

ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

5' 2022

Москва, Издательство РГАУ-МСХА

Moscow, Publishing house
of Russian Timiryazev State Agrarian University

УДК 502/504
ББК 20.1
П 77

ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

5' 2022

Учредитель и издатель:

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

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

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

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

Полнотекстовые версии доступны на сайте
<http://elibrary.ru>

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

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

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

Подписано в печать 21.12.22 г.
Формат 60 84/8, Тираж 500 экз.

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

За достоверность информации
ответственность несут авторы.

Главный научный редактор

Снежко В.Л., доктор технических наук, профессор, академик РАЕ
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Заместитель главного научного редактора

Бенин Д.М., кандидат технических наук, доцент,
член-корр. 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)

Бегляров Д.С., 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)

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

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

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

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

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

Михеев П.А., д-р. техн. наук, профессор
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)

Рулев А.С., д-р. с.-х. наук, с.н.с., академик РАН
ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»,
(г. Волгоград, 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)

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

Цена подписная

УДК 502/504
ББК 20.1

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2022

UDC 502/504
BBC 20.1
P 77

ISSN 1997-6011

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

5' 2022

Founder and Publisher:

**Russian Timiryazev State
Agrarian University**

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

Certificate of registration

PI No FS 77-58566 dated July 14, 2014

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

Full versions are posted on the site
<http://elibrary.ru>

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: 127434,
Moscow, Pryanishnikova str., 14, building 7-7A
Tel.: +7 (499) 976-36-67
Email: prirodamgup@mail.ru
Website : environment.elpub.ru

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

Signed for print 21.12.22
Format 60 84/8, Circulation 500

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

The authors of articles are responsible
for validity of the information.

Chief scientific editor

Snezhko V.L., doctor of technical sciences, professor,
RANS academician
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Associate chief scientific editor

Benin D.M., candidate of technical sciences,
associate professor, corresponding member of the Russian academy
of hydro economic sciences
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Editorial board

Alekseev A.S., doctor of geographical sciences, professor
The Saint-Petersburg state university named after S.M. Kirov
(Saint-Petersburg, Russian Federation)

Beglyarov D.S., doctor of technical sciences, professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Bezborodov Yu.G., doctor of technical sciences, professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Bryanskaya Yu.V., doctor of technical sciences, associate professor
FGBOU VO "National research Moscow state building university" (Moscow,
Russian Federation)

Volosukhin V.A., doctor of technical sciences, professor
Academy of hydraulic structures safety (Novocherkassk, Russian Federation)

Dubenok N.N., doctor of agricultural sciences, professor,
academician of RAS
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Zharnitsky V.Ya., doctor of technical sciences, associate professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Ismaylov G.H., doctor of technical sciences, professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Karpenko N.P., doctor of technical sciences, associate professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Kosichenko Yu.M., doctor of technical sciences, professor
FGBNU RosNIIPM (Novocherkassk, Russian Federation)

Lisichkin S.E., doctor of technical sciences, senior researcher
Branch of the public company "Institute "Hydroproject" – "NIIES" (Moscow,
Russian Federation)

Mikheev P.A., doctor of technical sciences, professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Pchelkin V.V., doctor of technical sciences, professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Ratkovich L.D., doctor of technical sciences, professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Rubin O.D., doctor of technical sciences, senior researcher
Public company "Institute "Hydroproject" – "NIIES" (Moscow, Russian Federation)

Rulev A.S., doctor of agricultural sciences, senior researcher,
academician of RAS
FGAOU VO "Volgograd state university" (Volgograd, Russian Federation)

Khanov N.V., doctor of technical sciences, professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

Khlyustov V.K., doctor of agricultural sciences, professor
RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)

SUBSCRIPTION: electronic catalogue of «Pressa Rossii»
<https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/t80746/>

Price of subscription

UDC 502/504
BBC 20.1

Содержание

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Снежко В.Л., Бенин Д.М., Гавриловская Н.В., Петухова М.В., Подобный А.В. Автоматизированный измерительный комплекс для мониторинга уровневого режима каналов и параметров атмосферы	6
Яшин В.М., Глазунова И.В. Обоснование требований растений к регулированию водного режима почв и его контроль	15
Сметанин В.И., Бедретдинов Г.Х. Многофункциональная двухъярусная осушительно-увлажнительная система	22
Пчёлкин В.В., Сергеева А.М. Расчет водопотребления красного клевера с использованием испарения с водной поверхности в условиях Нечерноземной зоны	28
Калиниченко Р.В., Семенова К.С., Каблуков О.В. Водопонижение и водоотлив как способ предварительного осушения территории парка академика Сахарова г. Санкт-Петербурга	36
Исаев А.С. Оценка степени благоприятности агроклиматических и почвенно-мелиоративных условий бассейна Саны для агрохозяйственных требований основных культур	45

2.1.6. Гидротехническое строительство

Волосухин В.А., Бандурин М.А., Приходько И.А., Вербицкий А.Ю. Безопасность сооружений инженерной защиты долины реки Псекупс с учетом изменившихся во времени нагрузок и воздействий	52
Баклыков И.В. Расчетное обоснование сооружений примыкания батопорта сухого дока с учетом поэтапности возведения и комплексных нагрузок	60
Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Оценка пропуска минимальных расходов воды сооружениями дюкерного типа мелиоративных систем	68

2.1.6. Гидравлика и инженерная гидрология

Исмайлова И.Г., Исмайлов Г.Х. Оглы, Мурашенкова Н.В., Перминов А.В. Обоснование развития гидрологических процессов с использованием динамико-стохастического подхода	74
Раткович Л.Д., Исмайлова И.Г., Бовина Ю.А., Щёголева С.Н., Манхаль Муалла Оценка водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала реки на основе имитационного моделирования водохозяйственного баланса	83
Дрововозова Т.И., Марыгин В.О. Разработка региональных ПДК для водотоков: Ерик Бешеный, река Солёная бассейна Нижнего Дона	93
Журавлева Л.А., Попков И.А., Алдиаб Анас, Хеирбеик Бассел Исследования характеристик потока в напорных трубопроводах оросительных систем с дискретным отбором жидкости	100
Мустафаев Ж.С. Влияние изменения климата на водообеспеченность сельскохозяйственных угодий в зонах недостаточного увлажнения Казахстана	105
Гурьев А.П., Ханов Н.В., Хаек Бушра, Новиченко А.И. Гидравлическое обоснование работы телескопического водовыпускного сооружения в незатопленном режиме	114

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

Хлюстов В.К., Васенёв И.И., Ганихин А.М. Влияние климатических показателей на продуктивность сосновых древостоев	121
Кочегаров И.С., Кабанов А.Н., Кабанова С.А., Невенчаная Н.М., Данченко М.А., Скотт С.А. Агроэкологическая оценка почв под лесными насаждениями защитной зоны города Астаны	132
Банщикова Е.А., Желибо Т.В. Предварительные итоги изучения флоры Нерчуганского заказника (Забайкальский Край)	139

Contents

4.1.5. Land reclamation, water economy and agrophysics

Snezhko V.L., Benin D.M., Gavrilovskaya N.V., Petukhova M.V., Podobnyj A.V. Automated measuring complex for monitoring the level mode of channels and atmospheric parameters	7
Yashin V.M., Glazunova I.V. Substantiation of plant requirements for the regulation of the water regime of soils and its control.....	15
Smetanin V.I., Bedretdinov G.H. Multifunctional two-tier drainage and humidification system	22
Pchelkin V.V., Sergeeva A.M. Calculation of water consumption of red clover using evaporation from the water surface in the Non-Chernozem zone	28
Kalinichenko R.V., Semenova K.S., Kablukov O.V. Waterdrawdown and dewatering as a method of preliminary drainage of the territory of the park of academician Sakharov, St. Petersburg.....	36
Isaev A.S. Assessment of the degree of favorability of agroclimatic and soil-reclamation conditions of the Sanaa basin to the agricultural requirements of the main crops.....	45

