхности воды. Если по окончании погрузки ситуация не изменится, можно открыть краны (которые на рисунке не отражены) на понтонах, расположенные ниже ватерлинии, и залить в них воду до подтопления верхнего слоя ПЛ. В пункте выгрузки предполагается слив воды через эти же краны.

Таблица 1. Результаты расчетов по первому этапу проектирования

Table 1. Calculation results for the first design stage

$d, \text{ м}$	$\sigma, \text{ мм}$	$m, \text{ кг/м}$	T/d	x	$\Theta, \text{ рад}$	$S, \text{ м}^2$	k	y	$a, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$a_{об}, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3$
0,50	9,0	108,98	0,90	0,80	1,287	0,186	0,948	6,21	3,10	0,400	3,60	4,78
0,63	9,0	136,89	0,93	0,85	1,071	0,295	0,969	7,82	4,93	0,536	5,56	10,16
0,50	3,0	36,00	0,90	0,80	1,287	0,186	0,948	11,78	5,89	0,400	6,39	9,07
0,50	4,5	54,49	0,90	0,80	1,287	0,186	0,948	10,37	5,18	0,400	5,68	7,98
0,43	6,0	61,72	0,88	0,78	1,415	0,138	0,932	8,12	3,46	0,332	3,89	4,43
0,50	5,0	60,50	0,90	0,80	1,287	0,186	0,948	9,91	4,95	0,400	5,45	7,63

Таблица 2. Результаты расчетов по второму этапу проектирования

Table 2. Calculation results for the second design stage

T/d	$T, \text{ м}$	$\Theta, \text{ рад}$	$S, \text{ м}^2$	k	x	$b, \text{ м}$
0,900	0,450	1,287	0,7441	0,948	0,772	0,386
0,800	0,400	1,855	0,6732	0,858	0,658	0,329
0,700	0,350	2,319	0,5868	0,748	0,518	0,259
0,600	0,300	2,739	0,4916	0,626	0,364	0,182
0,500	0,250	3,142	0,3923	0,500	0,204	0,102
0,400	0,200	2,739	0,2934	0,374	0,044	0,022
0,372	0,186	2,624	0,2661	0,339	0,000	0,000

Выводы

Обоснована необходимость транспортировки ПЛ под поверхностью воды с целью недопущения существенного снижения их качества в процессе доставки переработчикам. Предложена конструкция простого устройства для такой транспортировки, ориентированного на применение в условиях малых рек. Указанная конструкция обеспечивает наиболее рациональное использование их лимитированных глубин. Конструкция является разборной, что позволяет более оперативно автотранспортом возвращать устройства от переработчиков к месту их следующего использования.

Аналитическим путем установлены математические зависимости, связывающие параметры устройства и характеристики ПЛ.

Предложена основанная на этих зависимостях методика обоснования основных параметров устройства, состоящая из двух этапов. На первом этапе устанавливаются соответствующие принятым данным параметры устройства, обеспечивающие его проектное транспортное положение. На втором этапе проверяется выполнение условия нахождения ПЛ под водой в процессе погрузки и выгрузки. Даны рекомендации по выбору величин исходных данных.

Приведенные материалы создают предпосылки для изготовления предлагаемых устройств с параметрами, соответствующими предполагаемым условиям эксплуатации, таким образом, для очистки малых рек от ЗЛ и более рационального использования полученного при этом сырья.

Список использованных источников

1. Карпачёв С.П. Оценка объема и качества скопленного бревен в водоемах: монография. М.: МГУЛ, 2004. 89 с.
2. Овчинников М.М., Полищук В.П. Водный транспорт леса: учебное пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2007. 268 с.
3. Губин В.В. Количественная и качественная характеристика затопленной и полузатопленной древесины в водохранилищах ГЭС // Лесоэксплуатация: Межвузовский сборник научных трудов. Красноярск: СибГТУ, 2001. Вып. 3. С. 28-32.
4. Корпачёв В.П., Худоногов В.Н. Проблема загрязнения и засорения древесной массой рек и водохранилищ Ангаро-Енисейского региона // Лесоэксплуатация. Межвузовский сборник научных трудов. Красноярск: КГТ, 1995. С. 7-17.
5. Рожнецов А.П. Совершенствование технологий обнаружения и подъема затонувшей древесины на водных объектах РМЭ // Великие реки 2003: Материалы Международного юбилейного научно-промышленного форума-семинара. Нижний Новгород: НГАСУ, 2003. С. 104-105.
6. Шепотило М.В. Топляк. Как поднять и использовать моренный лес // Лес-ПромИнформ. 2014. № 2 (100). С. 15-17.
7. Рожнецова О.В., Войтко П.Ф., Рожнецов А.П. Развитие предпринимательской деятельности при освоении затонувшей древесины // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Экономика и управление». 2007. № 1 (1). С. 76-79.
8. Виноградов А.Ю. Экологические последствия использования малых рек для молевого сплава / Виноградова Т.А., Кадацкая М.М., Сазонова С.И., Хвалёв С.В. // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. № 4. С. 533-554.
9. Корпачёв В.П. Влияние затопленной и плавающей древесной массы на водные объекты / Малинин Л.И., Чебых М.М., Рябоконт Ю.И., Пережилин А.И. // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. 25, № 3-4. С. 340-343.
10. Кудрявцев Г.В., Посыпанов С.В., Воробьев Д.С. Технология очистки малых и средних рек от затонувшей древесины с использованием манипуляторов и баржевых модулей // Перспективы развития лесопромышленного комплекса России: сборник статей Региональной научно-практической конференции. Красноярск: 2019. С. 51-54.

Об авторах

Сергей Валентинович Посыпанов, д-р техн. наук, профессор; проф. кафедры геодезии и земельного кадастра; ResearcherID: ABF-6542-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>; SPIN-код 8592-0690; s.posypanov@narfu.ru

Сергей Петрович Карпачёв, д-р техн. наук, профессор; проф. кафедры «Технология и оборудование лесопромышленного производства»; karpachevs@mail.ru

Виктор Анатольевич Балякин, аспирант; balyakin1973@bk.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Посыпанов С.В., Карпачёв С.П., Балякин В.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 20.05.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 18.06.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 18.06.2024

References

1. Karpachev S.P. Assessment of the volume and quality of log accumulations in reservoirs: monograph. Moscow: MGUL, 2004. 89 p.
2. Ovchinnikov M.M., Polishchuk V.P. Water transport of timber: textbook. St. Petersburg: SPbGLTU, 2007. 268 p.
3. Gubin V.V. Quantitative and qualitative characteristic of flooded and semi-flooded wood in hydroelectric power station reservoirs // Lesoekspluatation: interuniversity collection of scientific papers, Vol. 3. Krasnoyarsk: SibSTU, 2001. P. 28-32.
4. Korpachev V.P., Khudonogov V.N. The problem of pollution and clogging of rivers and reservoirs by wood pulp in the Angara-Yenisei region // Lesoekspluatation: interuniversity collection of scientific papers KGT. Krasnoyarsk: KGT, 1995. pp. 7-17.
5. Rozhentsov A.P. Improving technologies for detecting and lifting sunken wood on water bodies RME // Great Rivers 2003: materials of the anniversary international scientific industrial forum – seminar. N. Novgorod: NGASU, 2003. pp. 104-105.
6. Shepotilo M.V. Sunken logs. How to raise and use stained wood // LesPromInform No. 2 (100), 2014. P. 15-17.
7. Rozhentsova O.V., Voitko P.F., Rozhentsov A.P. Enhancement of entrepreneurial activity in the development of sunken wood // Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Economics and management. 2007. No. 1 (1). P. 76-79.
8. Vinogradov A.Yu. Environmental impact of using small river for log driving / Vinogradova T.A., Kadatskaya M.M., Sazonova S.I., Hvalev S.V. // Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2019, vol. 1, iss. 4, P. 533-554.
9. Korpachev V.P. The influence of flooded and floating wood mass on water bodies / Malinin L.I., Chebykh M.M., Ryabokon Yu.I., Perezhilin A.I. // Conifers of the boreal zone. 2008, vol. 25, no. 3-4, P. 340-343.
10. G.V. Kudryavtsev, S.V. Posypanov, D.S. Vorobyev. Technology of cleaning small and medium rivers from sunken wood using manipulators and barge modules // Prospects for the development of the Russian timber industry: collection of articles. stat. Regional scientific and practical conf. Krasnoyarsk: 2019. P. 51-54.

Author information

Sergey V. Posypanov, DSc (tor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Geodesy and Land Cadastre; ResearcherID: ABF-6542-2021; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>; SPIN-код 8592-0690; s.posypanov@narfu.ru

Sergey P. Karpachev, Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department «Technology and Equipment of Timber Production»; karpachevs@mail.ru

Viktor A. Baliakin, Postgraduate Student; balyakin1973@bk.ru

Posypanov S.V., Karpachev S.P., Baliakin V.A. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-99-107>

УДК 627.81:556.013:004.94



ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ВОДОХРАНИЛИЩ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКИХ ГРАФИКОВ

Л.Д. Раткович^{1✉}, С.А. Соколова¹, Муалла Манхаль^{1,2}

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

² Сирийская Арабская Республика

Аннотация. Правила использования водных ресурсов водохранилищ (ПИБР) нуждаются в постоянном обновлении с учетом значительного числа факторов, влияющих на эффективность управления. Антропогенное изменение морфометрических функций, частичное заиливание мертвого объема, изменение основных гидрологических характеристик оказывают существенное влияние на параметры водохранилищ и режим регулирования стока. Обоснование режима регулирования остается актуальной и традиционно сложной инженерной задачей ПИБР, дискутируемой на профессиональных совещаниях и в научных публикациях. В статье обсуждается методический подход, основанный на введении заданного алгоритма управления в процесс назначения интервального запроса к ресурсам водохранилища. Запрос при этом формулируется как двухпараметрическая степенная функция прогнозируемого ресурса за расчетный интервал времени (месяц). Варьируются показатель степени и относительная длина диапазона бесперебойного покрытия требований к водным ресурсам. Построены номограммы, иллюстрирующие влияние показателя степени на очертание зависимости требований к водохранилищу. На наш взгляд, данный подход существенно сокращает область Парето, исключая значительную часть множества формальных оптимумов. Алгоритм предлагаемой модели ориентирован на двухкритериальную оптимизацию, где в качестве критериев рассматриваются относительные величины суммарной годовой водоотдачи и суммы относительных интервальных ординат водопотребления. Единый функционал формируется путем линейной свертки критериев. Модель иллюстрируется на примере ресурсов реки Жиздра для серии из двух маловодных лет. В процессе моделирования баланса и оптимизации используются инструменты Excel включая процедуры «поиска решений» и VBA. Отмечается необходимость привлечения более мощных алгоритмов оптимизации для расчетов по длительным многолетним гидрологическим рядам.

Ключевые слова: имитационное моделирование, алгоритм модели, многокритериальная оптимизация, линейная свертка критериев, функция запроса, параметры водохранилища, процедура «поиска решения», область Парето

Формат цитирования: Раткович Л.Д., Соколова С.А., Муалла Манхаль. Оптимизационный алгоритм управления водными ресурсами водохранилищ для обоснования диспетчерских графиков // Природообустройство. 2024. № 4. С. 99-107. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-99-107>

Original article

OPTIMIZATION ALGORITHM OF RESERVOIR WATER RESOURCES MANAGEMENT TO SUBSTANTIATE DISPATCH SCHEDULES

L.D. Ratkovich^{1✉}, S.A. Sokolova¹, Mualla Manhal^{1,2}

¹ Russian state agrarian university – Moscow Timiryazev agricultural academy, Institute of land reclamation, water management and construction named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Timiryazevskaya str., 49, Russia

² Syrian Arab Republic

Abstract. The rules for the use of reservoir water resources need to be constantly updated, considering a significant number of factors affecting the effectiveness of management. Anthropogenic changes in morphometric functions, partial siltation of dead volume, and changes in basic hydrological characteristics have a significant impact on reservoir parameters and flow regulation regime. Justification

of the regulatory regime remains an urgent and traditionally difficult engineering task of the IRP, discussed at professional meetings and in scientific publications. The article discusses a methodological approach based on the introduction of a given control algorithm into the process of assigning an interval request to the reservoir. In this case, the request is formulated as a two-parameter power function of the predicted resource for the estimated time interval (month). The degree indicator and the relative length of the range of uninterrupted water requirements coverage are the arguments of the query function. Nomograms illustrating the influence of the degree indicator on the outline of the dependence of requirements on the reservoir are constructed. In our opinion, this approach significantly reduces the Pareto set, excluding a significant part of the set of formal optima. The algorithm of the proposed model is focused on two-criteria optimization, where the relative values of the total annual water output and the sum of the relative interval ordinates of water consumption are considered as criteria. The unified functional is formed by linear convolution of criteria. The model was tested on the example of the resources of the Zhizdra River for a series of two low-water years. In the process of balance modeling and optimization, Excel tools are used, including "solution search" and VBA procedures. It is noted that it is necessary to use more powerful optimization algorithms for calculations based on multiyear hydrological series.

Keywords: simulation modeling, model algorithm, multi-criteria optimization, linear convolution of criteria, query function, reservoir parameters, "solution search" procedure, Pareto set

Format of citation: Ratkovich L.D., Sokolova S.A., Mualla Manhal. Optimization algorithm of reservoir water resources management to substantiate dispatch schedules // Prirodoobustroystvo. 2024. № 4. P. 99-107. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-99-107>

Введение. Традиционное представление о диспетчерских графиках [1], являющихся ядром правил использования водных ресурсов водохранилищ (ПИБР) [2], ориентировано на послойную структуру зон ограничения гарантированной нормальной и пониженной водоотдачи. Теоретическое обоснование данного инструмента управления водохранилищами все еще недостаточно разработано, поскольку представления авторов о правомерности того или иного подхода [3-6] нередко связаны с их собственными представлениями об этой актуальной инженерно-математической задаче.

Исследования направлены не на рецензирование существующих методов, а на ряд аспектов, которые, на наш взгляд, не нашли достаточного отражения в безусловно высокопрофессиональных публикациях разных авторов. Практически отсутствует связь проектных решений с критериями удовлетворения требований потребителей, их связи с эксплуатационными условиями. Кроме того, оптимальное решение однозначно соответствует базовому гидрологическому ряду. Этот ряд, каким бы репрезентативным он ни был, является одной из возможных выборок. Поэтому управляющий алгоритм по возможности должен быть менее «зависимым» от выборки, но более связанным с критериями удовлетворения водопотребления.

Цель исследований заключается в совершенствовании алгоритма управления водными ресурсами водохранилищ на основе имитационного моделирования водохозяйственного

баланса с применением многокритериальной оптимизации.

Материалы и методы исследований.

Построение диспетчерских графиков – сложная многофакторная задача, что существенно ограничивает возможности построения стройной и строгой методики. По-видимому, имеет смысл работать над частными случаями, не слишком увлекаясь математическими построениями, но стремясь к убедительной простоте. Как правило, многолетний ретроспективный гидрологический ряд стока принимается за прототип будущего режима реки. Это привычно, хотя и не всегда обосновано по причинам, связанным с неоднородностью данных, недостаточной репрезентативностью информации, нестационарностью ЭВБ.

Опираясь на традиционные подходы, предположим, что существует ДГ, обеспечивающий наиболее выигрышный вариант многолетнего регулирования стока. Рассматриваем одно водохранилище с рассчитанной ранее полезной емкостью, не затрагивая мертвый объем, который в данном случае не влияет на ход рассуждений. Формализуем обычно имеющуюся исходную информацию:

• $S_{j, i}$ – многолетняя последовательность величин притока (многолетний гидрологический ряд, естественный или условно восстановленный с учетом репрезентативности и однородности) в каждом интервале расчетной разрезки года, предположим, помесечно. Возможно использование искусственных смоделированных рядов [5, 7].

Здесь j – месяц; i – индекс года в многолетней хронологической последовательности.

- $V_{j,i}$ – многолетний ход наполнения водохранилища – последовательность текущих значений наполнения полезной емкости на начало и конец расчетных интервалов соответственно, однозначно определяемая некоторой (искомой) функцией регулирования стока $\Delta V_{j,i}$ – например, сработка (+), аккумуляция (–).

- $V_{плз}$ – полезный объем водохранилища, известная величина, найденная ранее с помощью традиционных методов.

- $A_{н,j}$ – расчетные (нормативные) требования к водным ресурсам, поинтервальные – гидрограф водопотребления, сформированный комплексом водопотребителей и водопользователей. Запрос включает в себя отраслевое водопотребление и целевые попуски.

- $A_{м,j}$ – минимальные интервальные требования, сформулированные на стадии согласования структуры водохозяйственного комплекса.

- A_j – назначаемый запрос в соответствии с реализуемой методикой.

Формулируем постановку задачи: *найти функцию регулирования $\Delta V_{j,i}$, которая приводит к максимальной гарантированной водоотдаче или (что то же самое – к минимуму суммы дефицитов за многолетие) за расчетный период в абсолютных цифрах (первый критерий) и в долях нормативного водопотребления (второй критерий)*. Долевые требования, по сути, вводят весовые коэффициенты на интервальные цифры водопотребления. Это означает, что все интервальные ординаты гидрографа водопотребления будут одинаково значимыми. Последнее является принципиальным, иначе получается валовое значение водопотребления без привязки к внутригодовому режиму. В то же время абсолютными цифрами водоотдачи тоже нельзя пренебречь. В связи с этим нами была использована двухкритериальная оптимизация. Разумеется, критериальная система может усложняться с учетом специфики водопользователей (гидроэнергетика, навигация, экологические требования). Стремление к максимуму гарантированной водоотдачи не является новым [2, 8] – проблема заключается в том, чтобы корректно сформулировать критерии назначения запроса, определяющего эффективность регулирования [9-11]. Идея предлагаемого подхода состоит в том, чтобы формулировать запрос в каждом интервале времени в зависимости от прогнозируемого ресурса R (сумма наполнения водохранилища

на начало интервала и прогноза притока за расчетный интервал времени):

$$R_j = V_{j-1} + S_j, \quad (1)$$

где V_{j-1} – наполнение водохранилища на начало расчетного интервала времени.

Простое суммирование даже относительных дефицитов при большом объеме варьируемых переменных без какой-либо систематизации может оказаться формальной малоэффективной процедурой. Целесообразно внести определенные закономерности управления посредством введения функции запроса $A = f(V)$. Для этой цели предлагается формула (1), которая после раскрытия выражения в квадратных скобках принимает форму (2):

$$A_j = A_{м,j} + (A_{н,j} - A_{м,j}) \cdot \left[\frac{R_j}{k_j \cdot R_{j,max}} \right]^{m_j}; \quad (1)$$

$$A_j = A_{м,j} + (A_{н,j} - A_{м,j}) \cdot \left[\frac{V_{j-1} + S_j}{k_j \cdot (V_{плз} + A_{н,j})} \right]^{m_j}, \quad (2)$$

где m_j – показатель степени; k – коэффициент, разделяющий диапазоны бесперебойной и сниженной водоотдачи.

В числителе дроби (1) – величина располагаемого прогнозируемого ресурса, а знаменатель – произведение достаточно большой величины $R_{j,max}$ на разделяющий зоны коэффициент k . Эскизные номограммы графика функции $A = f(R_j, m)$ представлены на рисунке 1. Показатель степени m характеризует кривизну кривых в интервале значений отдачи $[A_{м,j}, A_{н,j}]$ и прогнозируемого потенциального ресурса R_j . На выражение (1) накладывается следующее ограничение: если числитель дроби R_j оказывается больше некоторого переходного значения $R_{пер} = k_j \cdot R_{j,max}$, то требования к водным ресурсам назначаются в объеме нормальной гарантированной отдачи $A_{н,j}$. Величина $R_{пер}$ – переходное значение потенциального ресурса – не должна превышать $R_{max,j} = V_{плз} + A_{н,j}$. Значение коэффициента k_j , вернее $(1 - k_j) \cdot 100\%$, характеризует внутригодовую бесперебойность (обеспеченность покрытия требований). В условиях описанных ограничений и структуры формул (1) и (2) очевидно, что $A_j \in [A_{м,j}, A_{н,j}]$.

Принимаем вид функции (1) одинаковым для всех интервалов, а значения $A_{м,j}$, $A_{н,j}$, $R_{пер,j}$, m_j – неизменными для всех лет расчетного гидрологического ряда. Меняются, естественно, значения объемов стока за интервал. Балансовые уравнения отслеживают режим регулирования притока $\Delta V_{j,i}$ (сработка +; наполнение –), а также наполнение водохранилища

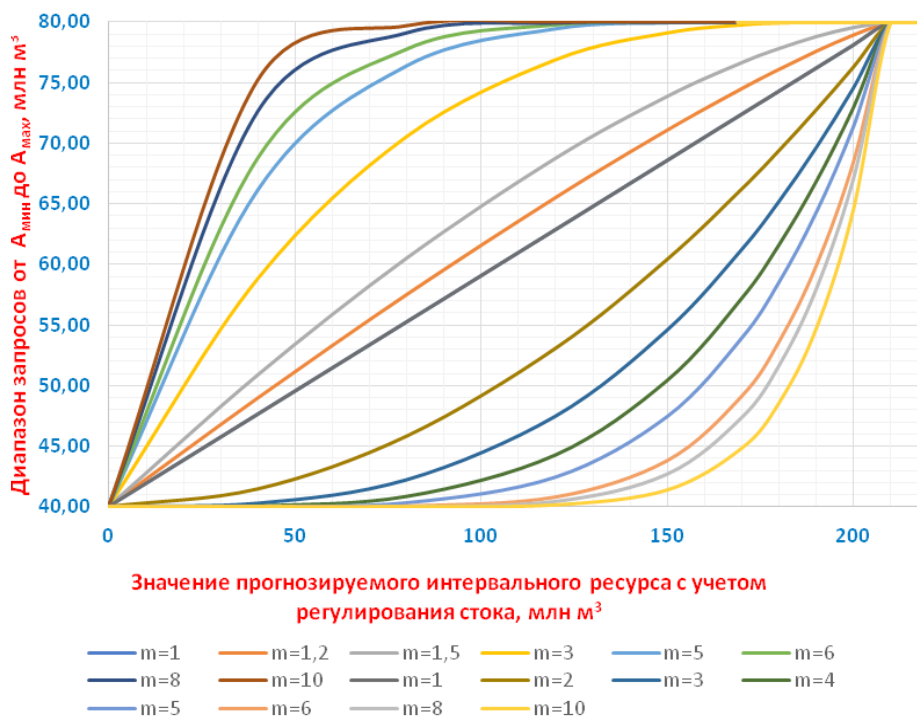


Рис. 1. Вид зависимости назначаемой интервальной отдачи водохранилища (A) от прогнозируемого ресурса

Fig. 1. Type of dependence of the assigned interval return of the reservoir (A) on the predicted resource

на начало и конец расчетного интервала времени: $V_{j-1,i}$; $V_{j,i}$. Неизвестными параметрами являются $R_{пер,j}$, m_j . Поскольку $R_{пер,j} = k_j \cdot (V_{плз} + A_{н,j})$, независимыми следует считать m_i и k_j .

Целесообразность разных m и k для каждого месяца можно обсуждать, однако введение большого числа переменных в данном случае вряд ли имеет смысл. Кроме того, используемый инструментарий пока недостаточен для таких задач в силу размерности. По той же причине мы сейчас не можем задействовать длительный гидрологический ряд, и в расчетном примере рассмотрена серия двух маловодных лет для иллюстрации предлагаемой методики.

С учетом вышеизложенного формулируем задачу двухкритериальной оптимизации:

первый критерий Kr_1 – сумма поинтервальных объемов гарантированной отдачи за исследуемый многолетний период;

второй критерий Kr_2 – сумма относительных значений гарантированной отдачи:

$$Kr_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (A_{н,j} - D_{j,i}) \rightarrow \max; \quad (3)$$

$$Kr_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{A_{н,j} - D_{j,i}}{A_{н,j}} \rightarrow \max, \quad (4)$$

где $D_{j,i}$ – дефицит.

Для решения многокритериальности используем линейную свертку критериев, в результате которой получаем единый функционал:

$$Kr = \frac{Kr_1}{N} \cdot \mu + \frac{Kr_2}{M \cdot N} \cdot (1 - \mu) \rightarrow \max. \quad (5)$$

Совмещая (3-5) с балансовыми уравнениями, приходим к смешанной системе уравнений, неравенств и целевой функции (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{j,i} \pm \Delta V_{j,i} \geq A_{j,i} - \text{минимальная водоотдача выдерживается всегда} \\ V_{j,i} = V_{(j-1),i} \mp \Delta V_{j,i} \\ V_{плз} \geq V(j,i) \geq 0 \\ A_{j,i} = A_{м,j} + (A_{н,j} - A_{м,j}) \cdot \left[\frac{V(j-1,i) + S(j,i)}{k \cdot (V_{плз} + A_{н,j})} \right]^{m_j}, m_j \in [0.1, 10] \\ A_{j,м} \leq A_{j,i} \leq A_{j,н} \\ Kr = \frac{Kr_1}{N} \cdot \mu + \frac{Kr_2}{M \cdot N} \cdot (1 - \mu) \rightarrow \max; \quad \mu \in [0; 1]. \end{array} \right. \quad (6)$$

Результаты исследования. Теоретическая основа предлагаемой модели описана выше. Модель реализована в среде Excel с использованием процедуры «поиска решения» и VBA. В качестве объекта для демонстрации методики выбран створ на реке Жиздре, левом притоке Оки в Калужской области. Выбрана река со «средними» для категории средних рек показателями по норме стока и коэффициенту вариации. Параметры стока получены по восстановленному для внутреннего пользования гидрологическому ряду (1933-2019) прерывистых и неполных наблюдений в створе г. Козельска (площадь водосбора 6940 км², $Q_{\text{ср}} = 35,5 \text{ м}^3/\text{с}$).

Гидрологические характеристики речного стока с учетом последних десятилетий характеризуются кривой обеспеченности годового стока (рис. 3), построенной по расчетным значениям среднееголетнего стока и коэффициента вариации применительно к распределению Пирсона III типа.

При заданных значениях полезного объема, наполнения на начало расчетного периода и параметра линейной свертки получены оптимальные значения m и Kr (табл. 1), где входные данные модели управления (зеленый цвет) даны вместе с результатом оптимизации (красный цвет). Расчетный листинг модели баланса приводится в таблице 2.