2.1.6. Hydraulic engineering construction

Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Verbitsky A.Yu. Safety of engineering protection facilities of the Psekups river valley, taking into account time-varying loads and impacts	53
Baklykov I.V. Computational substantiation of the abutment structures of the floating bulkhead of the dry dock taking into account the staged construction and complex loads	60
Chernikh O.N., Burlachenko A.V. Assessment of minimum water flow by siphon type structures of reclamation systems.....	68

05.23.16 Hydraulics and engineering hydrology

Ismailylova I.G., Ismailylov G.Kh. Ogly, Murashchenkova N.V., Perminov A.V. Substantiation of the development of hydrological processes using the dynamic-stochastic approach.....	75
Ratkovich L.D., Ismajylova I.G., Bovina Yu.A., Shchegoleva S.N., Manhal Moualla Assessment of water management and hydropower potential of the river based on simulation modeling of water management balance	84
Drovovozova T.I., Marygin V.O. Development of regional MPC for watercourses: Erik Beshenny, the Solenaya River of the Lower Don basin	93
Zhuravleva L.A., Popkov I.A., Aldiab Anas, Heirbeik Basseel Studies of flow characteristics in pressure pipelines of irrigation systems with discrete fluid sampling	100
Mustafaev Zh.S. Impact of climate change on water supply of agricultural land in zones of insufficient moisture in Kazakhstan	105
Guryev A.P., Khanov N.V., Hayek Bushra, Novichenko A.I. Hydraulic substantiation of the telescopic outlet operation in non-flooded mode	114

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

Khlyustov V.K., Vasenev I.I., Ganikhin A.M. The impact of climatic indicators on the productivity of pine stands	122
Kochegarov I.S., Kabanov A.N., Kabanova S.A., Nevenchanaya N.M., Danchenko M.A., Scott S.A. Agroecological assessment of soils under forest plantations of the protection zone of Astana	133
Banshchikova E.A., Zhelibo T.V. Preliminary results of the study of the flora of the Nerchugansky Reserve (Zabaikalsky Krai)	139

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Оригинальная статья

УДК 502/504:631.672.4:621.3.087.47:681.586.48

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-6-14

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА УРОВНЕВОГО РЕЖИМА КАНАЛОВ И ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

СНЕЖКО ВЕРА ЛЕОНИДОВНА , д-р техн.наук, профессор
vlsnejko@rgau-msha.ru

БЕНИН ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ, канд.техн. наук, доцент
dbenin@rgau-msha.ru

ГАВРИЛОВСКАЯ НАДЕЖДА ВЛАДИМИРОВНА, канд.техн.наук, доцент
gavrilovskayanv@rgau-msha.ru

ПЕТУХОВА МАРИЯ ВЛАДИСЛАВОВНА, канд.пед.наук, доцент
petukhova@rgau-msha.ru

ПОДОБНЫЙ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ, преподаватель
a.podobnyi@rgau-msha.ru

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

Современная концепция развития орошения в Российской Федерации базируется на проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию новой техники и технологий ирригации. Особый акцент делается на широком внедрении автоматизации, энергосбережения, возможностей применения современных цифровых решений. Внедрение автоматизации на мелиоративных системах в России сдерживается не только низким уровнем их технического состояния, но и значительной удаленностью объектов автоматизации от источников энергоснабжения. Цель исследований – разработка автоматизированного измерительного комплекса, способного производить мониторинг уровневого режима открытой мелиоративной сети, атмосферного давления и температуры с передачей данных на сервер и последующим анализом данных мониторинга для условий, задаваемых пользователем. Разработанный автоматический измерительный комплекс может работать как от аккумуляторных батарей, так и от возобновляемого источника энергии – солнечных батарей. Приведены принципиальная схема комплекса и результаты экспериментальных испытаний опытного образца в лабораторных и полевых условиях. Описаны возможности специальной компьютерной программы, анализирующей данные мониторинга. Точность измерения атмосферного давления при температуре 25°C составляет $\pm 0,12$ гПа. Точность измерения температуры атмосферного воздуха составляет $\pm 1^\circ\text{C}$, диапазон измерения лежит в пределах $-40...+85^\circ\text{C}$. При наличии волновых явлений и отсутствии успокоительного колодца основная абсолютная погрешность измерения уровня – 0,02 м. В испытаниях при высоте установки от 0,4 до 2,0 м над статичным уровнем воды основная абсолютная погрешность составляет 0,01 м.

Ключевые слова: мелиорация, канал, уровень воды, контроль, автоматическое измерение, автоматизация, датчики

Формат цитирования: Снежко В.Л., Бенин Д.М., Гавриловская Н.В., Петухова М.В., Подобный А.В. Автоматизированный измерительный комплекс для мониторинга уровневого режима каналов и параметров атмосферы // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 6-14. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-6-14.

© Снежко В.Л., Бенин Д.М., Гавриловская Н.В., Петухова М.В., Подобный А.В., 2022

Original article

AUTOMATED MEASURING COMPLEX FOR MONITORING THE LEVEL MODE OF CHANNELS AND ATMOSPHERIC PARAMETERS

SNEZHKO VERA LEONIDOVNA[✉], doctor of technical sciences, professor

vlsnejko@rgau-msha.ru

BENIN DMITRY MIKHAILOVICH, candidate of technical sciences, associate professor

dbenin@rgau-msha.ru

GAVRILOVSKAYA NADEZHDA VLADIMIROVNA, candidate of technical sciences, associate professor

gavrilovskayanv@rgau-msha.ru

PETUKHOVA MARIA VLADISLAVOVNA, candidate of pedagogical sciences, associate professor

petukhova@rgau-msha.ru

PODOBNYJ ALEXANDER VICTOROVICH, lecturer

a.podobnyj@rgau-msha.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49, Russia

The modern concept of irrigation development in the Russian Federation is based on research and development works on the creation of new irrigation equipment and technologies. Particular emphasis is placed on the widespread introduction of automation, energy saving, the possibility of using modern digital solutions. The introduction of automation on reclamation systems in Russia is constrained not only by the low level of their technical condition, but also by the significant remoteness of automation facilities from power supply sources. The purpose of the research is to develop an automated measuring complex capable of monitoring the level mode of an open reclamation network, atmospheric pressure and temperature with data transmission to the server and subsequent analysis of monitoring data for user-defined conditions. The developed automatic measuring complex can work both from batteries and from a renewable energy source – solar panels. The schematic diagram of the complex and the results of experimental tests of the prototype in laboratory and field conditions are given. The capabilities of a special computer program that analyzes monitoring data are described. The accuracy of measuring atmospheric pressure at a temperature of 25°C is ± 0.12 hPa. The accuracy of measuring the temperature of atmospheric air $\pm 1^\circ\text{C}$, measuring range lies within $-40..+85^\circ\text{C}$. In the presence of wave phenomena and the absence of a float well, the main absolute error in measuring the level is 0.02 m. In tests at a height of the installation from 0.4 to 2.0 m above the static water level, the main absolute error is 0.01 m.

Keywords: land reclamation, channel, water level, monitoring, automated measurement, automation, sensors

Format of citation: Snezhko V.L., Benin D.M., Gavrilovskaya N.V., Petukhova M.V., Podobnyj A.V. Automated measuring complex for monitoring the level mode of channels and atmospheric parameters // Prirodoobustroystvo. – 2022. – № 5. – P. 6-14. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-6-14.

Введение. В государственном мелиоративном фонде России насчитывается более 470 источников орошения, из которых 14% требуют восстановления; 20,9 тыс. км каналов, из которых 43% требуют восстановления; 284 водохранилища, из которых в восстановлении нуждаются 20% [1]. Реконструкцию и восстановление мелиоративных объектов необходимо производить с учетом последующего применения современных средств и технологий их эксплуатации. К требованиям Национального стандарта по эксплуатации мелиоративных систем [2] относится обязательное наблюдение за водным режимом водоемностей, водоприемников и режимом работы каналов. Информация

по характерным гидрологическим параметрам водного потока должна предоставляться и анализироваться за любой период времени. Стандарт регламентирует организацию мониторинга параметров водного потока с обеспечением заданной точности измерений, дистанционного контроля и оперативной передачи информации.

Одним из признаков технического совершенства мелиоративной системы является степень автоматизации, которая в настоящее время в России осуществляется недостаточными темпами. Это связано с особенностью мелиоративных систем, для которых характерны большое количество одиночных или рассредоточенных объектов контроля; медленная скорость протекания

процессов и редкое изменение параметров; отсутствие источников электроэнергии вблизи объектов; работа объектов в условиях повышенной температуры, влажности и запыленности.

Номенклатура средств водоизмерения, имеющихся на пунктах водоучета открытой и закрытой сети мелиоративных систем, приведена в работе [3]. Наиболее негативная ситуация наблюдается на открытой сети. Из всей номенклатуры средств водоизмерения, имеющихся на пунктах водоучета открытых каналов мелиоративных систем, преобладают гидрометрические рейки (1316 ед.), и лишь 80 ед. – это приборы, причем приборы устаревшего образца. Стандартные гидротехнические уровнемерные рейки размещаются, как правило, в береговых успокоительных нишах или колодцах (рис. 1). Измерение уровня является дискретным, выходная информация исключительно визуальная и сложно поддается автоматическому мониторингу.



Рис. 1. Успокоительный колодец с уровнемерной рейкой [4]

Fig. 1. Float well with a level-measuring rail [4]

Для измерения уровня и расхода воды на оросительных системах может использоваться ряд отечественных контрольно-измерительных приборов. Ультразвуковые расходомеры ЭХО-Р-03 могут быть установлены на трубопроводах. Фазоемкостные уровнемеры ФЕУ-1 способны производить измерения уровня до 10 м с погрешностью от 2,5 до 5%. Ультразвуковые сигнализаторы уровня РИЗУР-900 имеют погрешность 2% и напряжение питания 24В. Датчик-реле уровня РО-1 имеет диапазон измерения уровней до 10 м. Перспективность использования ультразвуковых уровнемеров на гидрометрических постах мелиоративной сети напрямую зависит от наличия источников электроэнергии [5]. Ограниченное применение приборов с ультразвуковым зондированием потока для измерения уровней воды на открытых каналах мелиоративных систем отмечено в работе [6]. Это связано со сложностью электроснабжения

на удаленных постах и достаточно высокой стоимостью измерительного оборудования.

Использование конечными пользователями в России и за рубежом автоматических уровнемеров (поплавковых, напорных, ультразвуковых, радиолокационных) сдерживают высокая стоимость оборудования и проблемы обеспечения регулярного технического обслуживания. Для снижения затрат создаются недорогие автономные устройства мониторинга – например, простейшая система контроля, включающая в себя датчик давления и регистратор данных [7]. Испытания новых средств водоучета, использующих датчики давления и передачу данных на сервер в условиях юга России, приведены в работе [8]. Существуют технические решения для мониторинга метеорологических данных и параметров систем водоснабжения [9, 10].

Информационное обслуживание мелиоративных каналов как объектов контроля должно включать в себя не только автоматический сбор, передачу, хранение и отображение данных, но и автоматизированный анализ информации, получаемой посредством измерений, для любых временных интервалов.

Целью исследований стала разработка автоматизированного измерительного комплекса, способного производить мониторинг уровневого режима открытой мелиоративной сети, атмосферного давления и температуры с передачей данных на сервер и последующим анализом данных мониторинга для условий, задаваемых пользователем. Комплекс способен работать как от аккумуляторных батарей, так и от возобновляемого источника энергии – солнечных батарей.

Для достижения поставленной цели был решен ряд задач: программирование контроллера, сборка экспериментального образца, испытания комплекса в гидравлической лаборатории, на акватории пруда и на действующей оросительной системе, разработка/тестирование программного обеспечения для анализа данных измерений и Государственная регистрация программы для ЭВМ.

Материалы и методы исследований. Для выбора конструкции измерительного комплекса и программирования его элементов выполнен анализ условий эксплуатации, диапазонов и требуемой точности измеряемых величин, использованы методы теории программирования логических контроллеров, методы декомпозиции и формализации алгоритмов, структурного программирования. При испытаниях опытного образца устройства использованы методы теории планирования эксперимента, математической статистики, а также методы теории ошибок.

Предварительно испытания опытного образца комплекса производились в гидравлической лаборатории при измерении статичного уровня воды в бассейне и измерении уровня при течении потока в гидравлическом лотке. Питание устройства осуществлялось с помощью аккумуляторной батареи.

Основная особенность комплекса – возможность работы от солнечных батарей. При работе от солнечных батарей испытания комплекса производились в солнечную безветренную погоду на акватории Фермского пруда (территория кампуса РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва) при отсутствии выраженного волнения зеркала воды. Последующие полевые испытания проводились в Алтайском крае, для которого характерен высокий уровень инсоляции (270-280 дней в году или более 2000 часов в год). В качестве действующего мелиоративного объекта выбрана Лосихинская оросительная система, расположенная на территории Первомайского района Алтайского края.

Водохранилище гидроузла на р. Большая Лосиха при нормальном подпорном уровне НПУ=144,4 имеет объем 123 тыс.м³; при уровне мертвого объема УМО=143,6 м объем составляет 90 тыс.м³. Средняя глубина составляет 3,65 м. В состав гидроузла входят бетонная водоподъемная переливная плотина, водосбросное сооружение, насосная станция, водозаборное сооружение и шлюз-регулятор с максимальной пропускной способностью 8,6 м³/с. Береговое водозаборное сооружение расположено в верхнем бьефе. Вода к насосной станции поступает из бетонного подводящего канала прямоугольного сечения. Максимальная глубина воды в канале перед плоским затвором шлюза-регулятора – 1 м, размер затвора составляет 2 × 1,5 м (рис. 2). Все сооружения гидроузла относятся к IV классу опасности, для которого установка контрольно-измерительной аппаратуры исходно не предусмотрена проектом. На гидроузле нет оборудования для автоматического контроля уровней воды. Служба эксплуатации фиксирует отметки уровней по уровнемерной рейке с последующей записью в журнале наблюдений.

Выбор гидрометрического створа для установки экспериментального образца измерительного комплекса на подводящем канале соответствовал рекомендациям для гидропостов. При расходе подводящего канала до 10 м³/с длина прямолинейного участка канала в 4 раза превышала его ширину, то есть составляла более 8 м.

Оценка точности наблюдений за уровнем воды является неотъемлемой частью использования любых средств измерений [11].

В исследовании [12] отмечено, что систематические ошибки определения уровня воды по датчикам гидрометрических станций составляли от ±0,005 до ±0,068 м, что привело к погрешности среднесуточного стока от 4 до 12%. Для выявления погрешностей измерений в России, Канаде, США, Франции результаты показаний датчиков сопоставляются с эталонным измерением по гидрометрическим (водомерным) рейкам.

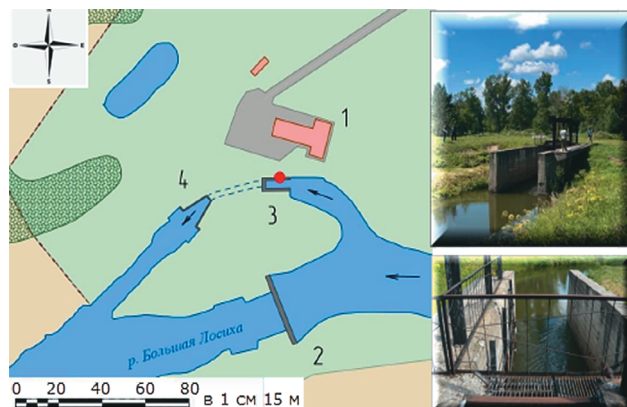


Рис. 2. Схема гидроузла на р. Большая Лосиха и место установки измерительного комплекса:

- 1 – насосная станция; 2 – бетонная водоподъемная переливная плотина; 3 – подводящий канал и водозаборное сооружение; 4 – отводящий канал туннельного типа

Fig. 2. Scheme of the hydraulic complex on the Bolshaya Losikha River and the place of installation of the measuring complex:

- 1 – pumping station; 2 – concrete water-lifting overflow dam; 3 – supply channel and intake structure; 4 – outlet channel of tunnel type

В испытаниях основной измеряемой величиной являлось расстояние от плоскости установки датчика до уровня воды, которое необходимо сопоставить с результатами визуальных замеров по водомерным рейкам. Абсолютная погрешность на каждой проверяемой отметке вычислялась как разность между показанием датчика и соответствующим отсчетом по рейке:

$$\Delta h_{\text{о.п.}} = h_{\text{н.у.}} - h_{\text{с.п.}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{н.у.}}$ – показания проверяемого устройства; $h_{\text{с.п.}}$ – расстояние по рейке как по средству проверки.