Рис. 2. Схема водосбора реки Жиздра

Fig. 2. Diagram of the Zhizdra River basin

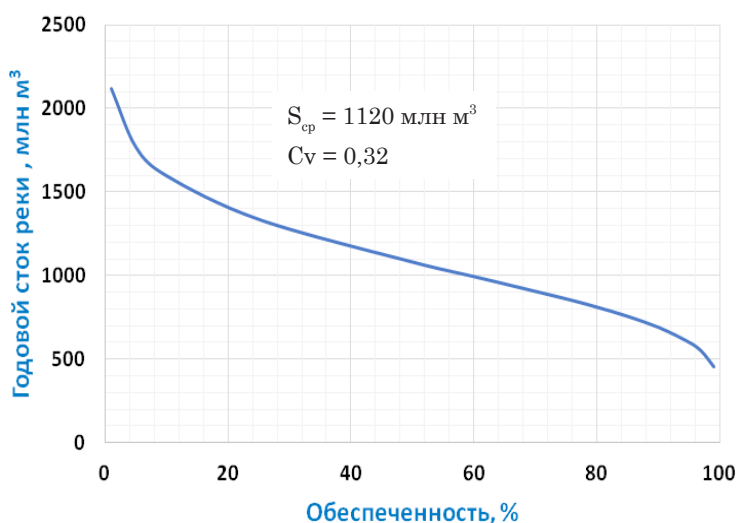


Рис. 3. Аналитическая кривая обеспеченности годового стока в створе возможного размещения гидроузла

Fig. 3. The analytical curve of the annual runoff in the range of the possible location of the hydraulic unit

Таблица 1. Параметры задачи, полученные в ходе имитационного моделирования

Table 1. Task parameters obtained during simulation

Параметры задачи	
M	0,50
M	0,31
K_r	0,50
$V_{\text{пла}}$	200,00
V_0	0,00
K_r	0,985

Соотношение гарантированной водоотдачи в условно расчетном створе реки Жиздры при отсутствии регулирования ($A_{\text{гар-бр}}$) и в условиях регулирования стока ($A_{\text{гар-рег}}$) на фоне минимального ($A_{\text{мин}}$) и нормативного гидрографа водопотребления ($A_{\text{норм}}$) показано на рисунке 4 в месячном разрезе.

На рисунке 5 приведены результаты регулирования притока в годовых объемах.

Обсуждение. Исследования в области управления водными ресурсами являются неизменно актуальными и находятся в центре внимания научного сообщества. При разработке правил использования водных ресурсов водохранилищ и их главной составляющей,

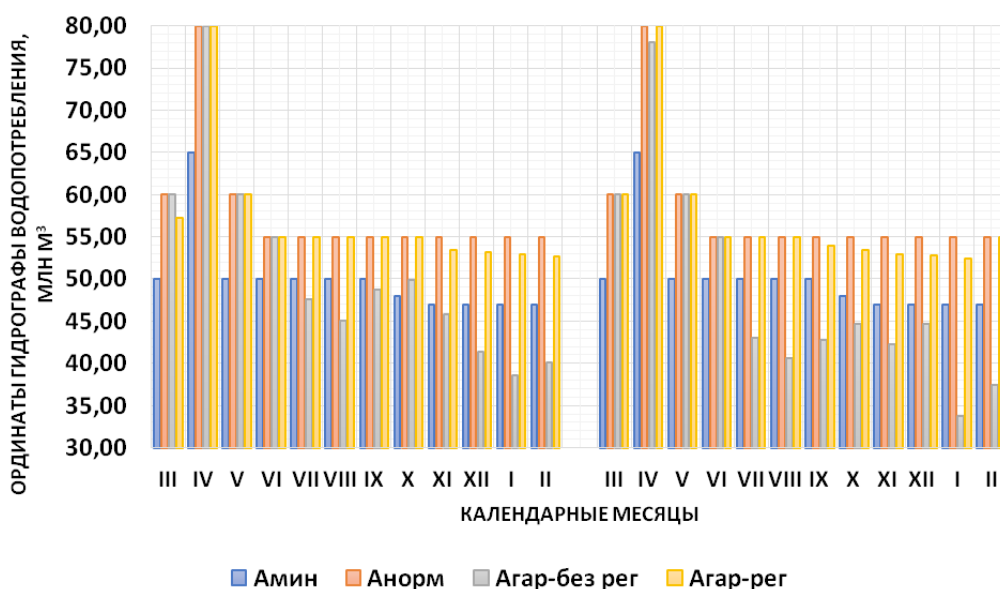


Рис. 4. Гидрографы гарантированного водопотребления двух смежных маловодных лет реки Жиздры 85%- и 90%-ной обеспеченности в створе потенциального гидроузла на фоне нормированных и минимальных требований включая санитарно-экологический попуск
 Fig. 4. Hydrographs of guaranteed water consumption of two related low-water years of the Zhizdra River of 85% and 90% availability in the range of a potential hydroelectric facility against the background of standardized and minimum requirements, including sanitary and environmental release

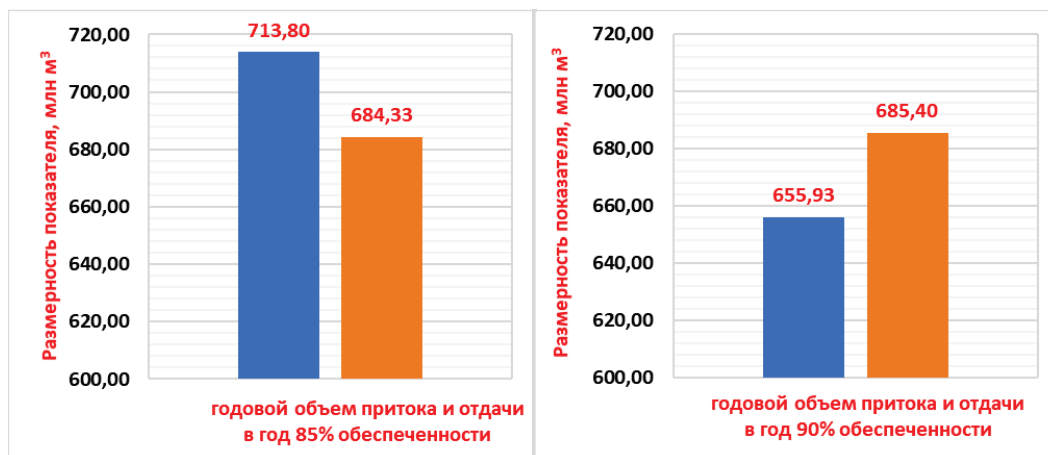


Рис. 5. Соотношение гарантированной отдачи и годового притока к водохранилищу
 Fig. 5. The ratio of guaranteed return and annual inflow to the reservoir

Таблица 2. Модель водохозяйственного баланса
Table 2. Water management balance model

$R_{\text{пер}}$	Календарные месяцы водохозяйствен- ного года	Приток, млн м ³	(+р, - нап)	объем водохранилища на начало интервала	объем водохранилища на конец интервала	Распотаемые ресурсы	Потенциальные ресурсы	$A_{\text{мин}}$	$A_{\text{норм}}$	Функция запроса, A	Дефицит, запланированный	Дефицит по отношению к $A_{\text{норм}}$	Планируемая отдача - 1 критерий	Планируемая отдача - 2 критерий	Дефицит по отношению к Амин (по факту)	Сборили резерв для повышения отдачи
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
130,00	III	92,13	-34,87	0,00	34,87	57,26	92,13	50,00	60,00	57,26	2,74	2,74	57,26	0,95	0,00	0,00
140,00	IV	109,24	-29,24	34,87	64,11	80,00	144,11	65,00	80,00	80,00	0,00	0,00	80,00	1,00	0,00	0,00
130,00	V	82,66	-22,66	64,11	86,77	60,00	146,77	50,00	60,00	60,00	0,00	0,00	60,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VI	72,62	-17,62	86,77	104,39	55,00	159,39	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VII	47,54	7,46	104,39	96,92	55,00	151,92	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VIII	45,09	9,91	96,92	87,01	55,00	142,01	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	IX	48,78	6,22	87,01	80,79	55,00	135,79	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	X	49,92	5,08	80,79	75,70	55,00	130,70	48,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	XI	45,75	7,62	75,70	68,09	53,37	121,45	47,00	55,00	53,37	1,63	1,63	53,37	0,97	0,00	0,00
127,50	XII	41,41	11,76	68,09	56,33	53,17	109,50	47,00	55,00	53,17	1,83	1,83	53,17	0,97	0,00	0,00
127,50	I	38,55	14,35	56,33	41,99	52,90	94,89	47,00	55,00	52,90	2,10	2,10	52,90	0,96	0,00	0,00
127,50	II	40,12	12,52	41,99	29,47	52,64	82,11	47,00	55,00	52,64	2,36	2,36	52,64	0,96	0,00	0,00
130,00	III	123,61	-63,61	29,47	93,07	60,00	153,07	50,00	60,00	60,00	0,00	0,00	60,00	1,00	0,00	0,00
140,00	IV	78,07	1,93	93,07	91,14	80,00	171,14	65,00	80,00	80,00	0,00	0,00	80,00	1,00	0,00	0,00
130,00	V	68,94	-8,94	91,14	100,08	60,00	160,08	50,00	60,00	60,00	0,00	0,00	60,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VI	56,06	-1,06	100,08	101,14	55,00	156,14	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VII	43,05	11,95	101,14	89,19	55,00	144,19	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VIII	40,54	14,46	89,19	74,73	55,00	129,73	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	IX	42,70	11,23	74,73	63,50	53,94	117,44	50,00	55,00	53,94	1,06	1,06	53,94	0,98	0,00	0,00
127,50	X	44,72	8,66	63,50	54,85	53,37	108,22	48,00	55,00	53,37	1,63	1,63	53,37	0,97	0,00	0,00
127,50	XI	42,30	10,64	54,85	44,21	52,94	97,15	47,00	55,00	52,94	2,06	2,06	52,94	0,96	0,00	0,00
127,50	XII	44,64	8,14	44,21	36,07	52,78	88,85	47,00	55,00	52,78	2,22	2,22	52,78	0,96	0,00	0,00
127,50	I	33,81	18,56	36,07	17,52	52,37	69,88	47,00	55,00	52,37	2,63	2,63	52,37	0,95	0,00	0,00
127,50	II	37,48	17,52	17,52	0,00	54,99	54,99	47,00	55,00	51,99	3,01	0,01	54,99	1,00	0,00	3,01
	ГОДЫ	1369,73	0,00			1369,73	2961,67	1202,00	1390,00	1366,72	23,28	20,27	1369,73	23,64	0,00	3,01

диспетчерских графиков, должны сочетаться основные проектные решения и принятые критерии удовлетворения требований водопользователей. Представляется, что эта задача на сегодняшний день в полной мере не решена. По-прежнему спорными остаются вопросы имитационно-оптимизационного подхода в разработке стратегии регулирования стока, необходимости и корректности многокритериальной оптимизации, структуры водохозяйственных балансов в процессе определения параметров водохранилищ и алгоритме управления водными ресурсами.

Выводы

В статье предлагается методика назначения режима гарантированной отдачи

водохранилищ в зависимости от прогнозируемого ресурса за расчетный интервал времени и наполнения водохранилища на начало интервала. При этом достигается максимальная гарантированная водоотдача в рамках двухкритериальной оптимизации. Очевидно, решение задачи большой размерности в общем виде, с опорой на продолжительные гидрологические ряды, возможна только с привлечением мощных средств оптимизации. Пробная версия модели реализована в среде Excel с использованием средств VBA и алгоритма «поиска решения». В дальнейших исследованиях планируется использование расширенного пакета программ «Solver», позволяющего ставить задачи для многолетних гидрологических рядов и многокритериальной оптимизации.

Список использованных источников

1. Водохозяйственные системы и водопользование: учебник / Под ред. Л.Д. Ратковича и проф. В.М. Маркина. М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. 452 с.
2. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ. Приказ Минприроды РФ от 26.01.2011 N17 Об утверждении Методических указаний по разработке правил использования водохранилищ. <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rf-ot-26012011-n-17/?ysclid=m1084ejhh0417635829>
3. Асарин А.Е., Бестужева К.Н., Христофоров А.В., Чалов С.Р. Водохозяйственные расчеты: учебное пособие. Географический факультет МГУ. М.: МГУ, 2012. 144 с.
4. Чокин Ш.Ч., Баишев Б.Б., Григорьев В.В. Расчеты водохранилищ многоцелевого назначения: Научное издание. Алма-Ата: Наука, 1983. 206 с.
5. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications – Unesco Publishing. Turin, 2005. 680 p.
6. Daniel P. Loucks and John S. Gladwell. Sustainability Criteria for Water Resource Systems: Cambridge University Press, 2008. 156 с.
7. Ratkovich L.D., Bakshtanin A.M., Glazunova I.V., Plokhikh N.E. Aspects of Multi – Year Flow Control. In Relation To Transboundary Rivers // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29, № S4. Pp. 2418-2439. EDN: HNIGCR.
8. Buber A., Bolgov M., Buber V. Statistical and Water Management Assessment of the Impact of Climate Change in the Reservoir Basin of the Volga-Kama Cascade on the Environmental Safety of the Lower Volga Ecosystem // Applied Sciences (Switzerland). 2023. Vol. 13, № 8. P. 4768.
9. Муалла М., Раткович Л.Д. Оценка водообеспеченности в речном бассейне на основе обобщенных критериев покрытия водопотребления // Гидротехническое строительство. 2023. № 10. С. 42-47.
10. Перминов А.В., Ильинич В.В., Наумова А.А. Практикум по регулированию стока. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. 153 с. EDN: MXSCEN.

References

1. Water management systems and water use: Textbook / Ed. by L.D. Ratkovich and Prof. V.M. Markin. Moscow, INFRA-M Scientific and Publishing Center Publ., 2019. 452 p.
2. Guidelines for the development of rules for the use of reservoirs. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated 26.01.2011 No. 17 On approval of the Guidelines for the development of rules for the use of reservoirs. <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rf-ot-26012011-n-17/?ysclid=m1084ejhh0417635829>
3. Asarin A.E., Bestuzheva K.N., Khristoforov A.V., Chalov S.R. Water management calculations: Textbook. Faculty of Geography of Moscow State University. Moscow, MGU Publ., 2012. 144 p.
4. Sh.Ch. Chokin B.B. Baishev. V.A. Grigorjev. Calculations of multi-purpose water management: scientific publication / Ministry of energetics and electrification of the USSR, Kazakh research institute. Alma-Ata: Nauka, 1983. 206 p.
5. Loucks D.P. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications / D.P. Loucks, E. Van Beek. – Unesco Publishing, Turin, 2005. 680 p.
6. Daniel P. Loucks and John S. Gladwell. Sustainability Criteria for Water Resource Systems: Cambridge University Press, 2008. 156 s.
7. Aspects of Multi-Year Flow Control In Relation To Transboundary Rivers / L.D. Ratkovich, A.M. Bakshtanin, I.V. Glazunova, N.E. Plokhikh // International Journal of Advanced Science and Technology 2020. Vol. 29, No. S4. P. 2418-2439. – EDN HNIGCR.
8. Buber A. Statistical and Water Management Assessment of the Impact of Climate Change in the Reservoir Basin of the Volga–Kama Cascade on the Environmental Safety of the Lower Volga Ecosystem / A. Buber, M. Bolgov, V. Buber // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Vol. 13, No. 8. – P. 4768
9. Mualla M., Ratkovich L.D. Assessment of the of water availability in the river basin on the basis of the generalized criteria of covering water consumption // Hydro technical building. 2023. № 10. P. 42-47.
10. Perminov A.V., Pjinich V.V., Naumova A.A. Practicum on flow regulation. Moscow: Russian State

11. Ильинич В.В., Перминов А.В., Гавриловская Н.В. Использование байесовских технологий для оценки вероятностных характеристик функционирования водохранилища // Известия Алтайского государственного университета. 2023. № 1 (129). С. 95-99. DOI: 10.14258/izvasu(2023)1-15. EDN: CEXPHС.

Об авторах

Лев Данилович Раткович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; <https://orcid.org/0000-0002-6900-2640>; Scopus Author ID: 6506421682; SPIN-код: 5300-5669, AuthorID: 527541; levkivr@mail.ru

Светлана Анатольевна Соколова, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; SPIN-код: 3004-0140, AuthorID: 939094; 57218659380 Scopus; AAE-3539-2022 WOS; sokolovasvetlana@mail.ru

Манхаль Муалла, аспирант кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; manhal.moualla@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Раткович Л.Д., Соколова С.А., Муалла Манхаль выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись.

Раткович Л.Д., Соколова С.А., Муалла Манхаль имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of authors

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 06.05.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 19.08.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 19.08.2024

Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2021. 153 p. EDN: MXSCEN.

11. Пjinich V.V., Perminov A.V., Gavrilovskaya N.V. Use of Bayesian technologies for assessing probabilistic characteristics of reservoir functioning. 2023. № 1 (129). P. 95-99. DOI: 10.14258/izvasu(2023)1-15. EDN: CEXPHС

About the authors

Lev D. Ratkovich, DSc (Eng), professor, professor of the department of hydraulics, hydrology and management of water resources; <https://orcid.org/0000-0002-6900-2640>; Scopus Author ID: 6506421682; SPIN-code: 5300-5669, AuthorID: 527541; levkivr@mail.ru

Svetlana A. Sokolova, CSc (Eng), associate professor of the department of hydraulics, hydrology and management of water resources; SPIN-code: 3004-0140, AuthorID: 939094; 57218659380 Scopus; AAE-3539-2022 WOS; sokolovasvetlana@mail.ru

Manhal Mualla, post graduate student of the department of hydraulics, hydrology and management of water resources; manhal.moualla@mail.ru

Ratkovich L.D., Sokolova S.A., Manhal Mualla carried out practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript.

Ratkovich L.D., Sokolova S.A., Manhal Mualla have a copyright to the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-108-114>

УДК 556.3: 004.032.26



ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Т.А. Шаташвили^{1✉}, М.Ю. Бадекин², Д.М. Бенин³, Н.Н. Ивахненко³, Н.А. Коноплин³¹ ФГБОУ ВО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени М. Туган-Барановского»; 283048, г. Донецк, ул. Шорса, 31, Россия² ФГБОУ ВО «Донецкий национальный университет»; 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, Россия³ ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Исследована возможность решения обратной задачи с помощью искусственных нейронных сетей. Для демонстрации подхода рассматривается пример, состоящий из аналитической модели переноса загрязняющих веществ из точечного источника в стационарном поле потока. Модель использовалась для моделирования поведения систем подземных вод при различных значениях коэффициента дисперсии. Далее набор контролируемых многослойных нейронных сетей прямого распространения обучали оценке, определению, подбору параметра, соответствующего заданным историям концентрации. Полученные результаты показали удовлетворительную точность оценок нейронной сети, что подтверждает устойчивость подхода к анализу данных в полевых экспериментах. При обучении четырех искусственных нейронных сетей контролируемого, многослойного и прямого типов установлено, что каждая из них специализировалась в широком диапазоне значений. Это привело к более точным прогнозам по сравнению со случаем обучения одной сети на всем диапазоне значений. Кроме того, в статье показана способность нейронной сети идентифицировать параметр дисперсии при заданной концентрации при влиянии «шума». В результате анализа топологий применяемых нейронных сетей установлено, что для обеспечения удовлетворительного уровня точности расчетов достаточным является наличие 10 скрытых узлов.

Ключевые слова: стационарный поток, математическая модель, нейронные сети, обучение, устойчивость, дисперсия

Формат цитирования: Шаташвили Т.А., Бадекин М.Ю., Бенин Д.М., Ивахненко Н.Н., Коноплин Н.А. Оценка параметров моделей подземных вод с помощью искусственных нейронных сетей // Природообустройство. 2024. № 4. С. 108-114. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-108-114>

Original article

ASSESSMENT OF PARAMETERS OF GROUNDWATER MODELS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Т.А. Shatashvili^{1✉}, M.Yu. Badekin², D.M. Benin³, N.N. Ivakhnenko³, N.A. Konoplin³¹ FSBEI HE «Donetsk National University OF Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky» 283048, Donetsk, st. Shchorsa, 31, Russia² FSBEI HE «Donetsk State University», 283001, Donetsk, st. Universitetskaya, 24, Russia³ FSBEI HE «Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after С.А. Timiryazev», 127434, Moscow, str. Timiryazevskaya, 49, Russia

Abstract. The paper investigates the possibility of solving the inverse problem using artificial neural networks. To demonstrate the approach, an example is considered consisting of an analytical model of the transfer of pollutants from a point source to a stationary flow field. The model was used to model the behavior of groundwater systems at different values of the dispersion coefficient. Next, a set of controlled multilayer neural networks of direct propagation was trained to evaluate, determine, and select a parameter corresponding to given concentration histories. The results obtained in the work showed satisfactory accuracy of neural network estimates, which confirms the stability of the approach to data analysis in field experiments. When training four artificial neural networks of a controlled, multilayer and direct type, it was found that each of them specialized in a wide range of values. This led to more accurate predictions compared to the case of training a single network over the entire range of values. In addition, the paper shows the ability of a neural network to identify the dispersion parameter at a given concentration under the influence of “noise”. An analysis of the topologies of the applied neural networks has established that the presence of 10 hidden nodes is sufficient to ensure a satisfactory level of calculation accuracy.

Keywords: stationary flow, mathematical model, neural networks, training, stability, dispersion

Format of citation: Shatashvili T.A., Benin D.M., Badekin M.Yu., Ivakhnenko N.N., Konoplin N.A. Assessment of parameters of groundwater models using artificial neural networks // Prirodoobustrojstvo. 2024. No 4. P. 108-114. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-108-114>

Введение. В последние годы математические модели часто использовали для моделирования систем подземных вод и анализа их поведения в различных физических сценариях. Множество применений было выполнено в области управления ресурсами подземных вод [1], диффузии морской воды [2], восстановления водоносного горизонта [3], оценки эффективности хранилищ высокоактивных радиоактивных отходов [4]. В силу значительной инерциальной невозможно проводить реальные испытания или мониторинг, поэтому оценка должна основываться на применении прогнозных моделей. В целом эти физически обоснованные модели относятся к типу распределенных параметров, поскольку реакция системы водоносного горизонта определяется уравнениями в частных производных, которые описывают изменение концентрации вещества в зависимости от пространственных координат и времени. Эти уравнения учитывают различные процессы, происходящие в системе: такие, как диффузия, адвекция, дисперсия и химические реакции.

Уравнения в частных производных позволяют моделировать динамику системы водоносного горизонта и предсказывать ее реакцию на различные воздействия. Они широко используются в гидрогеологии, экологии и других областях, где необходимо изучать процессы, происходящие в пористых средах.

Гидравлические параметры и параметры качества воды (вязкость и плотность воды, химический состав, наличие примесей), заложенные в модели, не поддаются прямому измерению с физической точки зрения и должны оцениваться на основе наблюдений гидравлического напора или массовой концентрации. Эта проблема определения параметров модели называется обратной задачей. Она имеет первостепенное значение в процессе моделирования, поскольку способность модели подземных вод прогнозировать поведение водоносного горизонта зависит от надежности и точности оценок указанных параметров. Это связано с тем, что модель подземных вод представляет собой сложную систему уравнений, описывающих физические, химические и биологические процессы, происходящие в водоносном горизонте.

В работе исследовалась возможность решения обратной задачи идентификации параметров с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС), представлено исследование потока

подземных вод и переноса загрязняющих веществ из точечного источника в однородном изотропном водоносном горизонте в условиях насыщения. В ходе исследований применялась простая модель, поскольку цель работы заключается только в изучении потенциальной способности ИНС решать обратную задачу и получать оценки параметров, а не в фактическом применении этой методологии для решения данной задачи.

Материалы и методы исследований. В процессе работы сети обучаются распознавать значения параметра модели с помощью наборов данных, приводящих к соответствующему распределению концентрации на выходе. После обучения свойства сети можно использовать для оценки значений параметров модели, соответствующих новым данным концентрации, представленных во время обучения, но все еще в пределах объема пространства входных переменных, охватываемого во время обучения.

Результаты и их обсуждение. Разработка математической модели для описания эволюции системы подземных вод требует решения двух задач: прямой и обратной.

Прямая задача заключается в определении состояния системы подземных вод в определенный момент при известных начальных условиях и параметрах модели. Это позволяет оценить текущее состояние системы и спрогнозировать ее развитие в будущем.

Обратная задача заключается в определении параметров модели, которые наилучшим образом соответствуют наблюдаемым данным о системе подземных вод. Это более сложная задача, требующая применения методов оптимизации и статистического анализа.

Решение обеих задач необходимо для создания точной и эффективной математической модели, которая сможет адекватно описывать эволюцию системы подземных вод и предсказывать ее поведение в различных условиях.

Определение параметров водоносного горизонта осуществлялось эмпирическим путем в предположении того, что водоносный горизонт является однородным и изотропным и существует решение уравнения диффузии в замкнутой форме для основного уравнения. Однако такие методы неприменимы в ситуациях, когда параметры водоносного горизонта меняются в зависимости от местоположения.

В линейном приближении примером методологий является метод наименьших квадратов [5]. В нелинейном случае задача пока не получила строгого решения. Этот факт вынуждает применять неоптимальные решения, которые по сути являются локальными минимумами анализируемой функции.

Для решения обратной задачи идентификации параметров разработаны различные методы [6]. Нейман классифицировал эти методы как прямые и косвенные. Косвенный метод основан на критерии выходной ошибки, при котором существующая оценка параметров итеративно улучшается до тех пор, пока отклик модели не станет достаточно близким к измеренному выходному сигналу. Вычисленные выходные значения получаются из решения прямой задачи с помощью значений параметров, оцененных на каждой итерации. Набор «наилучших подходящих» параметров можно найти путем решения задачи оптимизации. Однако если функция ошибок имеет более одного минимума в допустимом множестве решений, этот подход может привести к локальному, а не к глобальному минимуму, как указывалось ранее.

Развитие методов обратного решения затруднено ввиду ряда присущих им трудностей. Это связано с тем, что обратная задача часто является некорректной и характеризуется неоднозначностью и нестабильностью идентифицируемых параметров. Неустойчивость обратного решения обусловлена ошибками наблюдаемых значений зависимых переменных, отражающихся в больших ошибках идентифицируемых параметров. Проблема уникальности связана с концепцией идентифицируемости, рассматривающей вопрос о том, возможно ли вообще получить уникальное решение для неизвестных параметров модели из собранных наблюдений.