За основную абсолютную погрешность принималась максимальная по модулю абсолютная погрешность. Вариация показаний, равная наибольшей абсолютной погрешности $\Delta h_{\text{о.п.}}$ на одной и той же отметке при росте уровня воды и при его снижении, не должна превышать абсолютного значения основной погрешности. Отметка установки датчика (отметка начала шкалы измерений) соответствовала

нулевой отметке отсчета по водомерным рейкам. Параллельный контроль измерений комплексом температуры атмосферного воздуха и давления не проводился. Измерение температуры среды одновременно с измерением уровня ультразвуковым датчиком было необходимо для последующей коррекции температурной погрешности последнего [13].

Результаты и их обсуждение. Экспериментальный образец измерительного комплекса был разработан и собран в лаборатории кафедры систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. На рисунке 3 приведен пример размещения элементов комплекса на штанге (общий защитный корпус не показан) и детализации основного элемента – уникального датчика. В состав измерительного комплекса входят также аккумулятор и солнечная панель. Микроконтроллер запрограммирован для считывания данных с сенсоров и модулей, их обработки, записи на карту памяти и/или отправки по каналам сотовой связи на удаленный сервер. Часы реального времени являются энергозависимым модулем для привязки результатов измерений к реальным временным меткам. Ультразвуковой сенсор служит для приема и передачи сигналов в ультразвуковом диапазоне частот. В используемом ультразвуковом дальнометре в отличие от инфракрасных датчиков измерения не искажаются от бликов или цвета (прозрачности) воды. Выбор ультразвукового датчика обусловлен его относительно низкой стоимостью по сравнению с датчиками других типов [14]. Прецизионный датчик атмосферного давления и температуры воздуха работает в диапазоне давления от -500 до $+9000$ м над уровнем моря, обеспечивает точность измерения давления при температуре $25^{\circ}\text{C} \pm 0,12$ гПа (что эквивалентно разности высот ± 1 м), абсолютная точность составляет ± 1 гПа. Диапазон измерения температур датчика лежит в пределах $40...+85^{\circ}\text{C}$ с точностью измерений температуры $\pm 1^{\circ}\text{C}$. После проведения серии измерений данные могут отправляться на сервер с помощью GSM-модуля и/или сохраняться на карте памяти.

Волнение водной поверхности в створе измерения может негативно сказываться на точности измерений, поэтому в отечественной и зарубежной практике при амплитуде колебаний более $0,05$ м на водомерных постах обязательно установка успокоительных устройств, снижающих высокочастотные колебания уровня воды. В автоматических пневматических уровнемерах при использовании аналоговых фильтров нижних частот «бегущей волны»,

которые отфильтровывают шумы от ветровых волн и зыби на воде, не требуется устройство успокоительного колодца, так как ошибки измерений минимизируются [15]. На подводящем канале водозабора Лосихинской оросительной системы успокоительная ниша не предусмотрена проектом. Для устранения возможных колебаний измеряемых уровней при их фиксации измерительным комплексом предусмотрено последовательное использование двух фильтров данных: медианного фильтра третьего порядка и рекурсивного фильтра скользящего среднего.

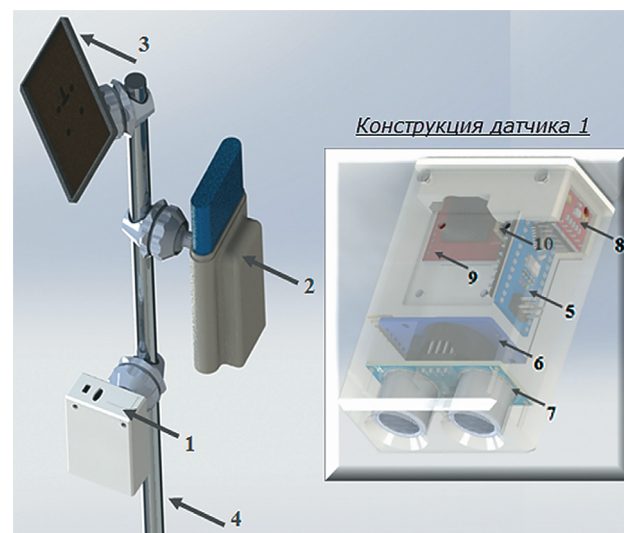


Рис. 3. Измерительный комплекс (без защитного корпуса) и датчик:

- 1 – датчик; 2 – аккумулятор; 3 – солнечная панель; 4 – штанга; 5 – микроконтроллер; 6 – часы реального времени; 7 – ультразвуковой сенсор; 8 – прецизионный датчик давления и температуры воздуха; 9 – GSM-модуль; 10 – модуль записи данных на SD карту

Fig. 3. Measuring complex (without protective housing) and sensor:
1 – sensor; 2 – accumulator; 3 – solar panel; 4 – rod; 5 – microcontroller; 6 – real-time clock; 7 – ultrasonic sensor; 8 – precision pressure and air temperature sensor; 9 – GSM module; 10 – SD card data recording module

При испытаниях комплекса на спокойной водной поверхности в каждой серии опытов изменялась высота его крепления на гидрометрической штанге: $0,9$ м; $1,2$ м; $1,5$ м; $2,0$ м. Штанга устанавливалась на дно бассейна лаборатории, затем в прибрежной зоне пруда на глубине $0,5$ м. Положение штанги контролировалось пузырьковым уровнем. Для каждого высотного положения производились ежеминутные измерения расстояния до водной поверхности датчиком с записью в память устройства. Параллельно с интервалом в 3 мин измерения производили водомерной рейкой ГР-104 с погрешностью

отсчета $\pm 0,01$ м. Каждая серия включала в себя 5 замеров с интервалом 3 мин, результаты замеров по рейке вносились в журнал наблюдений с указанием места и времени замеров.

Гидравлический лоток прямоугольного поперечного сечения, в котором испытывался измерительный комплекс, имел длину 15 м, ширину 1,5 м и высоту 0,97 м. В экспериментах варьировались два фактора: расход воды в лотке (что соответствовало различным уровням и скорости течения воды) и высота крепления комплекса на штанге (рис. 3). Высота крепления была равной 0,9 м; 1,2 м; 1,5 м. В остальном методика проведения эксперимента соответствовала приведенной выше.

На подводящем канале измерительных, комплекс жестко закреплялся на металлическом профиле внутри прямоугольного бетонного участка вне зон влияния плоского затвора и входа (рис. 4). Погодные условия позволили избежать установки защитного корпуса, что снизило вес устройства до 1,6 кг.

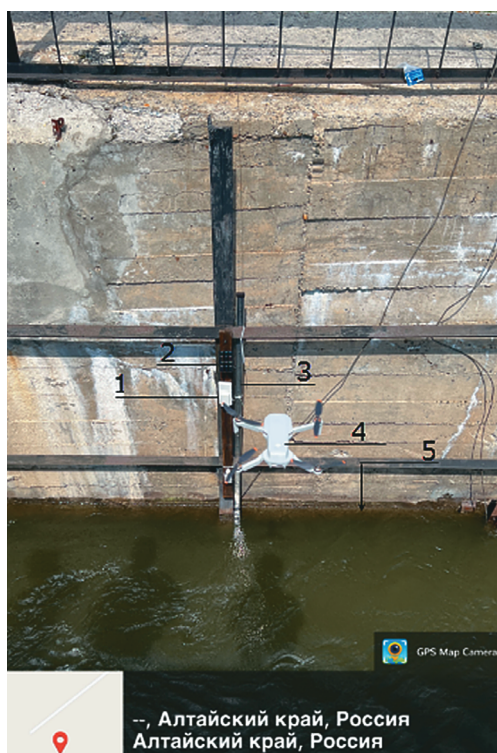


Рис. 4. Фрагмент испытаний измерительного комплекса на подводящем канале:

- 1 – датчик; 2 – солнечная панель;
3 – гидрометрическая рейка; 4 – квадрокоптер;
5 – водная поверхность

Fig. 4. Fragment of tests of the measuring complex on the supply channel:

- 1 – sensor; 2 – solar panel; 3 – hydrometric rail;
4 – quadcopter; 5 – water surface

Датчик, установленный на расстоянии 0,5 м от водной поверхности, получал питание

от солнечной батареи и записывал информацию через равные интервалы времени (1 мин). Гидрометрическая рейка ГР-104 служила для визуального контроля уровня. Для удобства снятия показаний по рейке с учетом требований техники безопасности использовался квадрокоптер с видеокамерой. Похожие методы применялись при измерении уровня воды с помощью видеокамеры и стандартных двухцветных рейкомеров [16] и мониторинга уровня воды при автоматическом обнаружении видеокамерой рейки и считывании ее показаний [17]. Время непрерывной работы экспериментального образца измерительного комплекса на подводящем канале составило 100 ч, данные измерений представлены листингом значений с временными метками. Контрольные замеры по рейке проводились в светлое время суток с интервалом между измерениями 1 час, данные визуального контроля вносились в журнал измерений с соответствующими временными метками.

Сравнение результатов измерений по вододомерной рейке и данных измерений, полученных с помощью комплекса, выполнено для всех испытаний. Данные листинга сопоставлялись с данными журнала измерений для одинаковых временных меток. В испытаниях измерительного комплекса на акваториях без волнения основная абсолютная погрешность составила 0,01 м. В каналах с течением (гидравлический лоток и подводящий канал) основная абсолютная погрешность составила 0,02 м. Вариация показаний, равная наибольшей абсолютной погрешности $\Delta h_{\text{о.п.}}$ на одной и той же отметке при росте уровня воды и при его снижении, была меньше абсолютного значения основной погрешности. Технические возможности экспериментального образца позволяют измерять уровни воды в интервале от 0,2 до 4,0 м с параллельным измерением атмосферного давления и температуры. Для работы комплекса требуется постоянное напряжение – 5В. В качестве сравнения приведем акустический датчик уровня «Kalesto» (Германия), который имеет диапазон измерений 0,5...30,0 м, погрешность $\pm 0,01$ м и работает при постоянном напряжении 12В.

Данные измерений комплекса представляют собой текстовый файл, неудобный для чтения и последующего анализа. Была разработана специальная программа для ЭВМ, прошедшая Государственную регистрацию [18]. Программа может быть установлена на удаленном сервере, ее интерфейс приведен на рисунке 5.

Для конкретной точки привязки датчика на листе Excel формируется таблица, в которой для каждой даты/времени замеров (заданных

при программировании контроллера) выводятся результаты измерений расстояния от датчика до поверхности воды, температуры и атмосферного давления, а также результаты вычисления глубины потока. Предусмотрена статистическая обработка данных с выводом точечных и интервальных характеристик каждой

из величин. В указанном пользователем интервале времени автоматически строится график глубины, температуры и давления. При вводе критических значений глубины, характеризующих приближение к предельно минимальным или максимальным уровням, соответствующие измерения выделяются красным цветом.

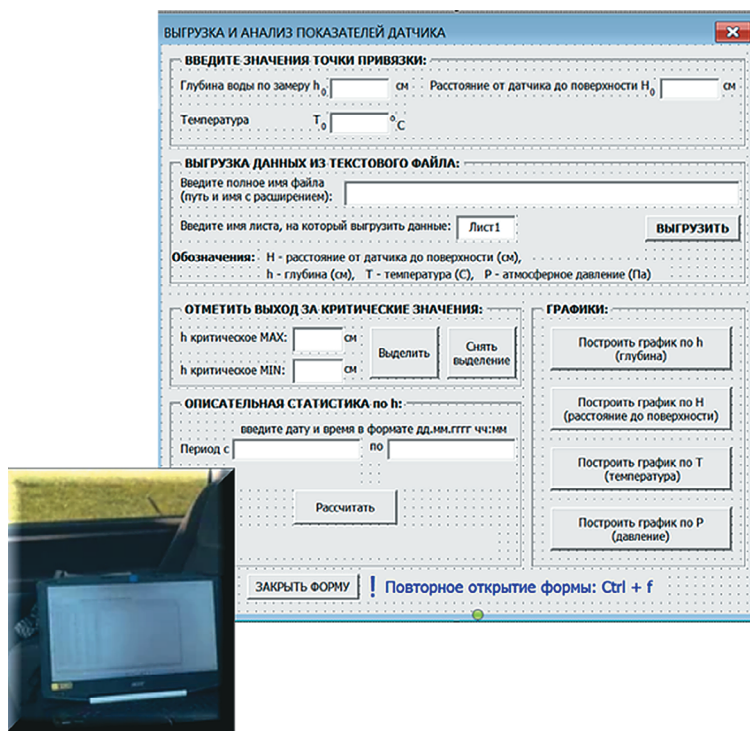


Рис. 5. Листинг измерений на компьютере при проведении эксперимента и диалоговое окно программы для анализа данных мониторинга

Fig. 5. Listing of measurements on the computer during the experiment and the dialog box of the program for analyzing monitoring data

Выводы

В результате исследований разработана принципиальная техническая схема измерительного комплекса и собран экспериментальный образец. Лабораторные и полевые испытания комплекса показали его надежность. Экспериментальный образец цифрового измерительного комплекса способен в автоматическом режиме производить ежеминутные измерения температуры атмосферного воздуха, атмосферного давления и расстояния до уровня свободной поверхности воды с записью в память устройства и/или передачей на удаленный сервер, где будет производиться дальнейшая обработка данных мониторинга.

Исследование профинансировано программой развития Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева «Агропрорыв-2030» в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»

Точность измерения атмосферного давления при температуре 25°C составляет $\pm 0,12$ гПа. Точность измерения температуры атмосферного воздуха $\pm 1^\circ\text{C}$; диапазон измерения лежит в пределах $-40...+85^\circ\text{C}$. При наличии волновых явлений и отсутствии успокоительного колодца основная абсолютная погрешность измерения уровня составляет 0,02 м. В испытаниях при высоте установки от 0,4 до 2,0 м над статичным уровнем воды основная абсолютная погрешность составляет 0,01 м.

Габаритные размеры комплекса составляют $0,2 \times 0,5 \times 0,5$ м; вес вместе с защитным корпусом – 2 кг. Для работы комплекса требуется постоянное напряжение в 5В, питание возможно от солнечной батареи и/или от аккумулятора.

Gratitude. The study was funded by the development program of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev «Agro breakthrough-2030» as part of the strategic academic leadership program «Priority-2030».

Библиографический список

1. Итоги реализации (2014-2017 годы) федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014-2020 годы»: Информационное издание. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. – 108 с.
2. ГОСТ Р 58376-2019. Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. Эксплуатация. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 42 с. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200163279>.
3. **Шепелев А.Е., Юченко Л.В.** Анализ средств водоизмерения на пунктах водоучета мелиоративных систем Минсельхоза России // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2019. – № 1 (73). – С. 43-46.
4. Методы измерения расхода воды на реках, каналах, в напорных трубопроводах насосных станций оросительных систем: Обзор. Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия Центральной Азии. – Ташкент: Научно-информационный центр, 2014. – 84 с.
5. **Вайнберг М.В., Чураев А.А.** Основные требования, предъявляемые к средствам измерения параметров водного потока с учетом новых условий водопользования // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2017. – № 2 (66). – С. 249-253.
6. **Пахомов А.А.** Измерение расхода воды в открытых каналах с использованием штангового расходомера / А.А. Пахомов, С.В. Тронеv, К.М. Мелихов, Н.А. Колбанова // Мелиорация. – 2010. – № 1 (63). – С. 65-69.
7. **Greswell R.** The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry / P. Ellis, M. Cuthbert, R. White and V. Durand // *Journal of Hydrology*. – 2009. – № 373(3-4) pp. 416-425. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.05.001
8. **Чураев А.А., Шепелев А.Е., Юченко Л.В.** Оценка работоспособности испытываемого средства водоучета в диапазоне допустимой погрешности измерений // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – № 12(1). – С. 228-244.
9. **Корольков В.А.** Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А.А. Азбукин, А.Я. Богусевич, В.С. Ильичевский и др. // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 11. – С. 89-97.
10. **Хаханина Т.И.** Инверсионно-вольтамперометрический аналитический контроль наносодержаний ртути в системах городского водоснабжения / И.Н. Петухов, Н.Ю. Кузьмичев, О.В. Кольцова // Природообустройство. – 2013. – № 4. – С. 27-32.
11. **Made van der J.E.** Determination of the accuracy of water level observations // In Proceedings of the Exeter Symposium. IAHS Publications. – 1982. – № 134. – Pp. 172-184.
12. **Horner I., Renard B., Le Coz J.** Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty / F. Branger, H.K. Millan and G. Pierrefeu // *Water Resources Research*. – 2018. – № 54(3). – Pp. 1952-1976.
13. **Пугин М.А.** Уровнемер жидких сред с коррекцией температурной погрешности // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 3. – С. 12-17.
14. **Жмудь В.А.** Ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04 / Н.О. Кондратьев, К.А. Кузнецов и др. // Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 4 (22). – Pp. 18-26.

References

1. Itogi realizatsii (2014-2017 gody) federalnoj tselevoj programmy «Razvitie melioratsii zemel selskohozyajstvennogo naznacheniya Rossii na 2014-2020 gody»: inform. izdanie – M.: FGBNU «Rosinformagroteh», 2018. – 108 s.
2. GOST R58376-2019 Meliorativnye sistemy i gidrotehnicheskie sooruzheniya. Ekspluatatsiya. Obshchie trebovaniya. – M.: Standartinform, 2019. – 42 s. <https://docs.cntd.ru/document/1200163279>
3. **Shepelev A.E., Yuchenko L.V.** Analiz sredstv vodoizmereniya na punktakh vodoucheta meliorativnykh sistem Minselkhoza Rossii // Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya. – 2019. – 1(73): 43-46
4. Metody izmereniya raskhoda vody na rekah, kanalah, v napornykh truboprovodakh nasosnykh stantsij orositelnykh sistem. Obzor. Mezghosudarstvennaya koordinatsionnaya vodohozyajstvennaya komissiya Tsentralnoj Azii. – Tashkent: Nauchno-informatsionnyj tsentr, 2014. – 84 s.
5. **Vajnberg M.V., Churaev A.A.** Osnovnye trebovaniya, predyavlyayemye k sredstvam izmereniya parametrov vodnogo potoka s uchetom novykh uslovij vodopolzovaniya // Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya. – 2017. – № 2 (66). – S. 249-253.
6. **Pakhomov A.A.** Izmerenie raskhoda vody v otkrytykh kanalah s ispolzovaniem shtangovogo raskhodomera / Tronev S.V., Melikhov K.M., Kolobanova N.A. // *Melioratsiya*. – 2010. – № 1 (63). – S. 65-69.
7. **Greswell R., Ellis P., Cuthbert M., White R. and Durand V.** The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry. *Journal of Hydrology*. 2009;373(3-4) pp. 416-425. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.05.001
8. **Churaev A.A., Shepelev A.E., Yuchenko L.V.** Otsenka rabotosposobnosti ispytyvayemogo sredstva vodoucheta v diapazone dopustimoy pogreshnosti izmerenij // *Melioratsiya i gidrotehnika*. – 2022. – 12(1). – S. 228-244. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-228-244.
9. **Korolkov V.A.** Avtomatizirovannyj ultrazvukovoj meteorologicheskij kompleks AMK-03 / A.A. Azbukin A.Ya. Bogushevich, V.S. Iljichevskij i dr. // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 2006. – № 11. – S. 89-97.
10. **Hahanina T.I., Petukhov I.N., Kuzmichev N.Yu., Koljtsova O.V.** Inversionno-voltjamperometricheskij analiticheskij kontrol nanoso-soderzhanij rtuti v sistemah gorodskogo vodosnabzheniya // *Prirodoobustrojstvo*. – 2013. – № 4. – S. 27-32.
11. **Made van der J.E.** Determination of the accuracy of water level observations. In Proceedings of the Exeter Symposium. *IAHS Publications*. 1982; 134: 172-184.
12. **Horner I., Renard B., Le Coz J., Branger F., McMillan H.K. and Pierrefeu G.** Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resources Research*. 2018; 54(3): 1952-1976.
13. **Pugin M.A.** Urovnemer zhidkikh sred s korrektsiej temperaturnoj pogreshnosti // *Avtomatizatsiya, telemehanizatsiya i svyaz v neftyanoy promyshlennosti*. – 2011. – № 3. – S. 12-17.
14. **Zhmud V.A.** Ultrazvukovoj datchik izmereniya rasstoyaniya HC-SR04 / Kondratjev N.O., Kuznetsov K.A. i dr. // *Avtomatika i programmnaya inzheneriya*. 2017; 4(22): 18-26.
15. **Hsien P.P., Sung C.L.** A precision water-level and sediment-load monitoring system—an update. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. 2006; 18(3): 287-290. DOI: 10.1016/S1001-6058(06)60067-X
16. **Zhang Z., Zhou Y., Liu H. and Gao H.** In-situ water level measurement using NIR-imaging video camera. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019; 67: 95-106. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.04.004

15. Hsien P.P., Sung C.L. A precision water-level and sediment-load monitoring system-an update. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B.* 2006;18(3): 287-290. DOI: 10.1016/S1001-6058(06)60067-X

16. Zhang Z. In-situ water level measurement using NIR-imaging video camera / Y. Zhou, H. Liu and H. Gao // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2019. – № 67. – Pp. 95-106.

17. Bai G., Hou J., Zhang Y. An intelligent water level monitoring method based on SSD algorithm / B. Li, H. Han, T. Wang, R. Hinkelmann, D. Zhang and L. Guo // *Measurement*. – 2021. – № 185. DOI: 110047. 10.1016/j.measurement. 2021. 110047.

18. Обработка данных автоматического мониторинга уровня водных объектов и параметров атмосферы. Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681565. Заявка № 2022680800 от 3 ноября 2022 г., дата гос. регистрации 15 ноября 2022 г. / В.Л. Снежко, Д.М. Бенин, Н.В. Гавриловская, А.В. Подобный, М.В. Петухова.

Критерии авторства

Снежко В.Л., Бенин Д.М., Гавриловская Н.В., Петухова М.В., Подобный А.В. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 04.11.2022

Одобрена после рецензирования 10.11.2022

Принята к публикации 10.11.2022

17. Bai G., Hou J., Zhang Y., Li, B., Han H., Wang T., Hinkelmann R., Zhang D. and Guo L. An intelligent water level monitoring method based on SSD algorithm. *Measurement*. 2021; 185: DOI: 110047.10.1016/j.measurement. 2021. 110047.

18. Обработка данных автоматического мониторинга уровня водных объектов и параметров атмосферы. Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681565. Заявка № 2022680800 от 03 ноября 2022 г., дата гос. регистрации 15 ноября 2022 г. // Снежко В.Л., Бенин Д.М., Гавриловская Н.В., Подобный А.В., Петухова М.В.