Другая сложность, присущая обратной задаче, связана с тем, что количество и качество наблюдаемых данных зачастую недостаточны. Число наблюдений обязательно конечно и ограничено, тогда как пространственная область обычно непрерывна. Для неоднородного водоносного горизонта размерность параметра теоретически бесконечна. На практике пространственные переменные аппроксимируются конечно-разностной схемой или схемой конечных элементов. При этом водоносная система подразделяется на зоны, характеризующиеся постоянными значениями параметров.

В нейронной сети прямого распространения сигнал обрабатывали напрямую от входного слоя к выходному. Каждый узел собирает выходные значения, умноженные на соответствующие веса соединений, со всех узлов предыдущего

уровня с помощью сигмоидальной функции $f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$, и результат доставляется через все связи с узлами последующего слоя.

Значения весов соединений определяли посредством процедуры обучения. В работе использовали обычный алгоритм обратного распространения ошибки, следующий из общего метода градиентного спуска. Этот алгоритм состоит в многократном представлении набора данных ввода-вывода n_p и итеративной корректировке значений весов соединений так, чтобы минимизировать среднеквадратическую функцию ошибки отклонения выходного сигнала или функцию энергии D по всем шаблонам обучения и всем отсутствием выходных данных. D определяли следующим образом:

$$D = \frac{1}{2n_p n_o} \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{l=1}^{n_o} (t_{pl} - o_{pl})^2, \quad (1)$$

где t_{pl} и o_{pl} – истинные и предсказанные сетью значения l -го выходного узла для представленного p -го набора данных.

Алгоритм обратного распространения ошибки выполняет крутой спуск по поверхности в пространстве весов, высота которого в любой точке равна соответствующему значению функции ошибок. Точнее на n -й итерации вес w_{ij} каждого соединения обновляется в соответствии с процедурой релаксации:

$$\Delta w_{ij}^{(n)} = -\alpha \frac{\partial D}{\partial w_{ij}} + \eta \Delta w_{ij}^{(n-1)}, \quad (2)$$

где α и η – коэффициенты обучения и импульса соответственно. Первый член в правой части уравнения называется градиентным членом и следует из обычного метода наискорейшего спуска. Второй член – момент импульса – вводит своего рода эффект гистерезиса: в весовом пространстве, где поверхность ошибок D сильно искривлена, градиентный член велик и могут возникнуть колебания значений w_{ij} . Импульс добавляет своего рода память, позволяющую избежать или уменьшить резкие изменения весов:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} C(r, t) = 0, \quad t > 0; \quad (3)$$

$$4\pi\vartheta \int_0^{\infty} Cr^2 dr = M, \quad t \geq 0, \quad (4)$$

где ϑ – объемная доля жидкости, совпадающая с пористостью n , поскольку для простоты мы предполагаем, что поле течения является насыщенным. Это означает, что жидкость заполняет все пространство, в котором она может находиться, и ее движение определяется исключительно внешними силами – такими, как градиент давления или сила тяжести. В таком случае можно использовать упрощенные модели и методы расчета, которые позволяют получить достаточно точные результаты без учета сложных процессов, происходящих в жидкости. Однако стоит отметить, что в реальных условиях поле течения редко бывает полностью насыщенным. Обычно в жидкости присутствуют пузырьки воздуха или другие примеси, которые могут влиять на ее свойства и поведение.

Уравнение (4) представляет собой принцип сохранения массы, утверждающий, что сумма масс растворенного вещества во всей области в любой момент времени равна M . Применяя преобразование Больцмана и вводя соответствующие безразмерные переменные, можно преобразовать уравнение в частных производных в обыкновенное дифференциальное уравнение. Решая последнее с соответствующими преобразованными дополнительными условиями и затем преобразуя обратно к сферическим координатам, получим решение для поля концентрации на расстоянии r от начала координат в момент времени t :

$$C(r,t) = \frac{M/9}{8(\pi Dt)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dr}\right). \quad (5)$$

На рисунке 1 показана зависимость r от C/M для заданных значений D и в случае неизменной пористости. С увеличением времени растворенное вещество постепенно распространяется, и максимальная концентрация в источнике становится все меньше. Ввиду линейности уравнений, управляющих этим процессом, полученное решение можно использовать для построения решений других задач, применяя принцип суперпозиции. В общем аналитические решения задач адвекции-дисперсии могут иметь два основных применения. Прежде всего, поскольку аналитические решения обеспечивают точные решения проблем, их можно использовать в процессе калибровки модели и проверки кода программного продукта для машинного обучения. Кроме того, аналитические решения могут использоваться для моделирования некоторых простых испытаний как в полевых, так и в лабораторных условиях, для объяснения наблюдаемых данных и определения значений параметров, связанных с явлением дисперсии.

Благодаря этой процедуре обучения сеть может построить внутреннее представление отношений ввода/вывода, характеризующее исследуемую задачу. Успех обучения сильно зависит от нормализации данных и выбора параметров обучения, а именно коэффициентов обучения и импульса. В данной работе каждую выборку данных передавали в интервале (0,2; 0,8) с помощью аффинного отображения; коэффициенты обучения и импульса были выбраны равными 0,7 и 0,8 соответственно. Более того, веса соединений инициализировали случайным образом в интервале (-0,3; 0,3). После завершения обучения окончательные веса соединений оставляли фиксированными и в сеть передавали новые входные шаблоны, способные вызывать

информацию, хранящуюся в весах соединений во время обучения, для получения соответствующего вывода, согласованного с внутренним представлением входных данных.

Нелинейность сигмоидальной функции в элементах обработки позволяет нейронной сети изучать произвольные нелинейные отображения. При этом каждый узел действует независимо от всех остальных, и его функционирование опирается только на локальную информацию, предоставляемую через соединения, то есть функционирование одного узла не зависит от состояний тех других узлов, с которыми он не связан. Это обеспечивает эффективное распределенное представление и параллельную обработку, а также внутреннюю отказоустойчивость и возможность обобщения.

Рассмотрим бесконечную, однородную и изотропную область, в которой поле потока стационарно, а масса растворенного вещества впрыскивается мгновенно в точку. Тогда общее гидродинамическое дисперсионное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

где C – концентрация растворенного вещества в точке (x, y, z) и времени t , а D – коэффициент молекулярной диффузии в пористой среде.

Несмотря на то, что поле течения стационарно, концентрация $C(x, y, z, t)$ является функцией времени. Если предположить, что точечный источник расположен в начале отсчетной

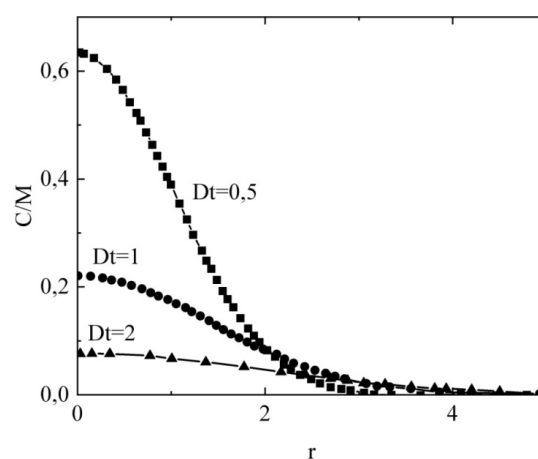


Рис. 1. Серия зависимостей отношения от расстояния r при фиксированном произведении коэффициента молекулярной диффузии D на время t

Fig. 1. A series of dependencies of the ratio on the distance r with a fixed product of the molecular diffusion coefficient D and the time t

декартовой системы, то при переходе к сферической системе координат (r, Θ, φ) , с учетом того, что $\partial C/\partial\Theta = 0$ и $\partial C/\partial\varphi = 0$, уравнение (6) можно переписать как

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right). \quad (7)$$

Условия задачи задаются начальными и граничными условиями:

$$C(r, 0) = 0, \quad r > 0. \quad (8)$$

Способность сети идентифицировать параметр дисперсии, соответствующий заданной концентрации, была исследована с точки зрения простоты обработки зашумленных данных. Вопрос влияния шума на экспериментальные данные имеет большое значение в обратных задачах, поскольку флуктуации усиливаются в обратном процессе идентификации параметров или исходных условиях. В качестве примера были взяты значения D в диапазоне (1, 10), и все 18 входных данных случайным образом варьировались путем добавления гауссового белого шума с относительным стандартным отклонением в диапазоне от нескольких процентов до 0,1 [7, 8].

На рисунке 2 представлены относительные ошибки, допущенные сетью при прогнозировании значений параметра распределения для 500 зашумленных историй концентрации.

На графике наблюдается удовлетворительная точность оценок сети, что подтверждает

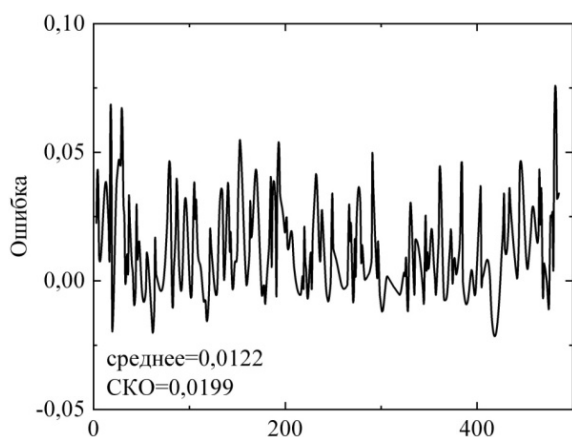


Рис. 2. Относительные ошибки нейронной сети в предсказании параметра дисперсии $1 < D < 10$ в случае зашумленных паттернов.

По оси абсцисс отображается номер набора данных

Fig. 2. Relative errors of the neural network in predicting the dispersion parameter of $1 < D < 10$ in the case of noisy patterns. The abscissa axis displays the dataset number

устойчивость подхода к зашумленным данным, встречающимся в полевых экспериментах. Аналитическую модель, представленную выше, использовали для моделирования наблюдений поля концентрации в водоносном горизонте для различных значений параметра дисперсии.

Полученные концентрации были использованы для обучения нейронных сетей решению обратной задачи идентификации параметров. Для нашего исследования, касающегося точечного источника в поле стационарного потока, для параметра D рассматривали диапазон значений $[0,1; 500]$. Четыре искусственные нейронные сети контролируемого, многослойного, прямого типа были обучены с помощью метода ошибок, для определения значений параметра, создающего заданную историю концентрации. [9, 10]. Каждая сеть специализировалась на определенном поддиапазоне общего диапазона. Точнее одна сеть была обучена на поддиапазоне $[0,1; 1]$, одна – на $[1, 10]$, одна – на $[10, 100]$, последняя – на поддиапазоне $[100, 500]$. Специализация обучения сетей привела к более точным прогнозам по сравнению со случаем обучения одной сети на всем диапазоне значений.

В ходе обучения каждая сеть получила на вход 500 наборов данных, состоящих из 18 входов и одного соответствующего значения на выходе. При этом 18 входных данных были заданы значениями концентрации при $r = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ и $t = 1, 2, 3$ в соответствующих единицах. Выходные данные состояли из значений коэффициента дисперсии D в соответствующем поддиапазоне. С учетом наблюдений оказалось, что подходящим для расчетов есть число из 10 скрытых узлов. Время обучения на персональном компьютере на базе четырех ядерного процессора Intel Core i5-2430M варьировалось от 27 до 35 мин.

После завершения обучения свойства обобщения и предсказательная способность сетей были протестированы на четырех выборках из 500 новых шаблонов, ранее не использовавшихся на этапе обучения. Новый набор данных был передан в соответствующую нейронную сеть, что было определено в результате анализа предварительной обработки значений входных данных, позволяющих определить домен, которому принадлежит набор данных.

Выводы

На основании полученных результатов можно утверждать, что новый подход к решению обратной задачи идентификации параметров в моделях подземных вод, основанный

на применении искусственных нейронных сетей, показывает удовлетворительную точность оценок сети. Это подтверждает устойчивость подхода к анализу данных в полевых экспериментах.

В исследованиях показана также способность сети идентифицировать параметр дисперсии, соответствующий заданной концентрации, на предмет влияния «шума» на данные. В результате обучения четырех искусственных нейронных сетей контролируемого, многослойного и прямого типов показано, что каждая сеть специализировалась в широком диапазоне значений, и это привело к более точным прогнозам по сравнению со случаем обучения одной сети на всем диапазоне значений.

Анализ топологий применяемых сетей показал, что для обеспечения удовлетворительного

уровня точности расчетов достаточным является наличие 10 скрытых узлов.

Таким образом, подход применения искусственных нейронных сетей подтвердил способность идентифицировать неизвестные параметры с хорошей точностью даже при наличии значительного шума в данных.

В настоящее время изучается также возможность применения неконтролируемых самоорганизующихся искусственных нейронных сетей для выполнения предварительной обработки данных и связанной с этим идентификации домена новых входящих наборов данных, которые затем передаются в правильные контролируемые многоуровневые структуры нейронных сетей прямого распространения, обученных методом обратного распространения ошибки для фактической оценки параметров.

Список использованных источников

1. **Троянский М.С.** Компьютерное моделирование фильтрации подземных вод // Статистика и экономика. 2012. № 3. С. 175-178.
2. **Чикин А.Л., Кулыгин В.В., Чикина Л.Г.** Моделирование колебаний уровня воды в дельте Дона по прогнозам ветровой ситуации // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2023. Т. 16, № 3. С. 83-92.
3. **Hamid Vahdat-Aboueshagh, Frank T. – C. Tsai, Dependra Bhatta, Krishna P. Paudel.** Irrigation-Intensive Groundwater Modeling of Complex Aquifer Systems Through Integration of Big Geological Data // *Frontiers in Water*. 2021. Т. 3. С. 623476.
4. **Урманов Д.И., Маневич А.И., Лосев И.В.** Геоинформационное моделирование напряженно-деформационного состояния геологической среды для обеспечения безопасной подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов // Геоинформационное картографирование в регионах России: Сборник. Воронеж: Изд-во «Цифровая полиграфия», 2020. С. 243-246
5. **Цыплаков А.А.** Введение в моделирование в пространстве состояний // Квантиль. 2011. Т. 9. С. 1-24.
6. **Atangana A.** (2018). Fractional Operators and Their Applications. Fractional Operators with Constant and Variable Order with Application to Geo-Hydrology, 79-112. DOI: 10.1016/b978-0-12-809670-3.00005-9.
7. **Шаташвили Т.А., Бадекин М.Ю., Ивахненко Н.Н., Коноплин Н.А.** Прогноз параметра «Мутность» на выходе из песчаных фильтров, питаемых сточными водами // Природообустройство. 2023. № 5. С. 60-65. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-5-60-65.
8. **Шаташвили А.Д., Папазова Е.Н., Фомина-Шаташвили Т.А., Ивахненко Н.Н.** Некоторые линейные эквивалентные преобразования гауссовских случайных полей в n-мерном евклидовом пространстве R^n . Ч. II. Об эквивалентности двух гауссовских мер, порожденных решениями двумя разными краевыми задачами Дирихле-Неймана в евклидовом пространстве R^n // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2022. Т. 59, № 5. С. 250-261.

References

1. **Troyansky M.S.** Computer modeling of underground water filtration // *Statistics and economics*. 2012. No. 3. P. 175-178.
2. **Chikin A.L., Kulygin V.V., Chikina L.G.** Modeling of fluctuating water levels in the Don delta according to forecasts of the wind situation // *Bulletin of the South-Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming*. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 83-92.
3. **Hamid Vahdat-Aboueshagh, Frank T. – C. Tsai, Dependra Bhatta, Krishna P. Paudel.** Irrigation-Intensive Groundwater Modeling of Complex Aquifer Systems Through Integration of Big Geological Data // *Frontiers in Water*. 2021. Vol. 3. P. 623476.
4. **Uрманov D.I., Маневич A.I., Лосев I.V.** Geo-information modeling of the stress-strain state of the geological environment to ensure safe underground isolation of highly active radioactive waste // *Geoinformation mapping in the regions of Russia*. 2020. P. 243-246.
5. **Tsyplakov A.A.** Introduction to modeling in solid space // *Quantil*. 2011. Vol. 9. P. 1-24.
6. **Atangana A.** (2018). Fractional Operators and Their Applications. Fractional Operators with Constant and Variable Order with Application to Geo-Hydrology, 79-112. doi:10.1016/b978-0-12-809670-3.00005-9
7. **Shatashvili T.A., Badekin M.Yu., Ivakhnenko N.N., Konoplin N.A.** Prediction of the “Turbidity” parameter at the outlet of sand filters supplied with wastewater // *Prirodoobustrojstvo*. 2023. No. 5. P. 60-65. DOI 10.26897/1997-6011-2023-5-60-65.
8. **Shatashvili A.D., Papazova E.N., Fomina-Shatashvili T.A., Ivakhnenko N.N.** Some linear equivalent transformations of Gaussian random fields in the n-dimensional Euclidean space R^n part II: on the equivalence of two Gaussian measures generated by the solutions of two different Dirichlet-Neumann boundary value problems in the Euclidean space R^n // *Bulletin of the Luhansk State University named after Vladimir Dahl*. 2022. V. 59. No. 5. P. 250-261.
9. **Lyasheva S.A., Shleymovich M.P., Kirpichnikov A.P., Leonova I.V.** Neuronet forecasting of thermodynamic characteristics of individual substances // *Bulletin*

8. Ляшева С.А., Шлеймович М.П., Кирпичников А.П., Леонова И.В. Нейросетевое прогнозирование термодинамических характеристик индивидуальных веществ // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20, № 18. С. 111-114.

9. Абросимов М.А., Бровко А.В. Метод обучения слоев свертки в искусственной нейронной сети с помощью ограниченной машины Больцмана // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 3, № 1 (80). С. 114-117.

Об авторах

Тамара Александровна Шаташвили, канд. физ.-мат. наук доцент; shatal@bk.ru

Максим Юрьевич Бадекин, старший преподаватель; SPIN-код: 1447-7503, Author ID: 201633, korund2002@list.ru

Дмитрий Михайлович Бенин, канд. техн. наук, доцент, директор Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; SPIN-код: 6243-0567, Author ID: 708496, dbenin@rgau-msha.ru

Наталья Николаевна Ивахненко, канд. физ.-мат. наук, доцент; SPIN-код: 5082-0613, Author ID: 836861; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru

Николай Александрович Коноплин, канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой физики; SPIN-код: 6797-4550, Author ID: 580233; konoplin@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Шаташвили Т.А., Бадекин М.Ю., Бенин Д.М., Ивахненко Н.Н., Коноплин Н.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 02.05.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 22.07.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 22.07.2024

of Kazan Technological University. 2017. Vol. 20. No. 18. P. 111-114.

10. **Abrosimov M.A., Brovko A.V.** A method of learning convolution layers in an artificial neural network using a constrained Boltzmann machine // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2015. Vol. 3. No. 1 (80). P. 114-117.

Author information

Tamara A. Shatashvili, CSc (Phys-math), associate professor; shatal@bk.ru

Maxim Yu. Badekin, senior lecturer; SPIN code: 1447-7503, Author ID: 201633, korund2002@list.ru

Dmitry M. Benin, CSc (Eng), associate professor; Director of the A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; SPIN-код: 6243-0567, Author ID: 708496, dbenin@rgau-msha.ru

Natalya N. Ivakhnenko, CSc (Phys-math), associate professor; SPIN: 5082-0613, Author ID: 836861; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru

Nikolai A. Konoplin, CSc (Phys-math), associate professor; SPIN: 6797-4550, Author ID: 580233; konoplin@rgau-msha.ru

Shatashvili T.A., Badekin M.Yu., Benin D.M., Ivakhnenko N.N., Konoplin N.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

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

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-115-123>

УДК 630*181.351



РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЛЕСНЫХ ПЛАНТАЦИЙ В ДФО

Л.Т. Крупская^{1✉}, М.Ю. Филатова¹, Л.П. Гуль¹, А.В. Леоненко²

¹Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства («ДальНИИЛХ»), г. Хабаровск, Россия

²Институт горного дела ДВО РАН (Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН) (ИГД ДВО ХФИЦ ДВО РАН), г. Хабаровск, Россия

Аннотация. Обобщен многолетний опыт изучения проблемы разработки критериев оценки пригодности лесных участков для создания лесных плантаций, что и явилось целью исследований. К объектам исследований относятся лесные участки для создания лесных плантаций, расположенные в лесных районах Дальневосточного федерального округа (ДФО); почвогрунты, снежный покров, световой режим, температура, водные объекты в границах субъектов ДФО Российской Федерации; рекультивированные участки; сеянцы и черенки лиственницы и других хвойных и лиственных пород; природно-климатические факторы. В качестве методов исследований использованы маташпарат, геоинформационные системы и дистанционное зондирование Земли. Применение метода исследований получения информации об объекте или явлении без непосредственного физического контакта с ним предоставило возможность с помощью мультиспектральных комбинированных снимков определить нарушенные земли и рассчитать индекс изображения NDVI. Выявлен низкий показатель NDVI на исследуемом участке (от 0,034 до 0,063), указывающий на слабое лесовосстановление. На основе данных лимитирующих факторов с учетом региональных природно-климатических особенностей ДФО предложена детализированная дифференциация критериев оценки пригодности лесных участков от минимального (1) до максимального (5) значений путем суммирования их оценочного показателя. На основе анализа полученных результатов доказана возможность успешного выращивания плантационных лесов с применением биостимуляторов.

Ключевые слова: лесные плантации, критерии пригодности, лесные участки, дистанционное зондирование Земли, рекультивированные участки

Формат цитирования: Крупская Л.Т., Филатова М.Ю., Гуль Л.П., Леоненко А.В. Разработка критериев оценки пригодности лесных участков для создания лесных плантаций в ДФО // Природообустройство. 2024. № . С. 115-123. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-115-123>

Original article

DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR ASSESSING THE SUITABILITY OF FOREST PLOTS FOR THE CREATION OF FOREST PLANTATIONS IN THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT

L.T. Krupskaya^{1✉}, M.Yu. Filatova¹, L.P. Gul¹, A.V. Leonenko²

¹Far Eastern Research Institute of Forestry, Khabarovsk, Russia

²Institute of Mining of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences), Khabarovsk, Russia

Abstract. The long-term experience of studying the problem of developing criteria for assessing the suitability of forest plots for the creation of forest plantations is summarized, which was the purpose of the research. The objects of research include forest plots for the creation of forest plantations located in the forest areas of the Far Eastern Federal District (FEFD); soils, snow cover, light regime, temperature, water bodies within the borders of the subjects of the Far Eastern Federal District

of the Russian Federation; reclaimed areas; seedlings and cuttings of larch, etc. coniferous and deciduous species; natural and climatic factors. The research methods used are the matapparatus, geoinformation systems and remote sensing of the Earth. The application of the research method for obtaining information about an object or phenomenon without direct physical contact with it made it possible to identify disturbed lands using multispectral combined images and calculate the NDVI image index. A low NDVI index was found in the studied area (from 0.034 to 0.063), indicating weak reforestation. Based on these limiting factors, taking into account the regional natural and climatic characteristics of the Far Eastern Federal District, a detailed differentiation of criteria for assessing the suitability of forest plots from a minimum (1) to a maximum (5) value is proposed by summing up their estimated indicator. Based on the analysis of the obtained results, the possibility of successful cultivation of plantation forests with the use of biostimulants has been proved.

Keywords: forest plantations, suitability criteria, forest areas, remote sensing of the Earth, reclaimed areas

Format of citation: Krupskaya L.T., Filatova M.Yu., Gul L.P., Leonenko A.V. Development of criteria for assessing the suitability of forest plots for the creation of forest plantations in the Far Eastern Federal District // *Prirodobustroystvo*. 2024. № 3. P. 115-123. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-115-123>

Введение. Оценка пригодности лесных участков с целью создания лесных плантаций позволила установить, что значительный интерес представляют исследования, направленные на выявление факторов и влияния их сочетаний на величину возможного урожая древесины при организации ее производства на лесосырьевых плантациях, а также определение критериев. Ниже приведены мнения исследователей оценки пригодности лесных участков для плантационного лесовыращивания. Так, Aminuddin Mane Kandari and etc. [1] на основе многокритериального подхода полагают, что эта информация о пригодности земель необходима для определения приоритетности подходящих лесных насаждений в целях развития землепользования. В исследованиях применен метод ГИС-технологий, произведен сбор данных, включающих в себя сведения о биофизике земель, климате и развитии лесопользования, а также осуществлены оценка и картографирование.

Разработка пространственных данных была использована для составления карты рекомендуемого лесопользования. Результаты показали, что для оценки пригодности земель Aminuddin Mane Kandari and etc. использовали следующие педо- и агроклиматические характеристики для развития плантационных лесов: общая площадь, физико-топографические и геологические условия, рельеф местности и уклон, климат, температура воздуха, влажность, количество осадков, тип почвы и ее мощность, структура, каменистость, плодородие.

В статье Mauro Masiero and etc. [2] обобщены результаты глобальных исследований по проблеме стандартов и руководящих принципов управления лесными насаждениями в качестве

инструментов политики, основанных на добровольности, для обеспечения устойчивого лесопользования. В работе дана оценка плантаций с позиции производства древесины, снижения техногенной нагрузки на природные системы, поддержания экосистемных услуг, предоставления широкого спектра других социальных, экономических и экологических выгод.

Исследователями Nguyen Dang Cuong and etc. [3] представлены результаты изучения проблемы содействия объективным решениям по использованию лесных угодий путем классификации участков и моделирования роста деревьев на примере Вьетнама. Общей целью изучения проблемы является обеспечение устойчивого лесопользования, связанного с оценкой пригодности участка и определением специфического для участка роста древесины в качестве параметров в целях выбора участков для создания лесных насаждений. В статье рассмотрена оперативная, объективная и простая методология определения и пригодности участков для лесных плантаций, оценка которых основана на методологической базе, представленной Продовольственной и сельскохозяйственной организацией (ФАО).

Классификация пригодности земель служит для оценки роста древесины. Рост древесины зависит от условий на участке, и наоборот, прирост произведенной древесины отражает продуктивность участка. Прирост объема древесины зависит от природных факторов – таких, как свойства почвы, климат и топография, и может рассматриваться как показатель, напрямую связанный с продуктивностью участка. Кроме того, рост объема древесины также считается показателем устойчивости.

Nguyen Dang Cuong and etc. [4] изложена процедура оценки пригодности земель, включающая в себя внедрение ее классификации на основе рамочной программы ФАО. Оценка пригодности земель выполняется в три этапа. Исследователями предложен подход, выявляющий экономически неподходящие участки. Оценка класса пригодности земель и прогнозирование роста древостоев, как показано в исследовании, предлагают простой и оперативный инструмент для принятия решений.