Criteria of Authorship

Snezhko V.L., Benin D.M., Gavrilovskaya N.V., Petukhova M.V., Podobnyj A.V. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Snezhko V.L., Benin D.M., Gavrilovskaya N.V., Petukhova M.V., Podobnyj A.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 04.11.2022

Approved after reviewing 10.11.2022

Accepted for publication 10.11.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:556.52:631.432

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-15-21

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ РАСТЕНИЙ К РЕГУЛИРОВАНИЮ ВОДНОГО РЕЖИМА ПОЧВ И ЕГО КОНТРОЛЬ

ЯШИН ВАЛЕРИЙ МИХАЙЛОВИЧ[✉], канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
vniigimjashin@mail.ru

ГЛАЗУНОВА ИРИНА ВИКТОРОВНА[✉], канд. техн. наук, старший научный сотрудник
ivglazunova@mail.ru

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»; 127434, Москва, ул. Б. Академическая, 44, корп. 2, Россия

Цель исследований – анализ моделей требований растений к регулированию водного режима почв по осуществлению обоснования диапазона оптимальной влажности и ее контроля на основе автоматизации и цифровизации в соответствии с алгоритмом управления режимом влажности мелиорируемых почв. Представлено обоснование требований растений к регулированию водного режима почв и его контроля. Выполнен анализ моделей зависимостей продуктивности сельскохозяйственных культур от формирования водного режима почвы для обоснования мелиораций (орошения). Приведены четыре подхода при разработке моделей данной направленности, построены графики требований основных сельскохозяйственных культур к почвенным влагозапасам применительно к суглинистым почвам. Выполнены динамические расчеты требуемых влагозапасов в почве по фазам развития растений для зерновых культур, позволяющие более детально регулировать водный режим с учетом развития продукционных процессов. Точность расчетов по модели В.В. Шабанова подтверждена микробиологическими исследованиями. На основе проведенных полевых исследований и по данным, имеющимся в открытом доступе, для повышения точности контроля влажности почвы в пределах обоснованных оптимальных диапазонов выполнены сравнительные анализы датчиков влажности и даны рекомендации. Для осуществления точных мелиораций необходимо не только выполнять модельные расчеты диапазонов оптимальной влажности по фазам развития растений, но и контролировать значения влажности почвы с достаточной точностью измерений современным оборудованием, осуществлять контролируемые поливы с внедрением автоматизации и цифровизации.

Ключевые слова: требования растений, фазы развития растений, регулирование водного режима, биоклиматическая модель, точные мелиорации, датчики влажности, контролируемые поливы, автоматизация, цифровизация в мелиорации

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

© Яшин В.М., Глазунова И.В., 2022

Original article

SUBSTANTIATION OF PLANT REQUIREMENTS FOR THE REGULATION OF THE WATER REGIME OF SOILS AND ITS CONTROL

YASHIN VALERY MIKHAILOVICH[✉], candidate of technical sciences, leading researcher
vniigimjashin@mail.ru

GLAZUNOVA IRINA VIKTOROVNA[✉], candidate of technical sciences, senior researcher
ivglazunova@mail.ru

All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 44 B. Akademicheskaya Str., Building 2, Moscow, 127434, Russia

The purpose of the study is to analyze models of plant requirements for the regulation of the water regime of soils to substantiate the range of optimal humidity and its control based on automation

and digitalization in accordance with the algorithm for controlling the moisture regime of reclaimed soils. The substantiation of the requirements of plants to the regulation of the water regime of soils and its control is presented. The analysis of models of dependencies of agricultural productivity on the formation of the water regime of the soil to substantiate reclamation (irrigation) is carried out. Four approaches to the development of models of this orientation are given, graphs of the requirements of the main crops to soil moisture reserves are built, in relation to loamy soils. Dynamic calculations of the required moisture reserves in the soil according to the phases of plant development for grain crops are carried out, allowing regulating the water regime in more detail, taking into account the development of production processes. The accuracy of calculations according to the model of Shabanov V.V. is confirmed by microbiological studies. Based on the conducted field studies and according to the data available in the public domain, comparative analyses of moisture sensors were performed and recommendations were made to improve the accuracy of soil moisture control within reasonable optimal ranges. To carry out accurate reclamation, it is necessary not only to perform model calculations of the optimal humidity ranges for the phases of plant development, but also to control the soil moisture values with sufficient measurement accuracy with modern equipment, to carry out controlled watering with the introduction of automation and digitalization.

Keywords: requirements of plants, phases of plants development, regulation of water regime, bioclimatic model, precision reclamation, humidity sensors, controlled irrigation, automation, digitalization in reclamation

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

Введение. Важнейшей задачей управления мелиоративным состоянием агроэкосистемы является регулирование режима влажности почвы в определенном интервале значений, который обеспечивает требуемый (плановый) уровень продуктивности сельскохозяйственных растений. При этом необходимым звеном решения задачи является обоснование диапазона оптимальной влажности на основе цифровизации

и компьютерного моделирования, а также обеспечение контроля режима влажности мелиорируемых почв.

Материалы и методы исследований. При обосновании требований растений к регулированию водного режима был выполнен анализ моделей зависимостей продуктивности сельскохозяйственных культур от формирования водного режима почвы и представлена их классификация (рис. 1).



Рис. 1. Классификация моделей оценки урожайности в зависимости от влажности почвы

Fig. 1. Classification of yield estimation models according to soil moisture

Выполнен анализ моделей зависимостей продуктивности сельскохозяйственных культур от формирования водного режима почвы для обоснования мелиораций (орошения). Приведены четыре подхода при разработке моделей данной направленности:

Синоптико-статистические модели, применяемые в основном для прогноза валового сбора сельскохозяйственных культур при существующих климатических условиях для формирования выводов о необходимости орошения в данной местности. Преимуществом подхода является его простота. Недостатки подхода: большое число параметров; неоднозначность и ресурсоемкость; низкая адаптивность, линейность; справедливость для локальной местности в ограниченных условиях, для которых они получены [1, 2].

Динамико-статистические модели основаны на использовании сложившихся агрометеорологических условий, фактическом состоянии. Позволяют прогнозировать ожидаемую урожайность в период вегетации растений с заблаговременностью от 1 до 2-4 мес. и делать выводы о необходимости полива. Преимущества таких моделей заключаются в заблаговременном прогнозе и учете влияния метеорологических факторов. Недостатком является необходимость обновления моделей при изменении статистической отчетности.

Динамические модели учитывают биологические особенности сельскохозяйственной культуры, почвенно-климатические условия субъекта и адаптированы к сокращенному объему входной оперативной информации [3-6]. Модель SWAP в данном контексте используется для расчета водного стресса. Полив можно назначить, зная время наступления влажности водного стресса. Модель не дает возможности определить диапазон оптимальной влажности и показатели урожайности.

Модель MIKESHE является программным модульным комплексом для имитации движения поверхностных, подземных вод и загрязняющих веществ в пористых средах. В зависимости от эвапотранспирации происходит расчет влажности почвы в зоне аэрации. Учитываются тип почв и вид растительности, а также серии осадков и поливов. Зависимость урожайности от влажности почвы можно получить опосредованно. Назначение поливов задается в исходном блоке модели, и на выходе получается распределение влажности. Задавая различные варианты поливов, можно выбрать вариант с плановой урожайностью [4].

Модель Potato [6] предназначена для моделирования процесса роста и развития раннего

картофеля с учетом почвенно-климатических условий, полива и агротехники. На основе данных, получаемых в режиме реального времени, дается прогноз по формированию урожайности клубней, необходимости корректировки периодов и объемов полива, позволяющий сократить сроки принятия управленческих решений, регулирующих водный и питательный режимы.

Биоклиматическая модель В.В. Шабанова выполняет обоснование вероятности необходимости мелиораций по водным условиям при сравнении требований растений с факторами внешней среды. Рассчитываются зависимости урожайности от почвенных влагозапасов либо по средним характеристикам за вегетацию, либо по фазам развития растений. Определяется диапазон оптимальной влажности для получения плановой урожайности. Строится характеристика распределения почвенных влагозапасов на местности. Определяется степень соответствия почвенных влагозапасов местности требованиям выращиваемых растений. Дается оценка необходимости регулирования условий внешней среды (поливы) по фазам развития растений.

На основе сравнения преимуществ и недостатков моделей для компьютерных расчетов была выбрана модель В.В. Шабанова.

Зависимости урожайности от влажности почвы построили по модели В.В. Шабанова в прямом виде, задаваясь параметрами растений и почв в соответствующих блоках модели. Получили куполообразные зависимости урожайности от влагозапасов – средние как за вегетацию, так и по фазам развития культур. Вероятность необходимости поливов обоснована сравнением требований растений с влагозапасами почвы.

Исходными данными для модели являются: влагозапасы почвы по декадам вегетации; урожайность сельскохозяйственных культур; распределение вероятностей урожайности 10-, 25-, 50-, 75-, 90%-ной обеспеченности по фазам развития растений [5-8].