В статье James R. McKenna and etc. [4] обобщены новые инструменты для оценки пригодности почв с целью выращивания на создаваемых плантациях грецкого ореха и представлена стратегия проектирования плантаций для повышения его в смеси с другими листовыми породами, чтобы свести к минимуму риск, если грецкий орех плохо растет. Включены детали дизайна, которые могут улучшить эстетическое качество участка и расширить среду обитания диких животных.

Исследования И.А. Марковой [5] свидетельствуют о том, что наиболее важными из факторов, обеспечивающих наиболее успешный рост лесных культур, являются хорошие почвенно-экологические и климатические условия, применение современных технологий обработки почв, использование оптимального посадочного материала (укорененных черенковых саженцев).

В исследованиях Л.И. Загидулиной [6] представлены результаты педо- и агроклиматической характеристики лесных участков для создания лесных плантаций. Л.И. Загидулина считает, что для их развития необходим подбор перспективных лесных культур, обеспечивающий повышение эффективности использования земель и процесса принятия решений по управлению лесами.

В работе Ю.П. Демакова и др. [7] представлены основы методологической концепции и экономики создания лесных плантаций; установлены зависимости продуктивности древостоев от лесорастительных условий; разработан алгоритм создания и развития плантаций леса. С помощью технологии клонального микроразмножения получен высококачественный посадочный материал осины. Исследования Е.С. Багаева и др. [8] подтверждает важность использования высококачественного посадочного материала на основе применения клонального микроразмножения триплоидной осины.

Таким образом, предварительный краткий анализ источников литературы,

нормативно-правовой документации, а также патентный поиск свидетельствуют о том, что в Дальневосточном федеральном округе России решение названной проблемы осуществляется не в полной мере и имеется лишь некоторый опыт.

Цель исследований: разработка критериев оценки пригодности лесных участков для создания лесных плантаций в Дальневосточном федеральном округе.

Научная значимость вопроса заключается в разработке новых природоподобных технологий, способов, методов для обеспечения устойчивого развития Дальневосточного региона, позволяющих не только снизить техногенную нагрузку на естественные леса, увеличить площади арендованных лесных участков и доходы от использования лесов, но и создать путем плантационного лесовыращивания благоприятную среду для жизни и отдыха населения. Практическая значимость является здесь очевидной.

Материалы и методы исследований.

Объектом исследований стали лесные участки для создания лесных плантаций, расположенные в лесных районах Дальневосточного федерального округа (ДФО). Теоретической основой исследований явились научные труды в областях: лесоведения и лесоводства И.С. Мелехова; лесной типологии, дендрологии и геоботаники В.Н. Сукачева; лесной генетики и селекции А.В. Альбенского, А.С. Яблокова, А.Я. Любавской, Ю.П. Ефимова; лесовыращивания и лесоразведения А.Р. Родина, С.А. Родина, Е.М. Романова, И.И. Дроздова; систематики и биологии лесных древесных пород С.З. Курдиани; экологии растений и геоботаники П.Л. Горчаковского; лесной таксации и лесоустройства Н.П. Анучина.

Для изучения влияющих на состояние лесных фитоценозов и почвообразование факторов были заложены три постоянные пробные площади. Исследования проведены в Хабаровском крае на территории лесного питомника «Хабспецхоз» (Краевое государственное специализированное автономное учреждение «Хабаровское специализированное лесное хозяйство») и лесного питомника ООО «Растим лес», а также в Приморском крае на рекультивированной площади поверхности хвостохранилища «Высокогорское» ликвидированного горного предприятия «Хрустальненский ГОК».

В процессе реализации программы использованы маршрутно-рекогносцировочные [9], геоботанические, лесоводственно-таксационные, геоморфологические методы и комплексный ландшафтно-экологический подход, а также карты

растительности и дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) [10], ГИС-технологии. В течение 2023 г. в соответствии с программой исследований поставлены эксперименты в оранжерее и производственных условиях с использованием различных биоактиваторов (ускорителей роста), направленные на разработку технологии создания лесных плантаций и обоснование для этой цели критериев оценки пригодности лесных участков.

Результаты и их обсуждение. Известно, что в мировой практике достоинства и несостоятельность технологических предложений или методов оцениваются с различных точек зрения. Для Дальневосточного федерального округа актуальными являются экологические, экономические и социальные подходы анализа результатов создания лесных плантаций. Наиболее значимым критерием выбора лесного участка является оценка его воздействия на среду обитания. К числу важных критериев относится необходимость сохранения и поддержания биологического разнообразия в соответствии с биоклиматическими условиями региона и с учетом вклада в глобальный углеродный цикл. Значимым критерием является доступность лесного участка плантационного лесовыращивания для лесохозяйственных мероприятий, в том числе актуальных для условий Дальневосточного федерального округа противопожарных и лесопатологических мероприятий.

Наиболее важными из критериев являются: контурность (размеры участка могут быть крупноконтурными, оптимально-контурными, средне- и мелкоконтурными, или микроконтурными); рельеф; каменистость почвы, ее механический состав и влажностный режим; наличие пней, а также живых и сухостойных деревьев; крутизна местоположения. В связи с этим возникает необходимость разработки классификации местообитаний по лесопригодности и увлажненности, тем более А.Ю. Алексеенко и Е.А. Никитенко считают [11], что для создания плантаций в условиях юга Дальнего Востока не рекомендуются ни горные склоны крутизной более 10°, ни заболоченные земли. Выявлено, что большая роль принадлежит таким критериям, как подготовка площади и обработка почв, дифференцированный подход к выбору технических средств и противоэрозионная защита почвенного покрова, а также воспроизводство плодородия почв для их продуктивной эксплуатации за счет мероприятий по сохранению биоразнообразия.

Результаты обследования лесных участков, предполагаемых для создания лесных

плантаций, позволили выявить низкую величину NDVI на исследуемой территории (от 0,034 до 0,068), что свидетельствует о слабой степени восстановления здесь лесной растительности. Большое значение имеют экологические показатели, в том числе предотвращение негативного влияния техногенного загрязнения на окружающую среду и др. Первостепенное значение, помимо этого, имеют интенсивный режим выращивания высококачественного материала для посадки, проведение современных лесохозяйственных мероприятий, обеспечение оптимального размещения на создаваемых плантациях быстрорастущих пород, применение биологически активных веществ для ухода за насаждениями и ускорения их роста и др.

В процессе подбора и обследования лесных участков для плантационного лесовыращивания необходимо наиболее полное выявление всех факторов, которые могут ограничивать выполнение этого вида деятельности. По нашему мнению, разработанный сотрудниками «ДальНИИЛХ» в 1986 г. А.П. Сапожниковым, Л.П. Гуль и Г.А. Киселевой перечень конкретизированных лимитирующих факторов (табл. 1) и другие нормативные документы [12, 13] для обследования и проведения лесокультурных работ могут быть использованы при подборе лесных участков для создания лесных плантаций.

В качестве основы данных факторов (табл. 1), с учетом региональных природно-климатических особенностей Дальневосточного федерального округа (ДФО), предложена детализированная дифференциация критериев оценки пригодности лесных участков от минимального (1) до максимального (5) значений путем суммирования их оценочного показателя (табл. 2).

В соответствии с таблицей балльной оценки лимитирующих факторов, в которой использовано 12 характеристик, каждый конкретный участок может быть оценен суммой баллов по 12 позициям. Очевидно, чем выше оценка, тем более перспективен участок для создания лесных плантаций. Минимальная оценка составляет 10 баллов, максимальная – 44 балла (табл. 2). Из оценочной шкалы следует, что при суммарной оценке в 10-19 баллов исключается возможность использования лесного участка, а при 40-44 баллах лесная площадь будет использована максимально эффективно.

На базе этих оценок составлена классификация лесных участков по возможности их применения для плантационного выращивания (табл. 3).

Таблица 1. Перечень лимитирующих факторов
Table 1. List of limiting factors

Фактор / Factor	Что лимитирует / What limits
Рельеф <i>Relief</i>	Возможность применения и производительность механизмов; технологию подготовки почвы <i>The possibility of using and the performance of mechanisms; soil preparation technology</i>
Каменность почвы и поверхности участка <i>Stoniness of soil and surface of the site</i>	Возможность применения и производительность и поверхности участка механизмов, их износ, технологию работ <i>The possibility of using and the performance of the surface of the mechanism section, their wear, work technology</i>
Корненасыщенность <i>Root saturation</i>	Условия подготовки почвы, работу посадочных машин, качество посадки и т.д. <i>Soil preparation conditions, planting machine operation, planting quality, etc.</i>
Механический состав почвы <i>Mechanical composition of the soil</i>	Производительность механизмов, скорость износа их рабочих органов и агротехнику лесных культур <i>Productivity of mechanisms, the rate of wear of their working bodies and agricultural technology of forest crops</i>
Влажностный режим участка <i>Humidity regime of the plot</i>	Технологию и агротехнику лесовосстановления <i>Technology and agricultural techniques of reforestation</i>
Захламленность <i>Litter</i>	Возможности комплексной механизации, усиливает пожарную опасность создаваемых культур, усложняет технологию <i>The possibilities of complex mechanization, increases the fire hazard of the created crops, complicates the technology</i>
Наличие пней / Presence of stumps	То же / Same
Наличие живых и сухостойных деревьев <i>Presence of living and dead trees</i>	Безопасность работ, технологию и агротехнику <i>Safety of operation, technology and agricultural technics</i>
Размер участка (крупноконтурность) <i>Size of the plot (large contour)</i>	Производительность механизмов и величину затрат <i>Machinery performance and costs</i>

Таблица 2. Балльная оценка пригодности лесных участков ДФО для создания лесных плантаций

Table 2. Point assessment of the suitability of forest plots in the Far Eastern Federal District for the creation of forest plantations

Лимитирующий фактор <i>Limiting factor</i>	Показатели / Indicators		Баллы <i>Points</i>
	Качественные / Qualitative	Количественные / Quantitative	
1	2	3	4
Рельеф: - горный - крутизна <i>Relief</i> - mountain - steepness	Пологий склон	До 10°	3
	Крутой	11-20°	2
	Очень крутой	Свыше 20°	1
	<i>Flat slope</i>	<i>Up to 10°</i>	3
Равнинный <i>Plain</i>	Микрорельеф не выявлен	Возможно покрытие кочками до 10%	3
	<i>Micro relief is not revealed</i>	<i>Possible hummocks coverage up to 10% possible</i>	
	Слабо кочковатый	Покрытие кочками до 30%	2
<i>Weakly hummocky</i>	<i>Hummocks coverage up to 30%</i>		
Сильно кочковатый (бугристый)	Покрытие кочками более 30%	1	
<i>Strongly hummocky (tuberous)</i>	<i>Hummocks coverage over 30%</i>		
Эрозия <i>Erosion</i>	Отсутствует / Not available	0	3
	Средняя / Average	До 10% / Up to 10%	2
	Сильная / Strong	Свыше 10% / Over 10%	1

1	2	3	4
Покрытие камнями почвы и поверхности <i>Coating of soil and surface with stones</i>	Камни не ограничивают работу механизмов <i>Stones do not limit the operation of mechanisms</i>	Некаменистая <i>Non-stony</i>	5
	Наличие камней способствует ограничению мощности обрабатываемого слоя почвы <i>The presence of stones contributes to the limitation of the capacity of the cultivated soil layer</i>	Слабокаменистая <i>Slightly stony</i>	4
	Нормируется мощность обрабатываемого слоя, что приводит к некоторому снижению эффективности работ <i>The capacity of the processed layer is normalized, which leads to a certain decrease in the efficiency of work</i>	Среднекаменистая <i>Medium stony</i>	3
	Значительно снижается эффективность работ, что приводит к износу машин <i>The efficiency of work is significantly reduced, which leads to wear and tear of machines</i>	Каменистая <i>Stony</i>	2
	Почва мало пригодна, но будет доступной при условии предварительной уборки камней с поверхности <i>The soil is not suitable, but it will be accessible if the stones are removed from the surface beforehand</i>	Сильнокаменистая <i>Strongly stony</i>	1
	Почва для возделывания непригодна <i>The soil is unsuitable for cultivation</i>	Очень сильнокаменистая <i>Very strongly stony</i>	0
Корненаасыщенность <i>Root saturation</i>	Корни не препятствуют использованию механизмов <i>Roots do not prevent from using mechanisms</i>	Слабая <i>Weak</i>	3
	Уменьшается эффективность работы машин <i>The efficiency of the operation of machines decreases</i>	Средняя <i>Average</i>	2
	Значительно влияет на технологию и агротехнику культур <i>Significantly influences the technology and agricultural technics of crops</i>	Высокая <i>High</i>	1
Механический состав почв <i>Mechanical composition of soils</i>	Пески и супеси / <i>Sands and sandy loam</i>	Облегченный / <i>Lightweight</i>	4
	Легкие суглинки I / <i>Light loams</i>	Легкий / <i>Light</i>	3
	Средние суглинки / <i>Average loams</i>	Средний / <i>Average</i>	2
	Тяжелые суглинки и глины <i>Teavy loams and clays</i>	Тяжелый <i>Heavy</i>	1
Агрохимический состав <i>Agrochemical composition</i>	Пригодный / <i>Suitable</i>	pH, P ₂ O ₅ , K ₂ O, общий азот – не превышают фоновые значения <i>pH, P₂O₅, K₂O, total nitrogen – do not exceed background values</i>	2
	Непригодный / <i>Unsuitable</i>	pH, P ₂ O ₅ , K ₂ O, общий азот – превышают фоновые значения <i>pH, P₂O₅, K₂O, total nitrogen – exceed background values</i>	1
Влажностный режим <i>Humidity regime</i>	Очень сухой сильно проточный <i>Very dry, highly flowing</i>	Определяется визуально <i>Is visually determined</i>	4
	Сухой сильно проточный периодически поверхностно <i>Dry strongly flowing periodically surface</i>	То же <i>Same</i>	5
	Свежий проточный периодически влажный <i>Fresh flowing periodically wet</i>	То же <i>Same</i>	5
	Свежий проточный периодически влажный <i>Fresh flowing periodically moist</i>	То же <i>Same</i>	3

1	2	3	4
	Сырой слабопроточный периодически мокрый <i>Damp weakly lowing periodically wet</i>	То же <i>Same</i>	2
	Мокрый слабопроточный периодически сырой или влажный <i>Wet, low-flowing, periodically damp or wet</i>	То же <i>Same</i>	1
	Мокрый непроточный / Wet non-flowing	то же / Same	0
Захламленность <i>Litter</i>	Отсутствует или низкая / No or little	менее 20 м³/га / Less than 20 m³ / ha	3
	Средняя / Average	20-70 м³/га / 20-70 m³ / ha	2
	Высокая / High	более 70 м³/га <i>More than 70 m³ / ha</i>	1
Наличие пней <i>Presence of stumps</i>	Отсутствуют / No	Единично / Single	5
	Пней мало / Little	Менее 200 шт./га <i>Less than 200 pieces / ha</i>	4
	Среднее количество / Average quantity	до 600 шт./га / Up to 600 pcs / ha	3
	Много / Many	600-800 шт./га / 600-800 pcs / ha	2
	Очень много / A lot	более 800 шт./га <i>More than 800 pcs / ha</i>	1
Наличие живых и сухостойных деревьев <i>Presence of living and dead trees</i>	Единично / Single	менее 10 шт./га <i>Less than 10 pieces / ha</i>	3
	Среднее количество / Average quantity	10-40 шт./га / 10-40 pieces / ha	2
	Много / Many	более 40 шт./га <i>More than 40 pieces / ha</i>	1
Крупноконтурность (размеры участков) <i>Large contour (sizes of plots)</i>	Крупноконтурный / Large-contour	более 40 га / More than 40 ha	5
	Оптимально-контурный <i>Optimally contoured</i>	21-40 га / 21-40 ha	4
	Среднеконтурный / Mid-contour	11-20 га / 11-20 ha	3
	Мелкоконтурный / Fine-contour	3-10 га / 3-10 ha	2
	Микроконтурный / Microcontour	менее 3 га / Less than 3 hectares	1

Таблица 3. Классификация лесных участков

Table 3. Classification of forest plots

Возможность использования, тип <i>Usability, type</i>	Характеристика <i>Characteristic</i>	Количественная оценка, баллы <i>Quantification, points</i>
Пригодный лесной участок <i>Suitable plot</i>	Использование лесного участка практически ничем не лимитируется <i>Usage of the forest plot is not practically limited</i>	35-44
Малопригодный лесной участок <i>A forest plot of little use</i>	При проведении дополнительных мероприятий возможно использование лесного участка <i>When carrying out additional measures, it is possible to use a forest plot</i>	20-34
Непригодный лесной участок <i>Unsuitable forest plot</i>	Использование участка невозможно <i>Usage of the plot is impossible</i>	10-19

Оценка лесного участка произведена в процессе обследования площадей при их подборе для реализации проекта плантационного лесовыращивания, а также при лесоустроительном проектировании на перспективу. Осуществлена оценка пригодности лесного участка Хехцирского лесничества на примере квартала 44: площадь – 0,4 га, категория лесных земель – редина (табл. 4).

На основании оценки пригодности исследованного лесного участка сделан вывод о возможности его использования для плантационного лесовыращивания с учетом каменистости почвы и ее механического состава, а также отрицательного влияния травостоя.

Таблица 4. Оценка пригодности лесного участка Хехцирского лесничества Хабаровского края для плантационного лесовыращивания

Table 4. Assessment of the suitability of the forest plot of the Khekhtsirsky forestry of the Khabarovsk Territory for plantation afforestation

Основные критерии <i>Main criteria</i>	Характеристика <i>Characteristic</i>	Баллы <i>Points</i>
1. Положение в рельефе: / Location in the relief		
1.1. Горное - крутизна склона / Mountain – steepness of the slope	-	-
1.2. Равнинное / Plain	Микрорельеф не выражен <i>Microrelief is not pronounced</i>	3
2. Каменистость / Stones	10%	3
3. Корненасыщенность / Root saturati	Слабая / Weak	3
4. Механический состав почвы <i>Mechanical composition of the soil</i>	Среднесуглинистая <i>Medium loamy</i>	2
5. Влажностной режим / Humidity regime	Свежая, проточная / Fresh, flowing	5
6. Захламленность / Litter	Нет / No	3
7. Наличие пней / Presence of stumps	50 шт./га / 50 pcs / ha	5
8. Сухостойные и живые деревья, подлежащие уборке <i>Dead and living trees to be harvested</i>	Нет <i>No</i>	3
9. Оценка крупноконтурности <i>Assessment of large contour</i>	Среднеконтурный <i>Mid-contour</i>	3
10. Эрозия / Erosion	Отсутствует / No	3
11. Агрохимический состав / Agro chemical composition	Пригодный / Suitable	2
Суммарная оценка участка / Summarized assessment of the plot		35

Примечание: Дополнительные сведения: Почва – бурая лесная оподзоленная, задернованная, мощность профиля – 70 см, мощность аккумулятивного слоя – 10 см.

Note: Additional information: The soil is brown forest podzolized, sodded, the capacity of the profile is 70 cm, the capacity of the accumulative layer is 10 cm.

Выводы

В статье представлены материалы по выявлению критериев оценки пригодности лесных участков для создания лесных плантаций. Использование перечня лимитирующих факторов для обследования и проведения лесокультурных работ позволило с учетом региональных природно-климатических особенностей Дальневосточного федерального округа (ДФО) предложить детализированную дифференциацию критериев оценки пригодности лесных участков: от минимального балла (1) до максимального (5) значения – путем суммирования их оценочного показателя. На базе этих оценок предложена

классификация лесных участков по возможности их применения для выбора в процессе создания лесных плантаций. Так, согласно классификации пригодными являются лесные участки, оцениваемые от 35 до 44 баллов, малоприспособленными – участки с оценками от 20 до 34 баллов, непригодными – участки, получившие оценку от 10 до 19 баллов. На примере квартала 44 площадью 0,4 га (категория лесных земель – редина) выполнена оценка пригодности лесного участка Хехцирского лесничества, которая составила 35 баллов. Сделан вывод о возможности использования этого лесного участка для плантационного выращивания.

Список использованных источников

1. Aminuddin Mane Kandari, Safril Kasim, Muh Aswar Limi Jufri Karim. Land Suitability Evaluation for Plantation Forest Development Based on Multi-Criteria Approach // Prime Archives in Agricultural Research. 2020. 25 p.
2. Mauro Masiero, Laura Secco, Davide Pettenella, Lucio Brotto. Standards and guidelines for forest plantation management: A global comparative study // Forest Policy and Economics. 2015. № 53. Pp. 29-44.
3. Nguyen Dang Cuong, Mues Volker, Michael Köhl. Facilitating objective forest land use decisions by site classification and tree growth modeling: a case study from Vietnam // iForest. Biogeosciences and Forestry. 2019. Vol. 12. Pp. 542-550. DOI: 10.3832/ifer2945-012.
4. James R. McKenna, Lenny D. Farlee. Designing and establishing a fine hardwood timber plantation

References

1. Aminuddin Mane Kandari, Safril Kasim, Muh. Aswar Limi3 Jufri Karim. Land Suitability Evaluation for Plantation Forest Development Based on Multi-Criteria Approach // Prime Archives in Agricultural Research. 2020. 25 p.
2. Mauro Masiero, Laura Secco, Davide Pettenella, Lucio Brotto. Standards and guidelines for forest plantation management: A global comparative study // Forest Policy and Economics. 2015. № 53. Pp. 29-44.
3. Nguyen Dang Cuong, Mues Volker, Michael Köhl. Facilitating objective forest land use decisions by site classification and tree growth modeling: a case study from Vietnam // iForest. Biogeosciences and Forestry. 2019. vol. 12. pp. 542-550. doi: 10.3832/ifer2945-012.
4. James R. McKenna, Lenny D. Farlee. Designing and establishing a fine hardwood timber plantation

// Proceedings of the Seventh Walnut Council Research Symposium. 2017. Pp. 47-68.

5. **Маркова И.А.** Современные проблемы лесовыращивания. Лесокультурное производство): учебное пособие. СПб: СПбГУТ, 2008. 156 с.

6. **Загидуллина Л.И.** Лесные плантации. Основы создания, выращивания и использования: учебное пособие. Ульяновск: УлГУ, 2018. 185 с.

7. **Демаков Ю.П.** Экономические основы и опыт плантационного лесовыращивания в Среднем Поволжье / Нуре́ев Т.В., Пуры́ев А.С., Красно́в В.Г. // Сибирский лесной журнал. 2018. № 2. С. 3-14. DOI: 10.15372/SJFS20180201.

8. **Багаев Е.С.** Перспективы плантационного выращивания быстрорастущих триплоидных клонов осины в Южно-таежном лесном районе Европейской части России / Багаев С.С., Макаров С.С., Чудецкий А.И. // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2018. Т. 4, № 3. С. 81-93. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-3-81-93.

9. **Крупская Л.Т.** Охрана и рациональное использование земель на горных предприятиях Приамурья и Приморья: Монография. Хабаровск: Приамурское географическое общество, 1992. 175 с.

10. **Леванков А.Н., Дудкин А.А.** Нейросетевая идентификация неиспользуемых сельскохозяйственных земель на снимках дистанционного зондирования земли в системе QGIS // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции, г. Минск, 19-20 мая 2021 г. Минск: Бестпринт, 2021. С. 102-109.

11. **Алексеев А.Ю., Никитенко Е.А.** Перспективы создания лесных плантаций на Дальнем Востоке России // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, № 4 С. 15-18.

12. Методика технологической оценки лесокультурных площадей / Сост. А.П. Сапожников, Л.П. Гуль, Г.А. Киселева. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1986. 16 с.

13. Классификация и оценка земель гослесфонда для целей лесовыращивания / Сост. А.П. Сапожников, Д.Ф. Ефремов. Хабаровск: ТОО «ТАКТ Со. Ltd», 1995. 20 с.

Об авторах

Людмила Тимофеевна Крупская, д-р биол. наук, профессор, главный научный сотрудник, заслуженный эколог; ORCID0000-0002-4479-4047; Scopus: 48761528600; РИНЦ ID: 67109; WOS Research ID: E-8087-2014; ecologiya2010@yandex.ru

Мария Юрьевна Филатова, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; ORCID0000-0002-2212-9783; Scopus: 56490371700; РИНЦ ID: 1060948; WOS Research ID: filatovamariya@mail.ru

Лариса Павловна Гуль, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник

Анна Валерьевна Леоненко, младший научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-0499-7675; Scopus: 55683328800; РИНЦ ID: 177237; WOS Research ID: ABH-2309-2021; 334212@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Крупская Л.Т., Филатова М.Ю., Гуль Л.П., Леоненко А.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of 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 at the editorial office 17.02.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 28.05.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 28.05.2024

// Proceedings of the Seventh Walnut Council Research Symposium. St. Petersburg: SPbGLTA, 2017. C. 47-68.

5. **Markova I.A.** Modern problems of forest growing. Forest cultural production.: teaching manual, 2008.156p.

6. **Zagidullina L.I.** Forest plantations. Fundamentals of creation, cultivation and use [Electronic resource]: teaching manual. Ulyanovsk: Ulyanovsk State University, 2018. 185 p.

7. **Demakov Yu.P.** Economic foundations and experience of plantation forest cultivation in the middle Volga Region / Nureyev T.V., Puryaev A.S., Krasnov V.G. // Siberian forest journal. 2018. No 2. P. 3-14. DOI: 10.15372/SJFS20180201

8. **Bagaev E.S.**, Prospects for plantation cultivation of fast-growing triploid aspen clones in the southern taiga forest region of the European part of Russia / E.S. Bagaev, S.S. Bagaev, S.S. Makarov, A.I. Chudetsky // Ecology and nature management. 2018. Volume 4. No 3. P. 81-93. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-3-81-93.

9. **Krupskaya L.T.** Protection and rational use of lands at mining enterprises of the Amur region and Primorye. Mornography. Khabarovsk: Priamursk geographical society, 1992. 175p.

10. **Levankov A.N., Dudkin A.A.** Neural network identification of unused agricultural lands on remote sensing images in the QGIS system / A.N. Levankov, A.A. Dudkin // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA and high-level analysis: collection of scientific articles of the VII International scientific and practical conference, Minsk, May 19-20, 2021. Minsk: Bestprint, 2021. P. 102-109.

11. **Alekseenko A.Yu.** Prospects for the creation of forest plantations in the Far East of Russia / A.Yu. Alekseenko, Nikitenko E.A. // Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin. 2017. V. 21. No 4, P. 15-18.

12. **Sapozhnikov A.P.** Methods of technological assessment of forest cultivation areas / A.P. Sapozhnikov, L.P. Gul, G.A. Kiseleva. Khabarovsk, DalNIIHL Publ., 1986.16 p.

13. Classification and evaluation of lands of the state forest fund for the purposes of forest cultivation / A.P. Sapozhnikov, D.F. Efremov. Khabarovsk: TAKT Co. Ltd LLP, 1995. 20 p.

About the authors

Lyudmila T. Krupskaya, DBSc (Biol), DMSc (Med), professor, chief researcher, "Honored Ecologist". ORCID0000-0002-4479-4047; Scopus: 48761528600; RSCI ID: 67109; WOS Research ID: E-8087-2014; ecologiya2010@yandex.ru

Mariya Yu. Filatova, CSc (Tech), senior researcher; ORCID0000-0002-2212-9783; Scopus: 56490371700; RSCI ID: 1060948; WOS Research ID: filatovamariya@mail.ru

Larisa P. Gul, CSc (Agro), leading researcher

Anna V. Leonenko, junior researcher; ORCID: 0000-0002-0499-7675; Scopus: 55683328800; RSCI ID: 177237; WOS Research ID: ABH-2309-2021; 334212@mail.ru

L.T. Krupskaya, M.Yu. Filatova, L.P. Gul, A.V. Leonenko performed theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-124-132>

УДК 630*5:004.94:528



ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСА

С.В. Шайтура¹, Н.С. Шайтура², Е.М. Митрофанов³, А.С. Мухин³, С.М. Устинов⁴

¹ Российский университет транспорта; 127055, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. Россия

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127422, Москва, Тимирязевская ул. д. 49, Россия

³ Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана; 141005, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, Россия

⁴ ООО «НПЦ «БизнесАвтоматика»; 119619, город Москва, ул. Авиаторов, д. 9 к.2. Россия

Аннотация. Лес является важной средой человеческого обитания. Для поддержания жизни на Земле очень важно осуществлять мониторинг лесного хозяйства. Мониторинг может осуществляться как методами дистанционного зондирования Земли, так и методами наземной съёмки. Цель исследований – изучение возможности получения таксационных параметров древостоя автоматизированными методами по трёхмерным измерительным сценам, построенным с использованием мобильных лазерных сканеров с достаточной точностью. Измерительная сцена содержит в себе цифровые модели местности в пределах её границы. Трёхмерная измерительная сцена является оптимальной основой для построения цифрового двойника лесной экосистемы. Лазерные сканеры позволяют не только повысить точность определения таксационных характеристик, но и сформировать картографические материалы, таких как подеревный план. В качестве исследуемой территории была выбрана одна из пробных площадей с чистым сосновым насаждением в Брянской области. Для повышения точности съёмка производилась три раза. Затем выполнялось распознавание и каталогизация деревьев. Результаты измерений импортировались геоинформационную систему, которая позволяла производить подеревный план в использовании стандартных инструментов геоинформационного моделирования. В результате исследования была разработана методика формирования трёхмерной измерительной сцены круговых пробных площадей постоянного радиуса для решения задач лесного сектора с использованием мобильного лазерного сканера.

Ключевые слова: лесное хозяйство, мониторинг, наземная лазерная съёмка, цифровое моделирование, геоинформационные системы, подеревный план

Формат цитирования: Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Митрофанов Е.М., Мухин А.С., Устинов С.М. Применение наземных лазерных сканеров для мониторинга леса // Природообустройство. 2024. № 3. С. 124-132. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-124-132>

Original article

APPLICATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNERS FOR FOREST MONITORING

S.V. Shaitura¹, N.S. Shaitura², E.M. Mitrofanov³, A.S. Mukhin³, S.M. Ustinov⁴

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127422, Moscow, Timiryazevskaya street, 49

³ Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman; 141005, Mytishchi, st. 1st Institutskaya, 1.

⁴ LLC “NPC “Business Automatika”; 119619, Moscow, st. Aviatorov, 9/2

Abstract. The forest is an important human habitat. Monitoring forestry is essential to sustain life on Earth. Monitoring can be carried out using both Earth remote sensing methods and ground-based survey methods. The purpose of this article is to describe a methodology for studying the possibility of using mobile laser scanners to form a three-dimensional measurement scene on a circular test area of constant radius. The latter contains digital models of the terrain within its borders. A three-dimensional measurement scene is the optimal basis for constructing a digital twin of a forest ecosystem. Specialists are usually forced to count trees manually. Laser scanners allow not only to increase the accuracy of determining taxation characteristics, but also to generate cartographic materials, such as a tree plan. One of the trial areas with a pure pine plantation in the Bryansk region was chosen as the study area. To improve accuracy, the survey was carried out three times. Tree recognition and cataloging was then

carried out. The measurement results were imported into a geographic information system, which made it possible to produce a tree-by-tree plan using standard geographic information modeling tools. As a result of the study, a technique was developed for generating a three-dimensional measuring scene of circular test plots of constant radius to solve problems in the forestry sector using a mobile laser scanner.

Keywords: forestry, monitoring, terrestrial laser survey, digital modeling, geographic information systems, tree plan

Format of citation: Shaitura S.V., Shaitura N.S., Mitrofanov E.M., Mukhin A.S., Ustinov S.M. Application of terrestrial laser scanners for forest monitoring // Prirodoobustrojstvo. 2024. No.3. P. 124-132. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-124-132>

Введение. Лес в жизни человечества является важной средой обитания [1]. Мониторинг состояния леса очень важно для поддержания жизни на Земле. Мониторинг леса является комплексной системой, которая включает в себя цифровую модель и методы дистанционного зондирования. Дистанционное зондирование осуществляется при помощи космических аппаратов, самолётов и беспилотных летательных аппаратов. Вопросами глобального пространственного позиционирования и дистанционного мониторинга занимались ряд известных авторов: Бондур В.Г., Левин Б.А, Розенберг И.Н., Савиных В.П. [2-4]. Научными коллективами, которыми руководили эти учёные были разработаны принципы и методы мониторинга за пространственными объектами при помощи космических методов.

Мониторинг лесных массивов может осуществляться и наземным способом [5-9].

Цель исследований. Цель исследования – оценить возможность использования трёхмерных измерительных сцен, сформированных с использованием мобильного лазерного сканера GeoSLAM для получения значимых параметров древостоя автоматизированными методами для радиальной пробной площади. В работе рассматриваются подходы по автоматизированному получению таких таксационных параметров, как высота и диаметр ствола на высоте 1,3м, а также построение подеревного плана для лесной радиальной пробной площади. Рассматривается верификация полученных таксационных характеристик по лазерному скану с использованием геодезического оборудования и типовых инструментов, применяемых в лесной отрасли [10].

Материалы и методы. Предлагаемое авторами статьи решение применять для разбиения радиальных тестовых площадей лазерное сканирование даёт ряд преимуществ перед стандартными методиками – трёхмерная видеосцена сформированная на этапе обработки съёмки позволяет зафиксировать состояние изучаемой площади на дату съёмки, процесс её обработки позволяет получить информацию о координатах, диаметре и высотах отдельных деревьев

в автоматизированном режиме и на выходе будет генерироваться подеревный план в виде векторного слоя в геоинформационных системах (ГИС), содержащий в себе атрибутивную информацию по каждому из объектов.

Традиционно лазерное сканирование принято разделять на авиационное (ВЛС) и наземное (НЛС) [11, 12]. Поскольку радиальная тестовая площадь представляет собой сравнительно малую ограниченную локацию, наземные подходы лазерного сканирования подходят для её съёмки наиболее оптимально. Проигрывая воздушному лазерному сканированию в продуктивности выполнения работ, наземное лазерное сканирование даёт значительно более точную информацию об образах отдельных деревьев вплоть до составления скелета дерева.

Однако следует отметить, что наземное лазерное сканирование в свою очередь подразделяется на стационарное и мобильное. Теоретически методы наземного лазерного сканирования можно эффективно использовать для съёмки ограниченных по площади лесных локаций, получая при этом более точную метрическую информацию и качественную текстуру. Однако на практике далеко не всегда удаётся успешно использовать стационарные лазерные сканеры бюджетных моделей (прим. Leica BLK360) при съёмке древостоя, так как в процессе работ могут возникать технические затруднения, не позволяющие надёжно соотнести две и более перерывающиеся точки сканирования. Мобильные лазерные сканеры лишены подобных проблем, а их сравнительные со стационарными лазерными сканерами схожей ценовой категории точностные характеристики также обеспечивают получение заданных таксационных параметров с требуемой точностью на подеревном уровне. В процессе эксперимента, выполнявшегося в рамках исследования, использовался мобильный лазерный сканер ZEB – Horizon, хорошо зарекомендовавший себя при съёмке типовых лесных насаждений средней полосы Российской Федерации.

В качестве исследуемой территории была выбрана радиальная пробная площадь

радиусом 12,6 метров с чистым насаждением сосны в Брянской области в Брянском Учебно – опытном лесхозе БГИТУ (рис. 1). Выбор данной территории был обоснован наличием двумя факторами – на пробную площадь имелся большой набор данных, включая аэрофотосъёмку с беспилотного воздушного судна и общая простота территории, позволяющая оценить потенциал разработанной методики в близких к оптимальным условиям.

Один цикл измерений радиальной площади с использованием сканера Zeb – Horizon занимал от 2 до 5 минут, в зависимости от выбранной маршрутной схемы, и на выходе каждого захода генерировалось плотное облако точек.

Процесс обработки сырых данных сканирования, полученных с использованием мобильного лазерного сканера Zeb – Horizon, выполняется в специальном проприетарном программном обеспечении GEOSLAMHUB, которое поставляется вместе с прибором, с настройками, рекомендованными производителем и эксплуатантами для лесных территорий. Поскольку снимаемая территория имеет ограниченный размер, то при наличии мобильного ПК с высокими вычислительными характеристиками можно подобрать настройки предварительной обработки таким образом, чтобы произвести обработку в полевых условиях, если это необходимо. После обработки плотное облако экспортируется в универсальных форматах «.las» и «.laz», которые читаются большинством пакетов, предназначенных для обработки данных лазерного сканирования (CloudCompare, 360 LIDAR и др.) и геоинформационных системах (ArcGIS, Q-GIS и проч.). После сокращения размерности массивов пространственных данных по радиусу (с некоторым запасом) изучаемой радиальной пробной площади были получены

пригодные для обработки облака точек, состоящие из 12-16 миллионов отдельных элементов. При работе плотного облака, предназначенного для классификации образов отдельных деревьев, не рекомендуется использовать стандартные инструменты фильтрации, такие как удаление статистических выбросов и фильтр шумов, потому что их применение может «срезать» верхушки крон, что скажется на итоговой оценке высоты деревьев. Предварительная обработка сцены при выполнении эксперимента осуществлялась в свободно распространяемом программном обеспечении CloudCompare.

Трёхмерная измерительная видео – сцена представляет собой трёхмерную цифровую электронную модель территории, которая содержит в своём массиве цифровую модель рельефа и модель всех прочих объектов, расположенных в границах зоны [13, 14]. Данная сцена предназначена для визуализации или выполнения расчётно – измерительных операций с использованием специального программного обеспечения. При решении задач, связанных с моделированием в лесной отрасли, трёхмерная измерительная сцена является оптимальной основой для построения цифрового двойника лесной экосистемы. Полученная модель позволяет, при помощи алгоритмов и приборной базы, зафиксировать параметры древостоя на подеревном уровне с требуемой точностью [15, 16].

Задача закладки пробных площадей является для лесного сектора типовой, однако традиционные методы ее решения не предполагают применения современных приборов, таких как лазерные сканеры и формирования картографических материалов, таких как подеревный план. Фактически специалисты выполняют пересчёт деревьев на площади в ручном режиме.

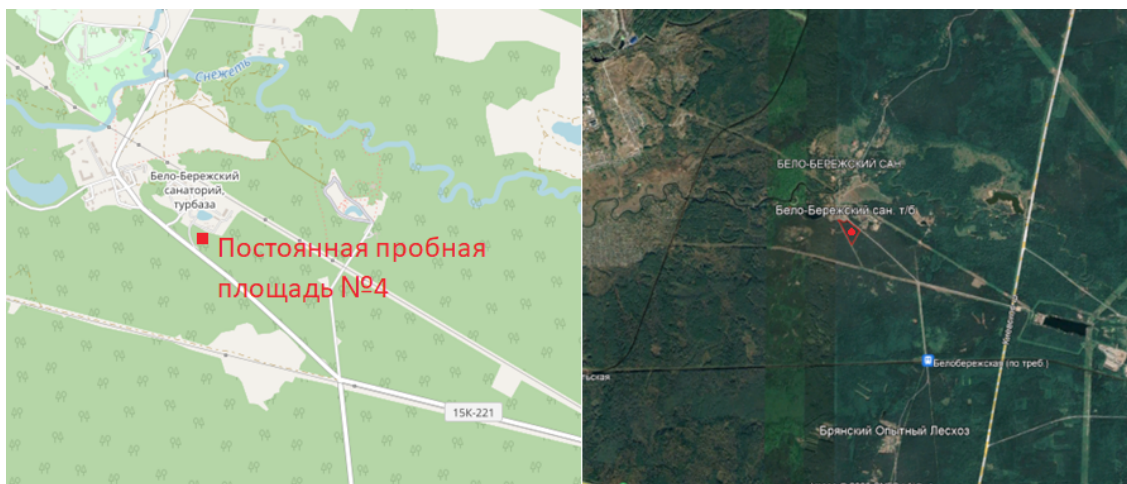


Рис. 1. Пространственное положение постоянной пробной площади на геопортале Google Earth

Fig. 1. Spatial position of the permanent trial plot on the geoportale GoogleEarth

В процессе эксперимента для верификации полученных данных выполнялись измерения диаметров на высоте груди стандартной мерной вилкой и высоты посредством стандартного высотомера SUUNTO PM-5, ультразвукового дальномера Vertex и электронного теодолита DT405L.

Результаты и обсуждение. Для оценки сходимости и воспроизводимости точности определения таксационных параметров по плотному облаку точек пробная площадь была отснята три раза с использованием различных маршрутных схем: съёмка по спирали, хождение по радиальным лучам, и маршрутные проходы с выдерживанием базиса, однако в данной статье не будут рассматриваться результаты их анализа. Всего один раунд измерений занимал 2-5 минут, в зависимости от выбранной маршрутной схемы, и на выходе каждого захода генерировалось плотное облако точек.

Процесс обработки сырых данных сканирования, полученных с использованием мобильного лазерного сканера ZEBHORIZON выполнялся в специальном программном обеспечении GEOSLAMHUB, которое поставляется вместе с прибором, с настройками рекомендованными производителем и эксплуатантами для лесных территорий. Поскольку снимаемая территория имеет ограниченный размер, то при наличии мобильного ПК с высокими вычислительными характеристиками можно подобрать настройки предварительной обработки таким образом, чтобы произвести обработку в полевых условиях, если это необходимо. После обработки плотное облако экспортируется в универсальных форматах .las и .laz, которые читаются большинством пакетов, предназначенных для обработки данных лазерного сканирования (CloudCompare, 360 LIDAR и др.) и в геоинформационных системах (ArcGIS, Q-GIS и проч.). После сокращения размерности массивов пространственных данных по радиусу (некоторым запасом) изучаемой радиальной пробной площади были получены пригодные для обработки облака точек, состоящие из 12-16 миллионов отдельных элементов. При обработке плотного облака, предназначенного для классификации образов отдельных деревьев, не рекомендуется использовать стандартные инструменты фильтрации, такие как удаление статистических выбросов и фильтр шумов, потому что их применение может «срезать» верхушки крон, что скажется на итоговой оценке высоты деревьев. Предварительная обработка сцены при выполнении эксперимента осуществлялась в свободно распространяемом программном обеспечении CloudCompare (рис. 2).

В процессе автоматизированной обработки плотного облака с целью получения информации о пространственном положении отдельных деревьев и их таксационных характеристиках применялся свободно распространяемый программный пакет 3D-Forest. Поэтому результаты обработки сканов радиальных пробных площадей в платных программных решениях, таких 360LIDAR, LeicaCyclone и их аналогах могут различаться.

На первом этапе обработки выполнялся переход от исходного облака точек к полноценной трёхмерной измерительной сцене, посредством классификации точек рельефа и выделения их из общего массива пространственных данных. В качестве алгоритма классификации использовался Octree (рис. 3).

На следующем этапе на основе точек, отнесённых к классу древесной растительности, выполнялось автоматизированное распознавание и каталогизация образов отдельных деревьев. Поскольку обрабатываемая сцена имеет сравнительно небольшую площадь, нет необходимости в процессе её обработки отрабатывать параметры дескриптора на обучающей выборке с последующим тиражированием результата. Настройки классификатора настраиваются сразу по всей радиальной площади (рис. 4).

После того, как результат классификации признан удовлетворительным, происходит ручная обработка получившихся образов с целью отбраковки кластеров, не относящихся к классу деревьев. Для оставшихся объектов

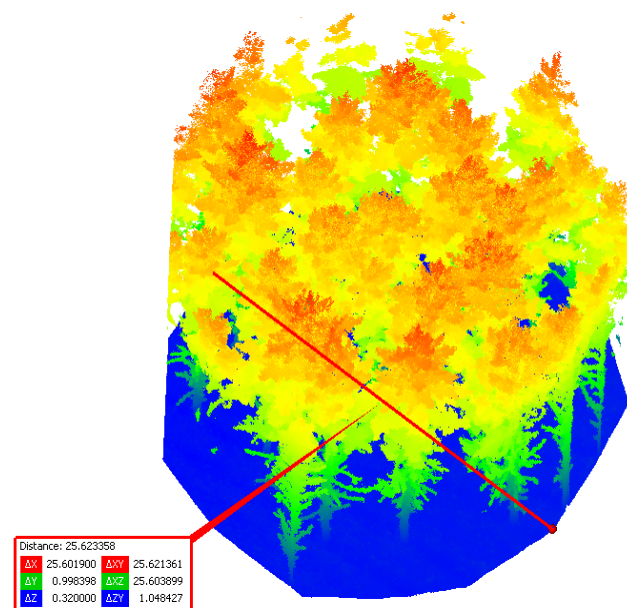


Рис. 2. Плотное облако точек, сформированное на тестовую радиальную площадь

Fig. 2. A dense point cloud formed on a test radial area

в автоматизированном режиме определяется положение точки роста, от которой в дальнейшем будет рассчитываться диаметр на высоте 1,3 м и высота дерева в автоматизированном режиме (рис. 5).

Результат анализа трёхмерной измерительной сцены экспортируется в табличном виде с целью последующего геокодирования в ГИС для автоматизированного построения поперечного плана с использованием стандартных инструментов геоинформационного моделирования (рис. 6).

В таблице 1 представлено сравнение диаметров, полученных по образам деревьев и измеренных в натуре традиционным методом

Анализируя представленную таблицу с данными о диаметрах, определённых традиционным способом и с использованием данных лазерного сканирования, можно сделать следующие выводы: в большинстве случаев диаметры, определённые с использованием данных лазерного сканирования, близки к значениям, полученным традиционным методом. Это свидетельствует о том, что лазерное сканирование может быть эффективным инструментом для измерения диаметров деревьев в лесных насаждениях.

Несмотря на некоторые различия, облако данных может быть полезным инструментом для измерения диаметров, но требует дополнительного внимания к точности и калибровке для каждого конкретного участка леса.

В таблице 2 представлено сравнение высот, полученных по образам деревьев и измеренных в натуре различными измерительными приборами.

В данной таблице представлены результаты измерения высоты деревьев с использованием трех различных методов: определение по образу, измерение с использованием прибора SUUNTO PM-5, и измерение с помощью электронного теодолита DT405L, а также прибора Vertex. Для каждого дерева указаны идентификатор образа и значения высоты, полученные каждым из методов измерения.

Анализ данных показывает, что значения высот деревьев, полученные различными методами, имеют небольшие различия.

Наибольшее отклонение высоты, определенной по образу, составило 0,74 метра от высоты, определенной высотомером SUUNTO PM-5, что составляет менее чем 4% относительного отклонения.

Наибольшая согласованность высот, определённых по наблюдениям с прибором Vertex. Относительные отклонения в этих случаях

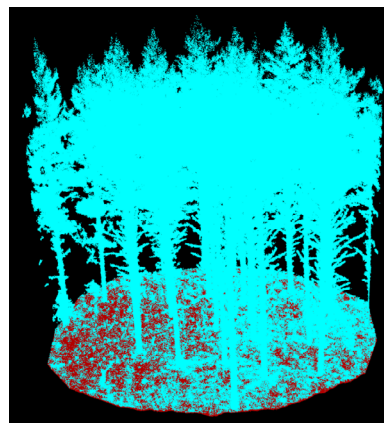


Рис. 3. Классификация точек рельефа и растительности с использованием алгоритма Octree

Fig. 3. Classification of relief points and vegetation using the Octree

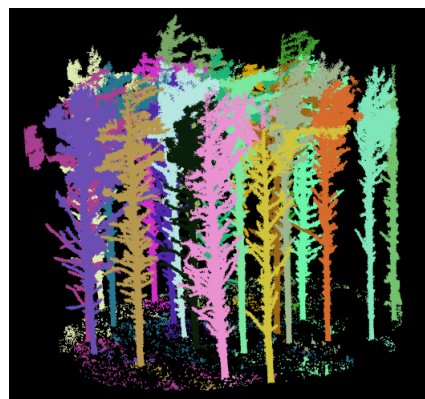


Рис. 4. Формирование индивидуальных измерительных трёхмерных образов для каждого дерева на радиальной площади

Fig. 4. Formation of individual measuring three-dimensional images for each tree on the radial area

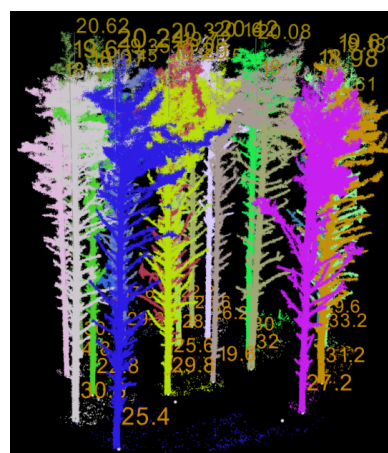


Рис. 5. Автоматизированный расчёт диаметров на высоте груди и высоты по образам отдельных деревьев

Fig. 5. Automated calculation of diameters at chest height and height from images of individual trees

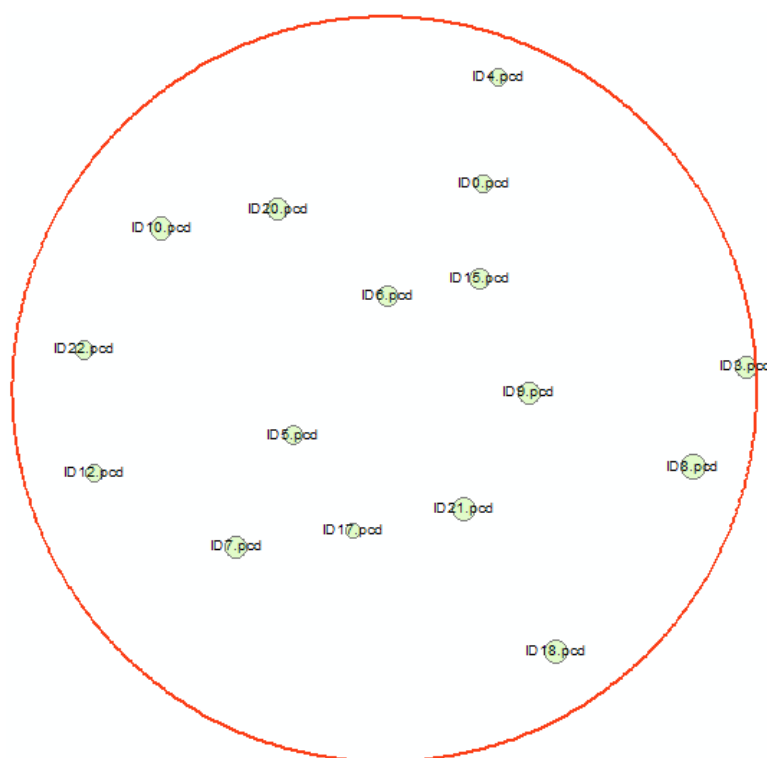


Рис. 6. Сформированный в ГИС подеревный план для радиальной пробной площади
Fig. 6. Tree plan for a radial trial plot generated in GIS

Таблица 1. Сравнение диаметров, полученных по образам деревьев
и измеренных в натуре мерной вилкой

Table 1. Comparison of diameters obtained from tree images
and measured in nature with a measuring fork

Идентификатор образа <i>Image ID</i>	Диаметр, определённый традиционным способом, см <i>Diameter, determined by a traditional way, cm</i>	Диаметр, определённый по облаку, см <i>Diameter determined by cloud, cm</i>	Абсолютное отклонение, см <i>Absolute deviation, cm</i>	Относительное отклонение, % <i>Relative deviation, cm</i>
<i>ID9.pcd</i>	30	29	-1,0	-3,33
<i>ID0.pcd</i>	26	24	-2,0	-7,69
<i>ID10.pcd</i>	30	30	0,0	0,00
<i>IdentifierID12.pcd</i>	23	24	1,0	4,35
<i>ID15.pcd</i>	26	25	-1,0	-3,85
<i>ID17.pcd</i>	20	20	0,0	0,00
<i>ID18.pcd</i>	31	29	-2,0	-6,45
<i>ID20.pcd</i>	29	28	-1,0	-3,45
<i>ID21.pcd</i>	32	33	1,0	3,13
<i>ID22.pcd</i>	25	23	-2,0	-8,00
<i>ID3.pcd</i>	30	29	-1,0	-3,33
<i>ID4.pcd</i>	22	24	2,0	9,09
<i>ID5.pcd</i>	26	26	0,0	0,00
<i>ID6.pcd</i>	28	27	-1,0	-3,57
<i>ID7.pcd</i>	30	30	0,0	0,00
<i>ID8.pcd</i>	33	31	-2,0	-6,06

Таблица 2. Сравнение диаметров, полученных по образам деревьев и измеренных в натуре мерной вилкой

Table 2. Comparison of diameters obtained from tree images and measured in nature with a measuring fork

Идентификатор образа Image ID	Высота дерева, определённая по образу, м Tree height determined by image, m	Высота дерева, измеренная SUUNTO PM-5, м Tree height measured SUUNTO PM-5, m	Абсолютное отклонение, м Absolute deviation, m	Относительное отклонение, % Relative deviation, %	Высота дерева, измеренная электронным теодолитом DT405L, м Tree height measured by electronic theodolite, DT405L, m	Абсолютное отклонение, м Absolute deviation, m	Относительное отклонение, % Relative deviation, %	Высота дерева, измеренная Vertex м Tree height measured by Vertex, m	Абсолютное отклонение, м Absolute deviation, m	Относительное отклонение, % Relative deviation, %
ID9.pcd	20,08	20,82	0,74	3,69	20,32	0,24	1,20	19,81	-0,27	-1,34
ID0.pcd	18,45	18,17	-0,28	-1,39	18,56	0,11	0,55	18,33	-0,12	-0,60
ID10.pcd	20,62	20,53	-0,09	-0,45	20,63	0,01	0,05	20,33	-0,29	-1,44
ID12.pcd	18,97	18,85	-0,12	-0,60	19,06	0,09	0,45	18,89	-0,08	-0,40
ID15.pcd	20,16	20,38	0,22	1,10	20,34	0,18	0,90	20,06	-0,1	-0,50
ID17.pcd	20,42	20,16	-0,26	-1,29	20,68	0,26	1,29	20,31	-0,11	-0,55
ID18.pcd	19,61	20,1	0,49	2,44	19,86	0,25	1,25	19,64	0,03	0,15
ID20.pcd	19,35	19,29	-0,06	-0,30	19,74	0,39	1,94	19,22	-0,13	-0,65
ID21.pcd	18,1	18	-0,1	-0,50	18,28	0,18	0,90	17,98	-0,12	-0,60
ID22.pcd	18,17	18,21	0,04	0,20	18,34	0,17	0,85	18,42	0,25	1,25
ID3.pcd	16,61	17,2	0,59	2,94	16,92	0,31	1,54	16,83	0,22	1,10
ID4.pcd	19,08	19,43	0,35	1,74	19,28	0,2	1,00	19,15	0,07	0,35
ID5.pcd	20,3	20,86	0,56	2,79	20,27	-0,03	-0,15	20,26	-0,04	-0,20
ID6.pcd	19,72	19,9	0,18	0,90	20,1	0,38	1,89	19,64	-0,08	-0,40
ID7.pcd	19,29	19,06	-0,23	-1,15	19,38	0,09	0,45	19,07	-0,22	-1,10
ID8.pcd	19,18	19,57	0,39	1,94	19,43	0,25	1,25	19,41	0,23	1,15

составляют не более чем 1,5%. Отклонения от измерений при помощи теодолита DT405L, также показывают сравнительно небольшие отклонения, не превышающие 2%.