С использованием модели были выполнены расчеты для получения зависимости продуктивности различных сельскохозяйственных культур от почвенных влагозапасов в слое 50 см. Также выполнены динамические расчеты требуемых влагозапасов в почве по фазам развития растений для зерновых культур, позволяющие более детально регулировать водный режим с учетом развития продукционных процессов.

У зерновых принято отмечать следующие фазы развития (фенофазы), связанные с образованием отдельных органов или частей

растения (листьев, стеблей, соцветий, плодов): всходы, в том числе фаза третьего листа; кущение; выход в трубку; колошение, или выметывание; цветение; созревание (молочная, восковая и полная спелость).

При регулярном осушении в Нечерноземной зоне влажность почвы необходимо поддерживать в активном слое на торфяниках и легких почво-грунтах в пределах 70-85% НВ, а на среднесуглинистых и тяжелосуглинистых почвах уровень влажности почвы, возможно, увеличивать до 75-90% НВ. На осушаемых землях регулирование влажности осуществляет дренаж, обеспечивающий допустимые глубины стояния уровня почвенно-грунтовых вод.

Точность расчетов по модели В.В. Шабанова подтверждена микробиологическими исследованиями [5]. При этом диапазон оптимальной для растений влажности почвы в нашем случае практически совпадает с диапазоном влажности почвы, который наиболее благоприятен для почвообразовательных процессов (рис. 2).

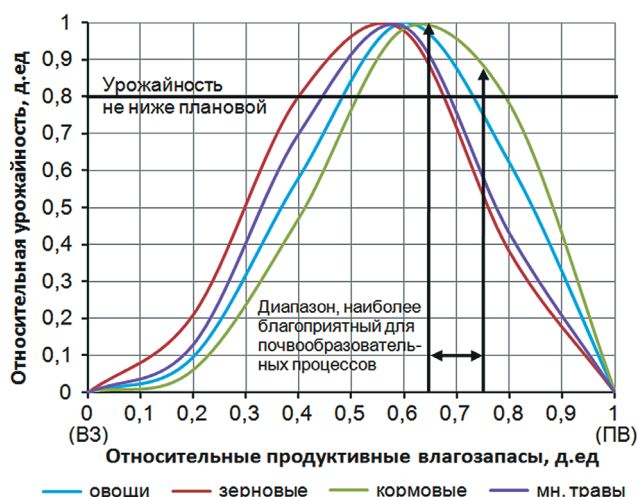


Рис. 2. Оптимальные диапазоны влажности почвы, благоприятные для продуктивности сельскохозяйственных растений

Fig. 2. Optimal ranges of soil moisture favorable for the productivity of agricultural plants and for soil-forming processes

На основе проведенных полевых исследований и по данным результатов полевых испытаний, имеющихся в открытом доступе, для повышения точности контроля влажности почвы в пределах обоснованных оптимальных диапазонов используются датчики влажности и тензиометры различных конструкций: WET-2 Delta-T Devices Ltd; SM150T Delta-T Devices Ltd; GAS-302 Green Helper; DAVIS6440 SOIL MOISTURE SENSOR (входит в комплект автоматизированной метеостанции DAVIS6345CSOV);

влагомер — термометр почвы TR46908 (щуп). Для получения информации о влажности по глубине почвенного профиля используются датчики: Profile Probe PR2 в комплекте с влагомером HH2; TRIME-PICO 64, TRIME-PICO 32 и TRIME-PICO ITH T3/44 с влагомером HD2, а также комплекты тензиометров.

В зависимости от увлажненности климата, который в Нечерноземной зоне меняется от влажного до умеренно влажного в Мещерской низине и менее влажного в Приокской провинции (а на юге и юго-востоке района, при переходе к лесостепной зоне, наблюдается неустойчивость увлажнения по годам и внутри теплого периода), для регулирования влажности необходимо дополнительное увлажнение с использованием оросительной составляющей системы. Поэтому для осуществления точных мелиораций необходимо не только выполнять модельные расчеты диапазонов оптимальной влажности и контролировать значения влажности почвы с достаточной точностью измерений современным оборудованием, но и осуществлять контролируемые поливы с внедрением автоматизации и цифровизации.

По результатам полевых испытаний и на основе анализа данных других исследователей был выполнен анализ контроллеров и других устройств управления поливами: контроллеры полива Green Helper, модификации которых различаются количеством обслуживаемых зон и конструктивными особенностями (GA 350-11, GA-021, GA-349-8, GA 322N), контроллер HUNTER ELC C01-E на 6 зон, пульт управления поливом RPS1224 на 12 зон и др.).

В современных условиях для проведения точной мелиорации рекомендуются контроллеры полива и измерители влажности, в которых сигналы от сенсоров влажности передаются в автоматизированную систему по каналам сотовой связи и с использованием облачных технологий. При наличии больших массивов данных по распределенным объектам используются беспроводные системы удаленного ввода/вывода с применением логистических контроллеров ioLogic.

Важным мероприятием при оборудовании мелиорируемого участка индикаторами влажности (датчики влажности, скважины для контроля УГВ) является их репрезентативная расстановка, обеспечивающая достоверные данные по влажности поля (табл). Размещение датчиков влажности на орошаемых участках осуществляется в зависимости от способа и техники регулирования водного режима и биологических особенностей культуры.

На осушительных и осушительно-увлажнительных системах наблюдательные скважины размещаются на расстоянии от дрены, составляющем 1/3 междренья. На осушительно-оросительных и оросительных системах размещение сенсоров влажности (датчики влажности, тензиометры) осуществляется с учетом

способов и техники полива, которые определяют закономерности распределения оросительной воды по площади поля. Точки установки датчиков выбираются с учетом удобства организации наблюдений и неоднородности почв на участке. Наличие почвенных разностей следует учитывать увеличением точек мониторинга.

Таблица

**Обоснование локации установки индикаторов влажности
в пределах мелиорируемого участка**

Table

Justification of the location of the installation of humidity indicators within the reclaimed area

№ п/п	Способы регулируемости влажности почвы <i>Ways to regulate soil moisture</i>	Технология <i>Technology</i>	Локация индикаторов влажности <i>Location of humidity indicators</i>
1	Осушение – увлажнение <i>Dehumidification – moisturizing</i>	Осушительно-увлажнительные системы <i>Dehumidification-moisturizing systems</i>	Скважины размещаются от линии дрены на расстоянии 1/4-1/3 междренья <i>Wells are placed from the drain line at a distance of 1 / 4-1 / 3 of the interdrains</i>
2	Осушение – орошение <i>Dehumidification – moisturizing</i>	Осушительно-оросительные системы: <i>Dehumidification-moisturizing systems:</i>	
		- ДМ фронтального действия <i>- DM of frontal action</i>	Минимум по две точки по фронту, расположенные в двух створах, равномерно по полю <i>At least two points along the front, located in two gates, evenly across the field</i>
		- ДМ кругового действия <i>- DM of circular action</i>	По два пункта установки датчиков, по радиусам (4 пункта по диаметру) с размещением на расстоянии 1/3 и 3/4 радиуса поливного круга <i>Two points of installation of sensors, according to the radii (4 points in diameter) with placement at a distance of 1 / 3 and 3 / 4 of the radius of the irrigation wheel</i>
		- шланго-барабанные ДМ <i>- hose-drum DM</i>	На карте 3-4 пункта на половине расстояния от линии водовода <i>On the map there are 3-4 points at half the distance from the line of the conduit</i>
3	Орошение <i>Irrigation</i>	- стационарное размещение дождевателей <i>- stationary placement of sprinklers</i>	Равномерное размещение 3-4 пунктов на участке <i>Uniform placement of 3-4 points on the site</i>
		- капельный полив <i>- drip irrigation</i>	Размещение вдоль капельной линии <i>Placement along the drip line</i>

Расстановка датчиков по глубине почвенного горизонта на орошаемом поле определяется глубиной зоны увлажнения, которая рассчитывается в зависимости от биологических особенностей развития корневой системы растений.

Одной из задач автоматизированного управления гидромелиоративными системами является обеспечение автоматизированного контроля влажности мелиорируемых почв, собственно обеспечение регулирования режимов осушения и орошения в нормативных