Таким образом, результаты этого исследования свидетельствуют о том, что метод измерения высоты деревьев по образам деревьев, полученным по данным лазерного сканирования, дают результаты с небольшими отклонениями. Это подтверждает надежность и применимость этих методов в геодезических и биологических исследованиях.

По представленным в таблицах результатам можно сделать вывод о том, что точность определения таксационных параметров по трехмерной измерительной сцене можно выполнять измерение диаметров и высот древостоя с требуемыми точностями – ступень толщины для диаметра на высоте 1,3 метра и 10% от средней высоты деревьев на выделе для определения высот.

Выводы

В результате исследования была разработана методика формирования трехмерной измерительной сцены радиальных пробных площадей постоянного радиуса для решения задач лесного сектора с использованием мобильного лазерного сканера, с последующей обработкой результатов в свободно распространяемом ПО Cloud Compare и 3D-Forest.

Апробация метода производилась на радиальной пробной площади, заложенной сотрудниками ФГБОУ ВО «Брянского государственного инженерно-технологического университета» в модельном сосновом насаждении. На изучаемом объекте было получено плотное облако точек, в дальнейшем ставшее основой для построения трехмерной измерительной видео сцены. Трехмерная видео сцена была обработана в специальном программном обеспечении с целью определения таксационных параметров для каждого

деревя на радиальной площади и построении для нее подеревного плана.

Была произведена верификация полученных измерений таксационных параметров по трехмерной измерительной сцене в результате натуральных измерений, подтвердившая валидность получаемых результатов.

Следует отметить, что из-за специфики выбранной локации для эксперимента (чистые насаждения) проблематика автоматизированного определения породы наподдеревом уровне осталась неизученной, однако в дальнейших исследованиях предполагается по данной тематике использовать нейросетевое дешифрирование по комбинации «образ плюс текстура».

Список использованных источников

1. Позднякова Ю.С., Подгорный Я.Б. Применение ГИС – технологий для анализа состояния лесного хозяйства // Актуальные исследования. 2021. № 36 (63). С. 24-26. URL: <https://apni.ru/article/2883-primenenie-gis-tekhnologij-dlya-analiza-sost>
2. Шайтура С.В., Васкина М.Ю. Комплексная цифровая модель мониторинга района // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 4. С. 71-76.
3. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с. ISBN978-5-91522-125-2
4. Шайтура С.В., Васкина М.Ю. Мониторинг земель районов Дальнего Востока // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2020. № 1. С. 28-33.
5. Шарипова Л.И. Мониторинг леса // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 4-3 (72). С. 140-144.
6. Ibrahim A.A., Koubaily E.K., Thabeet A.M. Monitoring cedruslibani forests conservation status in the syrian arab republic using geospatial technologies // Vesting of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2021. № 2 (50). С. 5-12.
7. Белов М.А., Шляхова М.М. Использование данных воздушного лазерного сканирования для решения задач лесного хозяйства // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. 2023. № 1. С. 62-66.
8. Миронова Ю.Н. Использование геоинформационных систем в лесном хозяйстве и лесной промышленности // Отходы и ресурсы. 2022. Т. 9. № 1, порядковый номер 4 (электронный журнал)
9. Ershov D.V., Sochilova E.N. Quantitative estimates of direct pyrogenic carbon emissions in forests of Russia according to remote monitoring data 2021 // Forest Science Issues. 2023. Т. 6. № 1. С. 1-14.
10. Жирнова К.А. Знакомство с принципом работы лазерного сканера ZENMUSE L1 / Иваныш А.В., Ядрышников Ф.М., Нурмахамаев В.Р., Митрофанов Е.М., Фролов И.И. // Славянский форум. 2022. № 1 (35). С. 333-339.
11. Урасова А.А., Глезман Л.В., Федосеева С.С. Анализ факторов развития рынка беспилотных летательных аппаратов в сельскохозяйственной промышленности // Экономика промышленности

Дополнительно специально установленное в исследовании ограничение на свободно распространяемое ПО упрощает применение разработанной технологии, однако не позволяет использовать в процессе обработки видеосцены некоторые специальные функции, реализованные в платных программных решениях.

Предложенная методика позволяет создавать измерительные трехмерные сцены для радиальной пробной площадей постоянного радиуса. Трёхмерное моделирование в лесном секторе позволяет автоматизировать процесс определения таксационных параметров и упрощает процесс формирования картографического материала.

Reference

1. Pozdnyakova Yu.S., Podgorny Ya.B. Application of GIS technologies for analyzing the state of forestry // Current research. 2021. No. 36 (63). P. 24-26. URL: <https://apni.ru/article/2883-primenenie-gis-tekhnologij-dlya-analiza-sost>
2. Shaitura S.V., Vaskina M.Yu. Integrated digital terrain model // Ecology of urbanized territories. 2019. No. 4. P. 71-76.
3. Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P. Monitoring and forecasting of natural disasters. Moscow, 2009. 692 p.
4. Shaitura S.V., Vaskina M.Yu. Monitoring of lands in the Far East // Land management, cadastre and land monitoring, 2020, No. 1, pp. 28-33.
5. Sharipova L.I. Forest monitoring // Current scientific research in the modern world. 2021. No. 4-3 (72). P. 140-144.
6. Ibrahim A.A., Koubaily E.K., Thabeet A.M. Monitoring cedruslibani forests conservation status in the Syrian Arab republic using geospatial technologies // Vesting of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2021. No. 2 (50). P. 5-12.
7. Belov M.A., Shlyakhova M.M. Using airborne laser scanning data to solve forestry problems // Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate assessment, ecology, technological solutions. 2023. No. 1. P. 62-66.
8. Mironova Yu.N. Use of geographic information systems in forestry and forest industry // Waste and resources. 2022. V. 9. No. 1.
9. Ershov D.V., Sochilova E.N. Quantitative estimates of direct pyrogenic carbon emissions in forests of Russia according to remote monitoring data 2021 // Forest Science Issues. 2023. V. 6. No. 1. P. 1-14.
10. Zhirnova K.A. Introduction to the operating principle of the ZENMUSE L1 laser scanner/ Ivanysh A.V., Yadryshnikov F.M., Nurmakhmetov V.R., Mitrofanov E.M., Frolov I.I. // Slavic Forum. 2022. No. 1 (35). P. 333-339.
11. Urasova A.A., Glezman L.V., Fedoseeva S.S. Analysis of market development factors for unmanned aerial vehicles in the agricultural industry. Industrial Economics / Russian Journal of Industrial Economics. 2023;16(3):263-274. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-3-263-274>

/Russian Journal of Industrial Economics. 2023;16(3):263-274.
<https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-3-263-274>

12. Kremena S., Shaytura S.V. Using the terrestrial laser scanning technology for detection of cracks in rock massifs // Slavic Forum. 2021. № 1 (31). P. 241-247.

13. Shaytura S.V., Minitaeva A.M., Sumzina L.V., Maksimov A.V. Site security system with 3d imaging – conference paper // CEUR Workshop Proceedings. 2021. No. 3035. P. 176.

14. Shaytura S.V., Minitaeva A.M., Sumzina L.V., Maksimov A.V. Site security system with 3D imaging – Conference Paper CEUR Workshop Proceedings, 2021, 3035, P. 176-182

15. Шайтура С.В. Инфраструктура пространственных данных для цифрового двойника лесной экосистемы / Митрофанов Е.М., Жаров В.Г., Феоктистова В.М. и др. // Дизайн и технологии. 2022. № 91-92. С. 160-168.

16. Сумзина Л.В., Шайтура С.В. Геоинформационные сервисы инфраструктуры пространственных данных. Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2018. № 9. С. 90-97.

Об авторах

Сергей Владимирович Шайтура, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-5621-5460>; swshaytura@gmail.com

Наталья Сергеевна Шайтура, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель; <https://orcid.org/0000-0002-9422-910X>; n.shaytura@rgau-msha.ru

Евгений Михайлович Митрофанов, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0003-1957-7638>; seferok@mail.ru,

Александр Сергеевич Мухин, канд. с.-х. наук, доцент; a.s.muxin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2130-994X>

Сергей Михайлович Устинов, системный инженер-аналитик; <https://orcid.org/0009-0007-1733-7952>; Serega32br@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Митрофанов Е.М., Мухин А.С., Устинов С.М. выполнили экспериментальные и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of authors

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

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 18.12.2023

Поступила после рецензирования / Received after peer review 14.02.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 14.02.2024

12. Kremena S., Shaytura S.V. Using the terrestrial laser scanning technology for detection of cracks in rock massifs // Slavic Forum. 2021. No. 1 (31). P. 241-247.

13. Shaytura S.V., Minitaeva A.M., Sumzina L.V., Maksimov A.V. Site security system with 3d imaging – conference paper // CEUR Workshop Proceedings. 2021. No. 3035. P. 176.

14. Shaytura S.V. Site security system with 3D imaging / Minitaeva A.M., Sumzina L.V., Maksimov A.V. / Conference Paper CEUR Workshop Proceedings, 2021, 3035, P. 176-182

15. Shaitura S.V. Spatial data infrastructure for a digital twin of a forest ecosystem / Mitrofanov E.M., Zharov V.G., Feoktistova V.M. // Design and technology. 2022. No. 91-92(133-134). P. 160-168.

16. Sumzina L.V., Shaitura S.V. Geoinformation services of spatial data infrastructure – Supplement to the journal News of Universities. Geodesy and aerial photography. Collection of articles based on the results of the scientific and technical conference. – 2018. – No. 9. – P. 90-97.

About the authors

Sergey V. Shaitura, CSc (Eng), associate professor, <https://orcid.org/0000-0002-5621-5460>; swshaytura@gmail.com

Natalya S. Shaitura, CSc (Phys-Math), senior lecturer2 <https://orcid.org/0000-0002-9422-910X>; n.shaytura@rgau-msha.ru

Evgeniy M. Mitrofanov, CSc (Tech), associate professor, <https://orcid.org/0000-0003-1957-7638>; seferok@mail.ru

Alexander S. Mukhin, CSc (Agro), associate professor3, a.s.muxin@gmail.com

Sergey M. Ustinov, systems CSc (Agro), engineer-analyst, Serega32br@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1733-7952>

Shaitura S.V., Shaitura N.S., Mitrofanov E.M. Mukhin A.S., Ustinov S.M. carried out experimental and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-133-140>

УДК 630*232.427:004.896



РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА В ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИИ И ЛЕСОРАЗВЕДЕНИИ

Р.А. Хахаев[✉], В.А. Савченкова

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал; 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1, Россия

Аннотация. Цель исследований – автоматизация процесса создания лесных культур. Объектом исследований является проектно-техническое решение автономного лесовосстановительного робота для посадки семян хвойных лесных культур (сосна, ель). Деградация и опустынивание земель являются значимой проблемой для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации. Более 100 млн га земель сельскохозяйственного назначения находятся под угрозой утраты плодородных свойств в связи с масштабными показателями деградации и опустынивания. Нехватка квалифицированных кадров и низкопроизводительный ручной труд не позволяют максимально эффективно использовать сжатые сроки проведения лесовосстановительных работ. В настоящее время остро требуются передовые разработки в области технических и хозяйственно-экономических аспектов лесокультурного дела. Все известные серийные модели лесовосстановительных машин используют ручной труд оператора для подачи семян к рабочим органам аппарата для дальнейшего высаживания в грунт по ходу движения машины. В связи с этим производительность данных комплексов напрямую зависит от личных навыков оператора и ограничивается ими. Применение автономного беспилотного робота – такого, как как разрабатываемый комплекс «Святобор», исключит человеческий фактор, стандартизирует качество посадки семян, будет способствовать максимально эффективному использованию сроков лесовосстановительных и лесоустроительных работ. Одновременно с вопросом стандартизации качества высадки семян значительная экономия времени и ресурсов достигается отсутствием необходимости подготовки почвы за счет внедрения машинного зрения, использования гусеничной платформы робота и специального плуга, выполняющего вскрытие плодородного слоя непосредственно в месте высадки каждого семени. В статье изложена концепция устройства комплекса «Святобор» включая основные элементы и этапы его подготовки к выполнению работ. Приведены результаты разработки бережного захвата семян хвойных лесобразующих пород.

Ключевые слова: лесовосстановительная машина, деревосажательная машина, посадочная машина, автоматизация лесного хозяйства, беспилотник, лесовосстановление, робототехника, лесовосстановительный робот

Формат цитирования: Хахаев Р.А., Савченкова В.А. Применение автономных роботизированных комплексов в лесовосстановлении // Природообустройство. 2024. № 4. С. 133-140. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-133-140>

Original article

DEVELOPMENT OF AN AUTONOMOUS ROBOTIC COMPLEX IN REFORESTATION AND AFFORESTATION

Р.А. Khakhaev[✉], V.A. Savchenova

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National research university)¹. Mytishchi branch; 141005, Moscow region, Mytishchi, 1st Institutskaya str., 1. Russia

Abstract. The purpose of the study is to automate the process of creating forest cultures. The object of the research is the design and technical solution of an autonomous reforestation robot for planting seedlings of coniferous forest crops (pine, spruce). Land degradation and desertification is a significant problem for ensuring food security in the Russian Federation. More than 100 million hectares of agricultural land are at risk of loss of fertility due to large-scale degradation and desertification. The lack of qualified personnel and low-productivity manual labor do not allow for the most effective use of the tight deadlines for reforestation work. At present, there is an urgent need for advanced developments in the field of technical and economic aspects of forest culture. All known serial models of reforestation machines use the manual labor of the operator

to feed seedlings to the working bodies of the device for further planting in the ground in the direction of the machine. In this regard, the productivity of these complexes directly depends on and is limited by the personal skills of the operator. The use of an autonomous unmanned robot, such as the Svyatobor complex being developed, will eliminate the human factor, standardize the quality of planting seedlings, and use the terms of reforestation and forest management work as efficiently as possible. Along with the issue of standardizing the quality of planting seedlings, significant savings in time and resources are achieved by eliminating the need for soil preparation due to the introduction of machine vision, the use of a robot track platform and a special plow that performs opening of the fertile layer directly at the place of planting each seedling. The article describes the concept of the Svyatobor complex, including the main elements and stages of its preparation for work. The results of the development of careful capture of seedlings of coniferous forest-forming species are presented.

Keywords: reforestation machine, wood-planting machine, planting machine, forestry automation, drone, reforestation, robotics, reforestation robot

Format of citation: Khakhaev R.A., Savchenkova V.A. Development of an autonomous robotic complex in reforestation and afforestation // *Prirodoobustrojstvo*. 2024. № 4. P, 133-140. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-133-140>

Введение. С середины XX в. активно стала распространяться идея механизации процесса создания лесных насаждений.

Начиная с 60-х гг. были разработаны десятки моделей, которые в той или иной мере автоматизировали способы скарификации грунта и подачи семян. Механизм их работы подробно описан в трудах ряда отечественных и зарубежных ученых [1-3]. Реализованные модели посадочных машин имеют одну общую характерную черту: на всех моделях используется труд оператора, который вручную из заготовленного бункера подает сеянец в посадочный механизм (рис. 1).

К аналогичным системам можно отнести M-Planter и EcoPlanter. Они представляют собой головки на стрелу манипулятора с барабанами, в которые сеянцы заряжаются оператором вручную до начала работы [4]. Этот этап ручного

труда является фактором, значительно ограничивающим производительность всех типов лесопосадочных машин. Фактически у всех моделей с задокументированными характеристиками производительность указывается в пределах до 340-350 высаженных сеянцев за эффективный час работы. Только несколько моделей заявили более высокие характеристики производительности, но результат их работы признан неудовлетворительным. Например, лесопосадочная Serlachius в соответствии с заявленной характеристикой показала производительность в 1100 сеянцев за эффективный час [5], однако задокументированы опасения по поводу качества посадки.

Аналогично канадская машина ReFor-ester 1978 г., выполненная на базе армейского бронетранспортера, должна была показать производительность в 2500 сеянцев за эффективный



Рис. 1. Схема посадки лесных культур лесопосадочной машиной
Fig. 1. The scheme of planting forest crops by a planting machine

час работы [6], но она также не соответствовала нормам высева. Максимальной задокументированной выработке в соотношении правильно высаженных семян (60-66%) к общему количеству высаженных за эффективный час работы добилась шведская компания SCA Silva Nova [7]. Ее машина с системой подачи семян PLS заявила производительность порядка 1770 семян в час. Используемая ими система PotLinkSystem (PLS) состояла из горшков, соединенных друг с другом по длине. Сеянцы должны были доставляться в зону производства работ, где портативный робот загружал семена в горшки PLS. Около 70 горшков были соединены в одну ленту, после чего робот заполнял горшки рассадой. Эта система подачи была довольно сложной, в связи с чем производительность машины SilvaNova с системой подачи PLS в соответствии с документацией достигала 1100 семян за эффективный час работы. Примерно аналогичные характеристики заявлены на сайте компании, эксплуатирующей лесопосадочную машину PlantmaX (1000-2500 семян за час работы).

К менее оптимистичным цифрам производительности можно прийти, если замерить количество выполненной работы по хронометражу представленных рекламных видеороликов работы PlantmaX. Это логично, так как принцип ее работы построен на все той же технологии подачи семян к посадочным органам оператором вручную, что согласно подтвержденным характеристикам аналогичных машин не может иметь высокую производительность в пересчете на эффективный час работы.

М.К. Асмоловским [8] проведено исследование производительности лесопосадочных машин с подачей семян вручную (рис. 2).

Выявлено, что главным критерием является время, за которое рабочий успеваеt поместить сеянец у приемного столика для его последующего зажима в захвате и переноса в образованное сошником посадочное место.

Назревшая в мировой практике необходимость создания лесопосадочных машин, интерес к беспилотным технологиям [9-13] и сформулированный М.К. Асмоловским вопрос достижения предела производительности в последнее время становятся еще более острыми на фоне снижения квалифицированных рабочих кадров, вовлеченных в процесс создания лесов.

Таким образом, актуальность и цель исследований обоснованы принципиально новой концепцией развития науки в области создания лесопосадочных машин. Современной наукой достигнут значительный прогресс в создании

и обучения искусственного интеллекта, машинного зрения, применения различных датчиков и приводов. В целях повышения эффективности восстановления лесных ресурсов все эти технологические достижения внедрены на стадии проектирования архитектуры автономного робота «Святобор» для лесоразведения и лесовосстановительных работ [14], разработка которого является научной новизной исследования.

Материалы и методы исследований.

В ходе обзорного анализа научных трудов применены описательный и сравнительный методы. Экспериментальная часть работы выполнена с применением метода конструирования. Обозначено геометрическое размещение элементов комплекса, ориентированных относительно друг друга. Приведен алгоритм действия предложенной конструкции.

Объектом исследований является проектно-техническое решение автономного лесовосстановительного робота (рис. 3).

Результаты и их обсуждение. Впервые разработана система лесовосстановительного робота «Святобор», имеющая следующие элементы:

1. Квадрокоптер, оснащенный приемником системы позиционирования и высотомером.

2. Тандем гусеничных машин.

2.1. Ведущая гусеничная машина комплекса со следующими элементами:

– плуг для вскрытия опада на коленвале;
– стальной клин на коленвале для устройства гнезда для высадки семян в почву;

– бак с топливом;

– дизель-генератор.

2.2. Ведомая гусеничная машина комплекса со следующими элементами:

– кассета из 5 бункеров с механизмом замещения пустого бункера;



Рис. 2. Искусственное лесовосстановление ручным способом с помощью меча Колесова

Fig. 2. Artificial reforestation by hand using the Kolesov sword

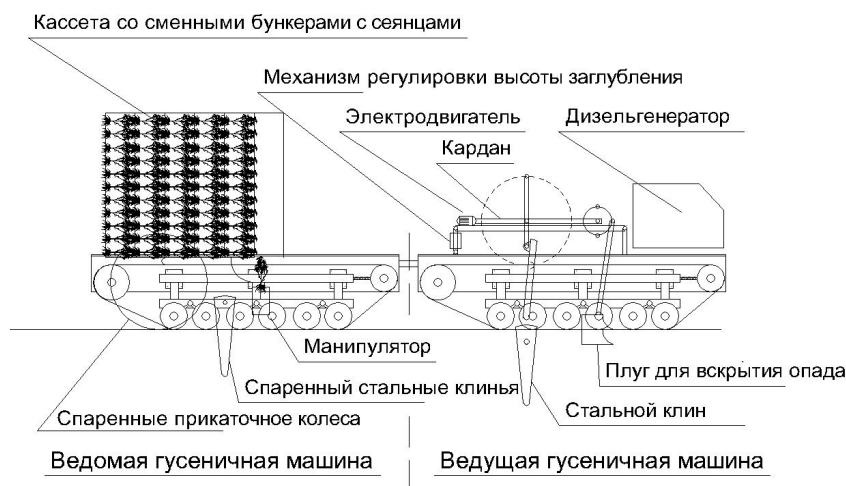


Рис. 3. Устройство лесовосстановительного комплекса «Святобор»

Fig. 3. Arrangement of the Svyatobor reforestation complex

– механизм высаживания (подвижный манипулятор, посадочная труба);

– два спаренных стальных клина, симметрично расположенных на коленах для первичного прижатия корневой системы сеянца;

– два симметрично расположенных спаренных прикаточных колеса для уплотнения грунта в зоне шейки сеянца;

– блок программного управления комплексом.

Подготовка комплекса «Святобор» к выполнению работ включает в себя следующие этапы:

1. С помощью квадрокоптера, оснащенного приемником системы позиционирования и высотомером, осуществляется облет и определяются координаты и контрольный промер высот (определяются непроходимые участки – резкие овраги, буреломы, непреодолимые участки исключаются из траектории) захватки, назначенной для выполнения работ по лесовосстановлению.

2. В программу расчета загружаются такие исходные данные, как тип почвы, количество и тип сеянцев на 1 га, координаты захватки.

3. Программой выполняется оптимальный расчет траектории движения гусеничных машин комплекса.

4. Гусеничные машины комплекса выстраиваются в последовательный тандем, стыкуются и синхронизируются.

5. Регулируется ширина бункера по средней высоте сеянца. Бункер заполняется сеянцами вручную.

6. Загружаются бункеры с сеянцами в подвижную кассету на платформу ведомой гусеничной машины.

7. Оператор в ручном режиме с помощью пульта управления выставляет тандем машин на начальную точку траектории.

8. Программой сверяются фактические координаты ведущей гусеничной машины комплекса с начальной точкой траектории, и при необходимости уточняется расчет траектории движения.

9. Механизмы высаживания на гусеничных машинах комплекса переводятся в рабочее положение.

10. Оператор дает команду к выполнению программы.

Алгоритм работы всего механизма заключается в следующем:

1. Передвижение машины осуществляется в соответствии с рассчитанной траекторией.

2. Все элементы связаны синхронизированной трансмиссией и работают одновременно с целью оказания манипулятивного воздействия в одной и той же точке по очереди по мере продвижения гусеничных машин комплекса над этой точкой. Глубина воздействия механизма непосредственно на точку высадки определяется высотомером и корректируется соответствующим приводом по вертикали.

3. Первым элементом, воздействующим на точку посадки, является плуг для вскрытия опада. Плуг опускается ниже уровня земли. Гусеничная машина своим ходом вместе с плугом производит вскрытие и перемещение в стороны верхнего слоя почвы.

4. Вторым элементом, воздействующим на точку посадки, является стальной клин, который внедряется в почву на участке, расчищаемом плугом от опада. При воткнутом стальном клине во время постоянного поступательного движения гусеничной машины происходит образование гнезда высадки сеянцев в почве.

5. На место высадки перемещается ведомая гусеничная машина комплекса, оснащенная

манипулятором выемки сеянцев из бункера, посадочной трубой, спаренными стальными клиньями для уплотнения почвы у корня сеянца и спаренными прикаточными колесами для уплотнения почвы в зоне шейки сеянца.

6. В ведомой гусеничной машине комплекса манипулятор осуществляет захват одного сеянца в бункере и перемещает его в посадочную трубу. В момент совмещения по вертикали посадочной трубы и гнезда в почве, образованного стальным клином ведущей гусеничной машины, осуществляется сброс сеянца.

7. По мере непрерывного движения гусеничной машины в точке высадки сеянца оказываются спаренные стальные клинья на общем коленвале, которые погружаются в почву по сторонам рядом с гнездом высадки сеянца. По мере движения гусеничной машины вместе со стальными клиньями, заглубленными в почву, происходит уплотнение почвы у корня сеянца.

8. По мере непрерывного движения гусеничной машины в точке высадки сеянца по сторонам рядом с гнездом высадки сеянца оказываются спаренные прикаточные колеса. По мере непрерывного движения гусеничной машины осуществляется уплотнение почвы в зоне шейки сеянца.

9. С целью исключения попадания гусеничных машин на участки с критическим уклоном комплекс снабжен высотомером для выявления резкого перепада высот на пути движения. После его активации осуществляется оповещение оператора и происходит перерасчет траектории движения.

10. С целью исключения удара о препятствие гусеничных машин ведущая машина комплекса снабжается датчиками определения

препятствий и машинным зрением. После их активации осуществляется оповещение оператора и происходит перерасчет траектории движения.

11. Для передачи оператору объективной визуальной информации гусеничные машины комплекса оснащаются видеокамерами с функцией передачи потокового видео (рис. 4).

Важным этапом конструирования является разработка максимально бережного захвата сеянца. В ходе исследований проведена сравнительная оценка биометрических показателей 2-летних сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и 3-4-летних сеянцев ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.). Средняя длина надземной части составила 13 см, корневой системы – 18 см, диаметр корневой шейки – 2,4 мм. Между стволиками сеянцев в разуплотненном состоянии принято расстояние 4-7 мм.

Мягкий захват манипулятора сконструирован из следующих элементов: компрессор (марка) 2,5 бара для миниаэрографии, ресивер, электромагнитные клапаны на впуск и стравливание воздуха (марка), патрубки и расширяемые резиновые элементы. Управление осуществлялось на базе платы Arduino UNO R3 с микроконтроллером ATmega328P. В качестве расширяющегося элемента захвата были испытаны разные типы резины: латекс (Natural Rubber Latex 60%, сертификат соответствия № ЕАЭС RU С-СО. НВ32.В.00240/20), подвулканизированный латекс (REVULTEX LAN960) и карбоксилированный акрилонитрилбутадиеновый каучук (Carboxylated Acrylonitrile Butadiene Copolymer). Эксперимент показал, что латекс и карбоксилированный акрилонитрилбутадиеновый каучук являются недолговечными и быстро разрушаются при резком нагнетании воздуха. Подвулканизированный

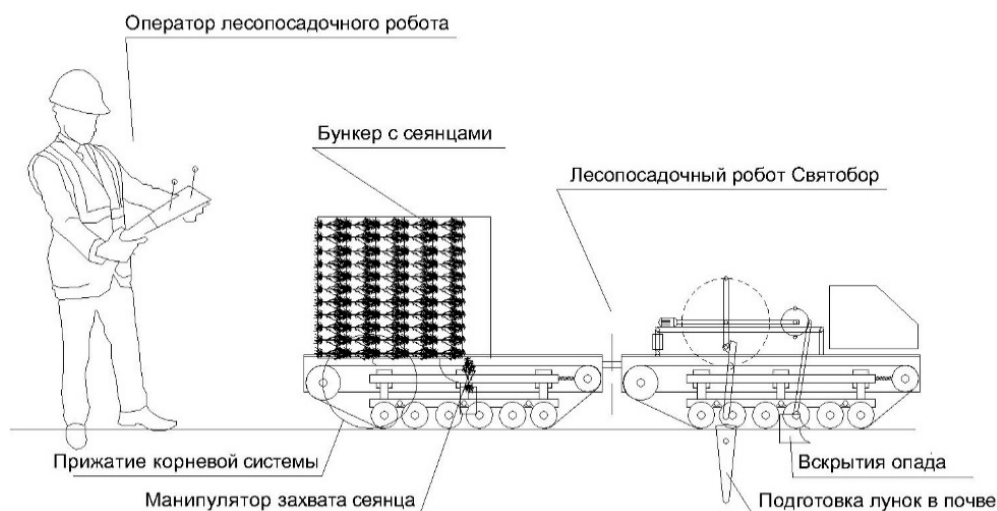


Рис. 4. Схема посадки лесных культур с помощью робота

Fig. 4. The scheme of planting forest crops using a robot

латекс показал неравномерное раздутие, однако позволил провести эксперимент с захватом сеянца. В ходе эксперимента выяснилось, что 100% сеянцев с открытой корневой системой в пучке мягким манипулятором захватить невозможно, так как силы захвата мягкого манипулятора не хватает, чтобы вытянуть сеянец со спутавшимися корнями. С учетом этого был разработан манипулятор с жесткими захватами.

В фрагменте пластикового короба из самозатухающего ПВХ пластика 40 × 40 длиной 100 мм была выполнена перегородка, на которую смонтированы два электромагнита (LS-P50/27) для отдельного управления двух подвижных элементов. На концах подвижных элементов с помощью клея смонтированы мягкие губки для повышения трения и более бережного захвата. К каждому электромагниту (LS-P50/27) подведен датчик приближения. Управление осуществлялось на базе платы Arduino UNO R3 с микроконтроллером ATmega328P. При попадании сеянца в зону захвата сигнал от датчика поступает на микроконтроллер, в свою очередь отправляющий сигнал на срабатывание электромагнита, в зоне которого оказался сеянец. Проведенная серия экспериментов показала, что электромагниты не создают достаточного усилия, чтобы сеянец можно было вытянуть из пучка. Мягкие губки на концах захватов были заменены на насечки, что тоже не привело к положительному результату. Однако уже были определены габариты между органами манипулятора, позволяющие отделять сеянцы по одному при вводе захватов манипулятора в пучок сеянцев.

Далее был произведен выбор типа датчика. Всего существует несколько типов бесконтактных датчиков: геркон, оптические, индуктивные и емкостные. Геркон и индуктивные датчики были исключены сразу, так как срабатывают на магнитное поле или на присутствие металла. Оптические датчики подразделяются на несколько типов: барьерные, рефлекторные и диффузионные. Могли бы подойти также емкостные типы бесконтактных датчиков. Для установления наиболее подходящего типа датчика для манипулятора были испытаны следующие модели: HLC1395-002 (датчик диодно-транзисторный), назначения), TCRT1010 (датчик оптический), QRE1113 (фототранзистор),

QRD111 (датчик оптический рефлекторный), TCRT5000 (датчик оптический барьерный), CNY70 (оптопара широкого

В контейнер T-178 пластиковый 9 × 6 × 1,8 см (тип «Gamma») были помещены два втягивающих соленоида (ZYE1-0530Z DC12V)

навстречу друг другу поперек главной оси захватов. При срабатывании соленоиды прижимают захваты друг к другу. Концы захватов были выполнены в форме плоских гарпунов. Испытания такого макета показали, что в 70-80% случаев итерации происходит успешный захват одного сеянца с ОКС из пучка с надежным его удержанием до момента вытаскивания из пучка. Однако данные соленоиды показали значительный нагрев в работе и были заменены более компактными соленоидами (MC0320L).

Таким образом, экспериментальным путем были определены оптимальные габариты захватов сеянцев, расстояние между ними, форма и габариты захватывающего конца, система приводов. Была создана в программном комплексе Shapr 3D-модель, распечатанная на 3D-принтере (Maestro SOLO) из пластика полимолочной кислоты (PLA, 200712074-1, Transparent plastic).

Манипулятор имел три пары захватов, расположенных со смещением по вертикальной проекции, чтобы полностью перекрывать щель бункера с сеянцами. Каждая пара захватов была выполнена с изменением вылета на 2 мм с целью уточнения наилучших показателей экспериментальным путем.

У каждой пары захватов смонтировано два датчика приближения (рис. 5).

Программа микроконтроллера была написана таким образом, что при попадании сеянца в зону срабатывания одного из датчиков, срабатывала именно эта пара захватов, для двух других ход засчитывался, как холостой.

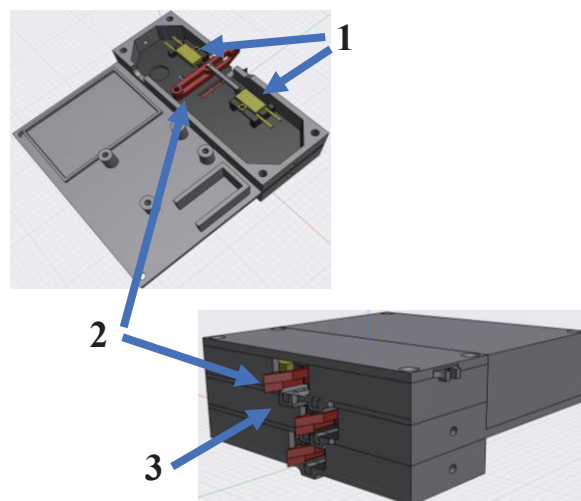


Рис. 5. Схема устройства манипулятора для захвата сеянцев:

1 – втягивающие соленоиды;

2 – захваты; 3 – оптические датчики

Fig. 5. Diagram of the manipulator device for capturing seedlings:

1 – retracting solenoids; 2 – grippers; 3 – optical sensors

Выводы

В ходе очередного этапа исследований будет осуществлена оценка стоимости комплекса и проведена апробация его в производственных условиях, чтобы адекватно определить вероятность его массового применения в ходе мероприятий по лесовосстановлению путем посадки семян лесобразующих пород.

Впервые разработанный комплекс будет способствовать решению одной из важнейших задач стратегического развития Российской Федерации, а именно: в ходе создания автономных роботизированных комплексов прорабатываются технологии машинного обучения, искусственного интеллекта, накапливается опыт реализации архитектуры автономной робототехники, что является большим заделом на будущее в рамках импортозамещения.

Испытания манипулятора с жесткими захватами семян и электромагнитными

приводами проведены в рамках Всероссийской акции «Посади лес» 14 мая 2023 г. на территории ГКУ КО «Износковское лесничество», Калужская область. В ходе испытания опытного образца манипулятора отработаны механизмы и уточнены габаритные размеры, которые требуют усовершенствования. Одними из важных выводов по результатам испытания стали слабость реакции оптических датчиков при дневном свете и резкое ухудшение работы манипулятора при загрязнении его плодородным грунтом.

С целью исключения загрязнения и ухудшения работы оптических датчиков при налипании грязи было принято решение переработать конструкцию манипулятора с жесткими захватами типа «Гарпун». Разработаны модель с толкателем в центральной части между захватами и 3D-модель в программном комплексе Sharp.

Список использованных источников

1. **Бобков Д.А., Никифоров А.И., Мухлынин Д.Н.** Российский опыт и особенности правового регулирования лесомелиоративных насаждений (лесополос) на землях сельскохозяйственного назначения // *Аграрное и земельное право*. 2020. № 8. С. 65-67.
2. **Владимиров И.А., Хайбулина Э.Р.** Правовой режим земель сельскохозяйственного назначения // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2019. Т. 9, № 1. С. 142-144.
3. **Драпалюк М.В., Стасюк В.В., Зеликов В.А.** Новые конструкции универсальных лесопосадочных машин для посадки семян с открытой и закрытой корневой системой // *Лесотехнический журнал*. 2021. Т. 11, № 4 (44). С. 112-123. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10>
4. **Rottensteiner C., Stampfer K.** Mechanisierte Pflanzung von Forstballenpflanzen // *Universität für Bodenkultur Wien Department für Wald und Bodenwissenschaften Institut für Forsttechnik*. Wien, 2009. № 77 (7).
5. Equipment for reforestation and timber stand improvement // *Forest Service Equipment Development Center*. Fort Missoula, Montana, 1980. P. 266.
6. **Rantala J., Harstela P., Saarinen V. – M., Tervo L.** A techno economic evaluation of Bracke and M-Planter tree planting devices // *Silva Fennica*. 2009. № 43 (4). Pp. 659-667.
7. **Ersson T.** Possible concepts for mechanized tree planting in Southern Sweden – an introductory essay on forest technology // *Sveriges lantbruksuniversitet*. Umea, 2010. P. 54.
8. **Бартенев И.М., Попов И.В.** Современное развитие конструкций лесопосадочных машин за рубежом // *Лесотехнический журнал*. 2014. Т. 4, № 2 (14). С. 203-216.
9. **Асмоловский М.К.** Состояние и перспективы механизации посадки лесных культур // *Труды Белорусского ГТУ*. 2015. № 1 (174). С. 119-123.
10. **Алябьев А.Ф.** Оценка эффективности технологических комплексов машин и создание новых средств

References

1. **Bobkov D.A., Nikiforov A.I., Mukhlynin D.N.** Russian experience and features of legal regulation of forest reclamation plantations (forest belts) on the lands of agricultural appointments. 2020. № 8. P. 65-67.
2. **Vladimirov I.A., Khaibulina E.R.** Legal regime of agricultural lands // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2019. V. 9, No 1. P. 142-144.
3. **Drapalyuk M.V., Stasyuk V.V., Zelikov V.A.** (2021) New designs of universal forest planting machines for planting seedlings with an open and closed root system. *Forest engineering journal*, Vol. 11. No. 4 (44). P. 112-123. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10>
4. **Rottensteiner C.** Mechanisierte Pflanzung von Forstballenpflanzen. *Universität für Bodenkultur Wien Department für Wald und Bodenwissenschaften Institut für Forsttechnik*. Wien. 2009. p. 77.
5. Equipment for reforestation and timber stand improvement. *Forest Service Equipment Development Center*. Fort Missoula, Missoula, Montana. 1980. 266 p.
6. **Rantala J.** A techno economic evaluation of Bracke and M-Planter tree planting devices. *Silva Fennica*. 2009. no. 43 (4). P. 659-667.
7. **Ersson T.** Possible concepts for mechanized tree planting in Southern Sweden – an introductory essay on forest technology. *Sveriges lantbruksuniversitet*. – Umea, 2010. 54 p.
8. **Bartenev I.M., Popov I.V.** Modern development of structures of forest planters abroad / I.M. Bartenev, I.V. Popov // *Forest Engineering Journal*. 2014. V. 4. – № 2(14). P. 203-216.
9. **Asmolovskij M.K.** *Sostoyanie i perspektivy mekhanizacii posadki lesnyh kultur* [Status and prospects of mechanization planting] *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. Minsk: BGTU. 2015. no. 1(174). P. 119-123.
10. **Alyabjev A.F.** Evaluation of the efficiency of technological complexes of machines and the creation of new mechanization tools for reforestation. Moscow. 2011. 39 p.

механизации для лесовосстановления: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2011. 39 с.

11. **Бартенев И.М.** Автоматизация процесса посадки растений // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 75. – С. 13. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/01/pdf/33.pdf>.

12. **Селименков Р.Ю., Миронов А.В.** Эффективность инновационных технологий в воспроизводстве лесов // Проблемы развития территории. 2011. № 3 (55). С. 51-58.

13. **Коршунов Н.А., Савченкова В.А., Перминов А.В., Конюшенков М.Е.** Перспективные направления применения беспилотных авиационных систем в лесном комплексе // Лесохозяйственная информация. 2022. № 2 (23). С. 34-46.

14. Свидетельство о регистрации электронного ресурса 2023621092 от 4 апреля 2023 г. Архитектура автономного робота Святобор для лесоразведения и лесовосстановительных работ / Р.А. Хахаев. М.: ОФЭРНиО, 2023.

Об авторах

Руслан Анатольевич Хахаев, аспирант; orcid: 0000-0003-2595-4591; xaxaev.ruslan@gmail.com

Вера Александровна Савченкова, д-р с.-х. наук, доцент ВАК, Researcher ID: Y-3167-2019 orcid: 0000-0001-8593-7887; v9651658826@yandex.ru;

11. **Bartenev I.M.** Automation of planting process. Scientific Journal of KubSAU. Krasnodar: 2012, no. 75. 13 p. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2012/01/pdf/33.pdf>.

12. **Selimenkov R.Yu., Mironov A.V.** Efficiency of innovative technologies in forest reproduction. Problems of territory's development. Vologda. VolNC RAS. 2011. no. 3 (55). P. 51-58.

13. **Korshunov N.A., Savchenkova V.A., Perminov A.V., Konyushenkov M.E.** Promising areas of application of unmanned aircraft systems in the forest complex. Forestry information. Moscow: FBU "VNIILM" 2022. no. 2. P. 34-46.

14. *Certificate of registration of electronic resource* no. 2023621092 dated 04.04.2023. Architecture of the autonomous robot Svyatobor for afforestation and reforestation works / R.A. Khakhaev. M OFERNiO, 2023.

About the authors

Ruslan A. Khakhaev, graduate student; orcid: 0000-0003-2595-4591; xaxaev.ruslan@gmail.com

Vera A. Savchenkova, DSc (Agro), associate professor of the Higher Attestation Commission, Researcher ID: Y-3167-2019 orcid: 0000-0001-8593-7887, v9651658826@yandex.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Хахаев Р.А., Савченкова В.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of 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 at the editorial office 24.03.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 28.07.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 28.07.2024

Khakhaev R.A., Savchenkova V.A. carried out theoretical and practical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-141-149>

УДК 630.2:674.032.475(470.22)



СОХРАННОСТЬ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР СОСНЫ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОЙ КАРЕЛИИ

К.А. Пак^{1✉}, О.И. Гаврилова¹, А.В. Грязькин²

¹ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»; 185960, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, Россия

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»; 194018, г. Санкт-Петербург, пер. Институтский, 5, корп. У, Россия

Аннотация. Целью исследований явился анализ причин неудовлетворительного состояния и гибели культур сосны в лесном фонде Республики Карелия. В статье представлены данные по оценке состояния лесных культур в преобладающих типах леса в Карельском северо-таежном районе. Объект исследований – лесные культуры сосны разного возраста в условиях брусничного и черничного типов леса. Проведен комплекс работ по оценке состояния лесных культур сосны. При выполнении учетных работ оценивали приживаемость, сохранность и основные показатели для перевода лесных культур в покрытые лесом земли. Учитывали видовой состав и структуру сформировавшихся молодняков на участках лесных культур. Установлено, что доля погибших лесных культур от общей площади обследованных участков в условиях черничного типа леса составляет 77%, в условиях брусничного типа – 8,4%. Лесные культуры неудовлетворительного состояния выявлены в условиях леса черничного типа на 3,1% площади, в условиях брусничного типа леса – 2,7%. Состав молодняков на участках лесных культур неудовлетворительного состояния включает в себя 49% сосны, относящейся к брусничному типу леса, и 26% сосны, относящейся к черничному типу. Численность сосны на участках погибших лесных культур составляет 256 и 232 экз/га соответственно. Установлены видовой состав и проективное покрытие живого напочвенного покрова. Выявлено 6 видов с проективным покрытием более 10%.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, лесные культуры, сохранность, качественные и количественные характеристики, причины гибели

Формат цитирования: Пак К.А., Гаврилова О.И., Грязькин А.В. Сохранность лесных культур сосны в условиях северной Карелии // Природообустройство. 2024. № 4. С. 141-149. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-141-149>

Original article

PRESERVATION OF PINE FOREST CROPS IN THE CONDITIONS OF NORTHERN KARELIA

К.А. Pak^{1✉}, О.И. Gavrilova¹, А.В. Gryazkin²

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Petrozavodsk State University», Lenin Ave., 33, Petrozavodsk, 185960, Russia

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, lane Institut'skiy, 5, building U, St. Petersburg, 194018 Russia

Abstract. The purpose of the study is to analyze the causes of the unsatisfactory condition and death of pine crops in the forest fund of the Republic of Karelia. The data on the assessment of the state of forest crops in the predominant forest types in the Karelian north-taiga region are presented. The objects of the study are pine forest crops of different ages in conditions of lingonberry and blueberry forest types. A complex of works was carried out at the research sites to assess the condition of pine forest crops. During the accounting work, the survival rate, safety and basic indicators for the transfer of forest crops to forested lands were evaluated. The species composition and structure of the formed young plants in the areas of forest crops were taken into account. It was found that the proportion of dead forest crops from the total area of the surveyed sites is 77% in the conditions of the blueberry type of forest and 8.4% in the lingonberry type of forest. Forest crops of unsatisfactory condition were found on 3.1% of the area in the conditions of the blueberry type of forest, 2.7% – in the conditions of the lingonberry type of forest. The composition of young trees in areas of forest crops of unsatisfactory condition includes 49% of pine in the cranberry type of forest and 26% in the blueberry type of forest. The proportion of pine trees of dead forest crops was 34 and 12%, respectively. The number of pine forest

crops in such areas is 256 and 232 pcs/ha, respectively. The projective coverage and species composition of the living soil cover were recorded in the areas of forest crops. 6 species with a projective coverage of more than 10% have been identified.

Keywords: scots pine, forest crops, safety, qualitative and quantitative characteristics, causes of death

Format of citation: Pak K.A., Gavrilova O.I., Gryazkin A.V. Preservation of pine forest crops in the conditions of North Karelia // Prirodoobustrojstvo.2024. No. 4. P. 141-149. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-141-149>

Введение. В качестве основного способа восстановления лесов в Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 года заложен способ создания лесных культур из посадочного материала с закрытой корневой системой [1]. Известно, что от вида и характеристик посадочного материала зависят состояние и качество создаваемых лесных культур [2-5]. Нередко на участках лесных культур происходит смена пород, что чаще всего наблюдается на арендуемых участках лесного фонда [6-8].

Современная практика лесовосстановления в целом характеризуется перекосом в сторону естественного возобновления и проведения мер содействия, что не всегда дает ожидаемые результаты. Известно, что на сухих бедных почвах искусственное возобновление сосной, как правило, протекает успешно [9-11]. В других условиях результат может быть различным: в одних случаях на участках, оставленных под естественное возобновление, формируется полноценный высококачественный древостой; на других лесных участках происходит смена главной породы и формируется древостой с преобладанием лиственных пород [7-9]. Влияние типа леса на состояние лесных культур сосны является существенным.

Естественное лесовозобновление имеет смысл планировать там, где имеются труднодоступные и удаленные участки леса, то есть в лесном фонде с неразвитой инфраструктурой [11, 12]. Для исключения смены пород на площадях лесных культур необходимо полное соблюдение агротехники выращивания лесных культур [7, 8], куда в обязательном порядке должен быть включен полный цикл лесоводственных уходов [7, 8].

В целом состояние и сохранность лесных культур зависят от технологии их создания, от вида посадочного материала и от условий местопрорастания [2, 7, 8, 11, 12].

Цель исследований: анализ причин неудовлетворительного состояния и гибели культур сосны в лесном фонде Республики Карелия.

Материалы и методы исследований. Объект исследований – лесные культуры сосны

обыкновенной разного возраста, созданные посевом и посадкой. Участки лесных культур расположены на территории Лоухского центрального лесничества (Чупинское участковое лесничество) Республики Карелия. Район исследования относится к Карельскому северо-таежному району (в соответствии с приказом МПП от 18 августа 2014 года № 367, с изм. на 2 августа 2023 г.) [18].

Для анализа причин неудовлетворительного состояния лесных культур в указанном лесничестве было отобрано 266 опытных участков с лесными культурами сосны разного возраста – от 5 до 40 лет. Общая площадь опытных участков составляет 2662,3 га. Лесные культуры сосны созданы в условиях черничного (39,3%) и брусничного (60,7%) типов леса.

На объектах исследований был проведен комплекс работ, включающий в себя оценку состояния лесных культур сосны, определение средней высоты и установление возраста. Предусматривалось обследование всех участков с лесными культурами сосны любого возраста (максимальный возраст – 39 лет). При этом обследовались и участки лесных культур, которые были списаны в разные годы при их переводе в покрытые лесом земли. Кроме того, учитывали видовой состав и характеристики подроста, подлеска и живого напочвенного покрова. При выполнении учетных работ оценивали приживаемость, сохранность и основные показатели для перевода лесных культур в покрытые лесом земли.

Растительность нижних ярусов: подрост, подлесок и живой напочвенный покров – учитывали на круговых учетных площадках по 10 м². Количество учетных площадок соответствовало установленному нормативу: не менее 2% от общей площади опытного объекта [2, 13].

Для сравнения видового состава живого напочвенного покрова использован коэффициент Жаккара (Jaccard, 1901). Значения этого коэффициента (K) определены по формуле:

$$K = c / (a + b - c),$$

где c – количество общих видов на сравниваемых участках лесных культур; a – количество видов на первом участке; b – количество видов на втором участке.

Все объекты исследований с учетом качества лесных культур были подразделены на три категории: первая – погибшие культуры; вторая – участки лесных культур неудовлетворительного состояния; третья – лесные культуры удовлетворительного состояния [15, 16].

В соответствии с действующей Лесоустройственной инструкцией при оценке качества лесных культур учитываются следующие характеристики:

– п. 79. «Лесное насаждение относится к хвойному... хозяйству при наличии в его составе древесных пород соответствующей группы... 50% и более...»;

– п. 92. «...Лесотаксационный выдел относится к лесным культурам, если древесные породы искусственного происхождения составляют не менее пяти единиц в составе лесного насаждения».

К неудовлетворительным по составу молоднякам отнесены культуры, доля которых по численности составляет менее 40%.

В соответствии со шкалой оценки состояния лесных культур, приведенной в справочнике «Общесоюзные нормативы для таксации лесов» [17], лесные культуры подразделены на следующие категории в зависимости от относительной полноты:

– 0,3 и менее – погибшие лесные культуры;
– 0,4-0,5 – лесные культуры неудовлетворительного состояния.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что в целом доля неудовлетворительных

и погибших культур оказалась существенной, что в первую очередь зависит от условий место-произрастания.

При проведении исследований по материалам лесоустройства особое внимание обращалось на рост культур удовлетворительного состояния. Так, основные площади на территории севера Карелии составляли культуры 4 класса бонитета, в небольшом количестве – 3 и 5 классов бонитета. По результатам проведенных исследований была определена средняя высота и установлен возраст лесных культур с учетом типа леса. На каждом участке лесных культур при проведении полевых работ все деревья были распределены на три категории по виталитету: жизнеспособные, нежизнеспособные и сухие. В зависимости от типа леса на участках лесных культур преобладали в основном либо жизнеспособные – сосняки брусничные (табл. 1), либо нежизнеспособные и сухие экземпляры – сосняки черничные (табл. 2). В целом доля нежизнеспособного подростка составляет в разрезе типов леса от 2,7 до 3,1% от общей численности сохранившихся экземпляров.

Как следует из данных, представленных в таблицах 1, 2, на конкретных участках лесных культур сосны виталитетная структура зависит от типа леса. Можно предположить, что основной причиной таких различий является разная интенсивность конкуренции со стороны лиственных пород и травостоя. Если в условиях брусничного типа леса в составе живого напочвенного покрова преобладают вереск и брусника при средней высоте кустарничков не более 25 см,

Таблица 1. Виталитетная структура на участке лесных культур сосны в условиях брусничного типа леса в возрасте 9 лет, %

Table 1. Vitality structure on the site of pine forest crops in lingonberry forest type at the age of 9 years, %

Группы по высоте, м <i>Height groups, m</i>	Жизнеспособные <i>Viable</i>	Нежизнеспособные <i>Not viable</i>	Сухие <i>Dry</i>
1-2	44	38	18
2,1-3	51	34	15
3,1-4	77	19	3
4,1 и более / 4.1 and more	84	11	5

Таблица 2. Виталитетная структура на участке лесных культур сосны в условиях черничного типа леса в возрасте 9 лет, %

Table 2. Vitality structure on the site of pine forest crops in the blueberry forest type at the age of 9 years, %

Группы по высоте, м <i>Height groups, m</i>	Жизнеспособные <i>Viable</i>	Нежизнеспособные <i>Not viable</i>	Сухие <i>Dry</i>
1-2	19	50	31
2,1-3	22	45	23
3,1-4	37	48	15
4,1 и более / 4.1 and more	78	18	4

то в условиях черничного типа леса высота травостоя достигает 1,1 м с преобладанием крупных злаков (вейник тростниковый, луговик дернистый) и обилия «Иван-чая».

На участках лесных культур в лесу брусничного типа молодняки лиственных пород представлены в небольшом количестве: это преимущественно береза повислая густотой не более 600 экз/га (на обследованном участке лесных культур сосны в возрасте 9 лет). В условиях черничного типа леса в составе лиственных пород, кроме березы, встречаются ольха серая, осина, ива козья. Общая густота лиственных пород на обследованном участке составила 3,2 тыс. экз/га.

Ниже дана характеристика лесных культур в целом по всей территории лесничества, созданных за последний 40-летний период. При этом обследовались и участки лесных культур, которые были списаны в разные годы при их переводе в покрытые лесом земли. В ходе обследований установлено, что на 67% площади культур лесоводственный уход (осветление) не проводился. Если на участках лесных культур по брусничному типу леса это привело к минимальным потерям лесных культур (доля погибших – 8,4%), то на участках культур в условиях черничного типа леса к погибшим отнесено 77% общей площади обследованных лесных культур. В условиях брусничного типа леса доля лесных культур удовлетворительного состояния составила почти 90%, в то время как в условиях черничного типа – не более 20%.

Согласно сведениям из книги лесных культур культуры сосны в возрасте более 25 лет были созданы посевом семян в основном по обработанной почве. Норма высева семян неизвестна. Лесные культуры в возрасте от 5 до 25 лет закладывались посадкой сеянцев густотой 3,2-3,5 тыс. экз/га также по обработанной почве.

В ходе проведенных исследований установлено, что большая часть лесных культур

на территории лесничества в условиях черничного типа леса имела неудовлетворительное качество и при переводе в покрытые лесом земли была списана. Оказалось, что доля погибших лесных культур в условиях брусничного типа леса существенно меньше, чем на участках лесных культур в лесу черничного типа.

В условиях брусничного типа леса неудовлетворительные и погибшие лесные культуры выявлены на 11% общей площади обследованных лесных культур, из них более 8% отнесено к погибшим. В условиях черничного типа леса доля погибших лесных культур в несколько раз больше и составляет 77% (табл. 3).

Как следует из данных, представленных в таблице 3, все лесные культуры сосны были подразделены на три категории: первая категория – удовлетворительные лесные культуры сосны; вторая категория – неудовлетворительные; и третья категория – погибшие лесные культуры. Графически распределение лесных культур сосны по категориям состояния в условиях сосняка брусничного (Сбр) и сосняка черничного (Счер) представлено на рисунке 1 (усредненные значения).

Из данных, представленных на рисунке 1, отчетливо видим, что лесные культуры в условиях брусничного типа леса характеризуются значительным преобладанием культур удовлетворительного состояния. Соотношение погибших лесных культур и культур удовлетворительного состояния составляет 1:11. Отсюда можно сделать следующий вывод: для Карельского северо-таежного района лесные культуры сосны более целесообразно создавать в условиях брусничного типа леса.

В ходе проведенных исследований установлено, что в условиях черничного типа леса основная часть лесных культур сосны отнесена к неудовлетворительным по характеристикам средней высоты и густоты. Доля сосны в этих молодняках

Таблица 3. Распределение лесных культур по состоянию с учетом типа леса

Table 3. Distribution of forest crops by state taking into account the type of forest

Показатели / Indicators	Площадь, га / Area, ha	%
Черничный / Blueberry	1048,0	100
– удовлетворительные / satisfactory	208,6	19,9
– лесные культуры неудовлетворительного состояния forest crops are of unsatisfactory condition	33,0	3,1
– погибшие лесные культуры / dead forest crops	806,4	77,0
Брусничный / Lingonberry	1614,3	100
– удовлетворительные / satisfactory	1435,7	88,9
– лесные культуры неудовлетворительного состояния forest crops are of unsatisfactory condition	43,0	2,7
– погибшие лесные культуры / dead forest crops	135,6	8,4

составляет, по усредненным данным, 26%, а доля лиственных пород значительно больше (табл. 4).

Неудовлетворительные результаты искусственного лесовосстановления в условиях черничного типа леса связаны главным образом с конкуренцией. На начальном этапе роста и развития лесных культур сосны лиственные породы, злаки и таежное крупнотравье подавляют светолюбивую сосну. Это происходит при полном отсутствии или при некачественном проведении агротехнических уходов. Отсутствие уходов приводит к отпаду лесных культур сосны. Доля отпада в отдельных случаях достигает 36%.

На более поздних этапах развития лесных культур сосны основными конкурентами молодняков сосны становятся быстрорастущие лиственные породы: осина, береза, ольха серая. В результате конкуренции и несоблюдения агротехники выращивания происходит полная или частичная потеря лесных культур, следствием чего является

смена пород: сосна сменяется березой, осиной, ольхой, под пологом которых спустя определенное время появляется подрост ели.

В результате проведенной работы по исследованию морфологии почвы, сформировавшейся под 9-летними культурами сосны в брусничном типе леса, она отнесена к песчаным грубогумусным, среднеподзолистым на песчаном основании. Под сосняками черничного типа леса сформировались почвы супесчаные модергумусные дерново-подзолистые на щебнистом основании (рис. 2).

При оценке состояния лесных культур учитывали видовой состав живого напочвенного покрова и проективное покрытие (табл. 5).

К основным видам в составе живого напочвенного покрова (проективное покрытие – более 10%) в зависимости от типа леса относятся *Vaccinium vitis-idaea* L., *Calluna vulgaris* (L.) Hull, *Cladonia* sp. (Wallr.) Flot., *Deschampsia flexuosa* (L.) Trin. и *Vaccinium myrtillus* L.

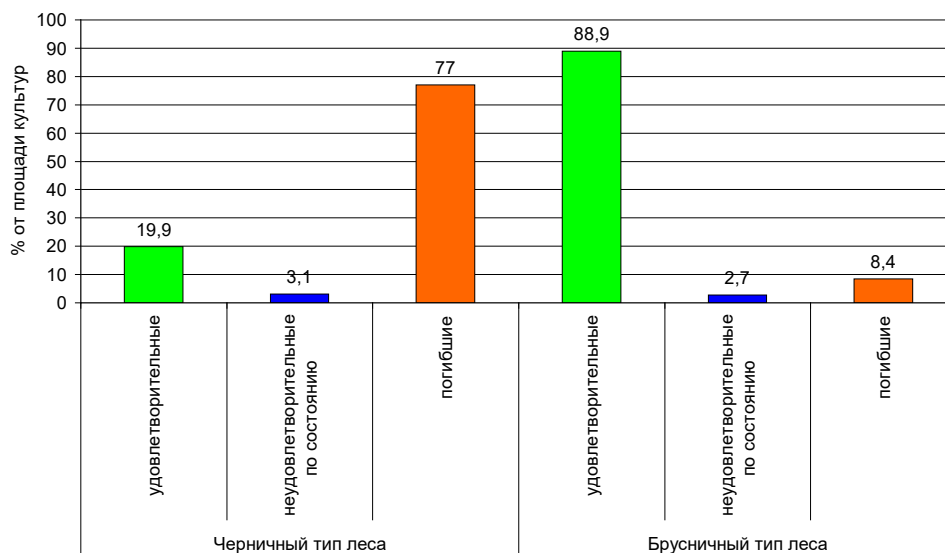


Рис. 1. Распределение общей площади лесных культур по категориям состояния и типу леса

Fig. 1. Distribution of the total area of forest crops by categories of the condition and type of forest

Таблица 4. Показатели культур сосны разного возраста на всех обследованных участках по типам леса

Table 4. Indicators of pine crops of different ages in all surveyed areas by forest type

Показатели Indicators	Тип леса / Type of forest	
	Сбр With lingonberry	Счер With blueberry
Число выделов, шт. / Quantity of allotments, pcs	7	21
Общая площадь, га / Total area, ha	43	286
Средний класс бонитета / The middle class of bonitet	4,6	4,2
Средний состав, % / Average composition, %	49С21Е30Б	26С63Б9Ос2Олс
Относительная полнота / Relative thickness	0,43	0,58
Средняя численность сосны, экз./га / Average quantity of pine, pcs	584 ± 78	537 ± 29
Общая численность древесных пород в составе молодняков, экз./га Total quantity of wood species within young forests, pcs / ha	1246 ± 238	2291 ± 166



Рис. 2. Характерные типы почв на участках лесных культур сосны в условиях черничного (Б) и брусничного (А) типов леса (Лоухское лесничество Республики Карелия)

Fig. 2. Typical types of soils in the areas of pine forest crops in the conditions of blueberry (B) and lingonberry (A) types of forest (Louhi forestry of the Republic of Karelia)

В условиях севера Карелии в составе живого напочвенного покрова на непокрытых лесом площадях на сухих песчаных почвах встречаются нетипичные для данных условий виды – гигрофиты. К таким видам были отнесены *Empetrum nigrum* L. и *Ledum palustre* L.

Судя по величине коэффициента флористической общности (0,83), общие виды для Сбр и Счер составляют 83%. Это означает, что в условиях севера Карелии состав живого напочвенного покрова слабо зависит от типа леса. С нашей точки зрения, это связано с сухостью и бедностью почвы, а также с суровым климатом. Если учитывать лишь основные виды в составе живого напочвенного покрова (табл. 4), то доля общих видов составит 50%.

В результате анализа основных показателей погибших лесных культур сосны было установлено, что в условиях сосняка черничного типа леса их в 4 раза больше, чем в условиях сосняка брусничного типа. По занимаемой площади эти различия более существенны и достигают 6-кратной величины.

При примерно одинаковом участии сосны в составе сформировавшихся молодняков относительная полнота в среднем выше в условиях черничного типа леса (табл. 6), что связано с участием значительного количества подроста других пород: березы, ели и осины.

Таблица 5. Видовой состав живого напочвенного покрова и проективное покрытие по видам на участках 9-летних лесных культур сосны

Table 5. Species composition of living soil cover and projective cover by species on sites of 9-year-old pine forest crops

Наименование растений Name of plants	Тип леса / Type of forest	
	Сбр With lingonberry	Счер With blueberry
Багульник болотный / <i>Ledum palustre</i> L.	-	2,7
Брусника обыкновенная / <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	21,3	12,7
Вейник тростниковый / <i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth	0	12,9
Вейник наземный / <i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth	9,3	0
Вереск обыкновенный / <i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull	17,9	10,9
Водяника черная / <i>Empetrum nigrum</i> L.	8,3	11,7
Кладония / <i>Cladonia</i> sp. (Wallr.) Flot.	11,0	3,2
Зеленые мхи / <i>Bryidae</i> sp. Engl.	3,7	15,0
Луговик дернистый / <i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P. Beauv.	-	3,0
Луговик извилистый / <i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Trin.	11,8	10,3
Политрихум можжевельниковый / <i>Polytrichum juniperinum</i> Hedw.	9,0	6,0
Цетрария исландская / <i>Cetraria islandica</i> (L.) Ach.	2,9	6,1
Черника обыкновенная / <i>Vaccinium myrtillus</i> L.	5,3	11,3
Ягель, кладония оленья / <i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Weber ex F.H. Wigg.	7,0	1,3
Итого / Total	106,5	104,4

Таблица 6. Показатели погибших культур сосны разного возраста по типам леса
Table 6. Indicators of dead pine crops of different ages by forest type

Показатели <i>Indicators</i>	Тип леса / <i>Type of forest</i>	
	Сбр <i>With lingonberry</i>	Счер <i>With blueberry</i>
Число выделов, шт. / <i>Quantity of allotments, pcs</i>	11	41
Общая площадь, га / <i>Total area, ha</i>	88,6	570,4
Средний класс бонитета / <i>The middle class of bonitet</i>	4,4	4,0
Усредненный состав, % / <i>Average composition, %</i>	63Б34С3Е	72Б6Ос12С10Е
Средняя относительная полнота / <i>Average relative thickness</i>	0,65	0,75
Средняя численность сосны, экз./га / <i>Average quantity of pines, pcs / ha</i>	256 ± 58	232 ± 38

Таким образом, небольшая численность сохранившейся сосны в лесных культурах на опытных участках приводит к тому, что такие лесные культуры были отнесены к погибшим. На всех подобных участках лесных культур произошла смена сосны другими породами.

По действующим Правилам лесовосстановления, в соответствии с требованиями Лесоустроительной инструкции [15, 16] при переводе лесных культур в покрытые лесом площади доля сосны в составе молодняков должна составлять не менее 50%. На объектах исследований к таким участкам отнесено всего 18,9% в условиях черничного типа леса и 88,9% – в условиях брусничного типа.

В многочисленных публикациях, в актах списания лесных культур в качестве основных причин гибели лесных культур сосны указываются качество посадочного материала, технология создания лесных культур, а также ненадлежащее проведение или отсутствие агротехнических и лесоводственных уходов. Полученные данные свидетельствуют о том, что не все созданные лесные культуры на практике удается доводить до формирования полноценного древостоя.

В общей численности молодняков сосны на опытных участках имеется и подрост сосны естественного происхождения. Численность подроста сосны изменяется в широких пределах и зависит от конкретных условий на лесокультурной площади включая расстояние до стен леса, в составе которых имеется сосна репродуктивного возраста. Установлено, что размах варьирования численности подроста сосны по опытным участкам составляет от 40 до 180 экз/га.

Лесные культуры сосны неудовлетворительного состояния в условиях черничного типа леса формируются ввиду влияния нескольких факторов. В первую очередь, это связано с сильной конкуренцией со стороны живого напочвенного покрова и естественного возобновления других лесобразующих пород. Например, доля

лиственных пород в составе лесных культур в условиях черничного типа может достигать 94%. В среднем эта доля составляет 86% (табл. 6). Кроме того, смена основной породы происходит в результате отставания сосны в росте от быстрорастущих лиственных пород, что подтверждается низким классом бонитета (4-5 классы). Сосна оказывается под пологом других лесобразующих пород включая ель. Ель за счет своей теневыносливости на начальном этапе роста не испытывает конкуренции со стороны живого напочвенного покрова и молодняка лиственных пород. Участие ели в составе молодняков на участках лесных культур сосны может достигать 43%. В среднем доля ели в составе молодняков составляет в зависимости от типа леса 3-10%.

Выводы

Лесные культуры сосны в условиях брусничного и черничного типов леса в Карельском северо-таежном районе создаются на достаточно большой площади. Сформировавшиеся молодняки характеризуются в основном IV классом бонитета.

Численность сосны на обследованных участках лесных культур разного возраста неудовлетворительного состояния в условиях брусничного типа леса в среднем составляет 584 экз/га, в лесу черничного типа – 537 экз/га.

На участках лесных культур, отнесенных к погибшим, численность сосны еще меньше: 256 и 232 экз/га соответственно, что составляет 34 и 12% от общей численности молодняков.

В качестве рекомендаций для Карельского северотаежного района предлагаем создавать лесные культуры сосны в условиях брусничного типа леса. В условиях черничного типа леса в обязательном порядке рекомендуем проведение рубок ухода в молодняках. При невозможности их проведения создание лесных культур сосны не имеет смысла.

Список использованных источников

1. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года: утв. Распоряжением Правительства РФ от 11 февраля 2021 г. № 312-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155/?ysclid=m1hmqjir61501070090>.
2. **Соколов А.И.** Сохранность и рост культур сосны, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой в условиях Карелии / Харитонов В.А., Пеккоев А.Н., Кривенко Т.И. // Известия вузов. Лесной журнал. 2015. № 6 (348). С. 46-56. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.6.46.
3. **Жигунов А.В.** Влияние вида посадочного материала на рост насаждений ели и сосны на постагrogenных землях северо-запада России / Данилов Д.А., Шестакова Т.А., Неверовский В.Ю. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». 2016. № 3 (31). С. 30-39. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.3.30.
4. **Гоф А.А.** Эффективность создания лесных культур сосны обыкновенной сеянцами с закрытой корневой системой в ленточных борах Алтая: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2020. 18 с.
5. **Бобушкина С.В.** Приемы повышения эффективности производства посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой в Архангельской области // Лесной вестник. 2021. Т. 25, № 6. С. 45-54. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-45-54.
6. **Nilsson U., Allen H.L.** Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine // *Forest Ecology and Management*. 2003. No. 1. Pp. 367-377.
7. **Ponomarev G.A., Ivanova S.G.** Conard // *Canadian Journal of Forest Research*. 2013. V. 43, No. 5. Pp. 493-506. DOI: 10.1139/cjfr-2012-0367.
8. **Шахов А.Г., Грязькин А.В.,** Нгуен Ван Зинь. Естественное возобновление ели на площадях лесных культур // Символ науки: Международный научный журнал. 2016. № 4. С. 69-71.
9. **Нгуен В.З.** Естественное возобновление хвойных пород на площадях лесных культур / Грязькин А.В., Беляева Н.В., Фан Т.Л., Шахов В.Г. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. № 223. С. 6-15.
10. **Грязькин А.В.** Естественная смена ели сосной на участках лесных культур / Беляева Н.В., Шахов В.Г., Нгуен В.З. // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 1 (33). С. 54-61.
11. **Grossnickle S.C. & MacDonald J.E.** Why Seedlings Grow: Influence of Plant Attributes // *New Forests*. 2018. No. 49. Pp. 1-34. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>
12. **Гаврилова О.И.** Современные проблемы лесовосстановления в России и оценки его качества / Грязькин А.В., Кабонен А.В., Щукин П.О., Суханов Ю.В. // DIGITAL: Рецензируемый научный электронный журнал. 2021. № 3. С. 8-16. URL: <https://clck.ru/UMAFW>; <http://digital-journal.ru/wp-content/uploads/2021/09/4.pdf>.
13. **Гаврилова О.И., Пак К.А., Морозова И.В., Юрьева А.Л.** Формирование искусственных сосновых древостоев в условиях карельской таежной зоны // Известия вузов. Лесной журнал. 2017. № 4. С. 23-33. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b55/gavrilova.pdf>.
14. Способ учета подраста: Пат. 2084129 РФ, МКИ С 6 А 01 G 23/00 / А.В. Грязькин. Заявитель

References

1. Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No.312-rdatedFebruary11,2021.<https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155/?ysclid=m1hmqjir61501070090>
2. **Sokolov A.I., Kharitonov V.A., Pekkoev A.N., Krivenko T.I.** Preservation and growth of pine crops created by planting material with a closed root system in Karelia // *Izvestiya VUZov. Forest magazine*. 2015. No. 6 (348). P. 46-56. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.6.46.
3. **Zhigunov A.V.** The influence of the type of planting material on the growth of spruce and pine plantations on postagrogenic lands of the north-west of Russia / D.A. Danilov, T.A. Shestakova, V.Yu. Neverovsky // *Bulletin of the Povolzhsky State Technological University. Forest: Ecology. Environmental management*. 2016. No. 3 (31). P. 30-39. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.3.30.
4. **Gough A.A.** The effectiveness of the creation of forest crops of scots pine by seedlings with a closed root system in the ribbon forests of Altai: abstract. dis. ... candidate of agricultural sciences. Yekaterinburg, 2020. 18 p.
5. **Bobushkina S.V.** Techniques for increasing the efficiency of production of softwood planting material with a closed root system in the Arkhangelsk region // *Lesnoy Vestnik*. 2021. Vol. 25, No. 6. P. 45-54. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-45-54.
6. **Nilsson U., Allen H.L.** Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine // *Forest Ecology and Management*. 2003, No. 1, P. 367-377.
7. **Ponomarev G.A. Ivanova, S.G. Conard** // *Canadian Journal of Forest Research* 2013.V. 43. No. 5. P. 493-506. doi: 10.1139/cjfr-2012-0367.
8. **Shakhov A.G., Gryazkin A.V.,** Nguyen Van Zin. Natural renewal of spruce trees in the areas of forest crops // *International scientific journal "Symbol of Science"*. 2016. No. 4. P. 69-71.
9. **Nguyen V.Z., Gryazkin A.V., Belyaeva N.V., Fan T.L., Shakhov V.G.** Natural renewal of coniferous species in the areas of forest crops // *Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy*. 2018. No. 223. P. 6-15.
10. **Gryazkin A.V., Belyaeva N.V., Shakhov V.G., Nguyen V.Z.** Natural change of spruce by pine in forest crops // *Forestry Journal*. – 2019. – Vol. 9. – № 1(33). – P. 54-61.
11. **Grossnickle S.C., & MacDonald J.E.** (2018). Why Seedlings Grow: Influence of Plant Attributes. *New Forests*, 49, 1-34. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>
12. **Gavrilova O.I., Gryazkin A.V., Kabonen A.V., Shchukin P.O., Sukhanov Yu.V.** Modern problems of reforestation in Russia and its quality assessment // *DIGITAL*–2021.–No. 3.–pp. 8-16. <https://clck.ru/UMAFW>. ISSN: 2713-2439. A peer-reviewed scientific electronic journal. Certificate of Publication No. 4 dated September 17, 2021 <http://digital-journal.ru/wp-content/uploads/2021/09/4.pdf>.
13. **Gavrilova O.I., Pak K.A., Morozova I.V., Yuryeva A.L.** Formation of artificial pine stands in the conditions of the Karelian taiga zone // *Izv. vuzov. Forest Journal* 2017. No. 4. P. 23-33 <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b55/gavrilova.pdf>.
14. **Gryazkin A.V.** Pat. 2084129 RF, MКИ С 6 А 01 G 23/00. The method of accounting for undergrowth [Text] / A.V. Gryazkin. The applicant and the patent holder are

и патентообладатель Санкт-Петербургская лесотехническая академия. № 94022328/13. Заяв. 10.06.94; Опубл. 20.07.97. Бюл. № 20. 3 с.

15. **Jaccard P.** Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques regions voisines // Bull. Soc. Vaudoise sci. Natur. 1901. V. 37. Bd. 140. S. 241-272.

16. Лесоустроительная инструкция, 2022, введ. с 1 марта 2023 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696?ysclid=m1hn4mloxh580469258>.

17. Правила осуществления лесовосстановления или лесоразведения в случае, предусмотренном частью 4 статьи 63¹ Лесного кодекса Российской Федерации: утв. Постановлением Правительства РФ от 18 мая 2022 г. № 897. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404624773/?ysclid=m1hn6lxq1s45523401>.

18. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В.В. Загребев, В.И. Сухих, А.Э. Швиденко, Н.Н. Гусев, А.Г. Мошкалева. М.: Колос, 1992. 405 с.

19. Перечень лесорастительных зон Российской Федерации: утв. приказом МПР РФ от 18 августа 2014 г. № 367, с изм. на 2 августа 2023 г. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-minprirody-rossii-ot-18082014-n-367/?ysclid=m1hniubj3a254762237>.

Об авторах

Карина Аркадьевна Пак, аспирант; ResearcherID: HLW-5102-2024 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3615-1423>; pak.ka@10.roslesinforg.ru

Ольга Ивановна Гаврилова, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: AAF-6295-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239> ogavril@mail.ru

Анатолий Васильевич Грязькин, д-р биол. наук, профессор; SPIN-код: 7206-1050, AuthorID: 304945; <https://orcid.org/0000-0002-3497-9312>; lesovod@bk.ru

the St. Petersburg Forestry Academy. No. 94022328/13; application. 10.06.94; pub. 07/20/97, Office No. 20.3 p

15. **Jaccard P.** Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques regions voisines // Bull. Soc. Vaudoise sci. Natur. 1901. V. 37. Bd. 140. S. 241-272.

16. Forest management Instruction, 2022 (effective from March 1, 2023),

17. Rules for reforestation or afforestation in the case provided for in Part 4 of Article 63.1 of the Forest Code of the Russian Federation. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 897 dated May 18, 2022. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404624773/?ysclid=m1hn6lxq1s45523401>

18. All-Union standards for forest taxation / V.V. Zagreev, V.I. Sukhoi, A.E. Shvidenko, N.N. Gusev, A.G. Moshkalev. M.: Kolos, 1992. 405 p.

19. List of forest-growing zones of the Russian Federation. Approved by Order of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation No. 367 dated August 18, 2014 (as amended on August 2, 2023). <https://sudact.ru/law/prikaz-minprirody-rossii-ot-18082014-n-367/?ysclid=m1hniubj3a254762237>

About the authors

Karina A. Pak, graduate student; ResearcherID: HLW-5102-2024 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3615-1423>; pak.ka@10.roslesinforg.ru

Olga I. Gavrilova, DSc (Agro), professor; ResearcherID: AAF-6295-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>; ogavril@mail.ru

Anatoly V. Gryazkin, DSc (Biology), professor SPIN code: 7206-1050, AuthorID: 304945; <https://orcid.org/0000-0002-3497-9312>; lesovod@bk.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Пак К.А., Гаврилова О.И., Грязькин А.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of 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 at the editorial office 08.04.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 28.07.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 28.07.2024

Pak K.A., Gavrilova O.I., Gryazkin A.V. performed theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism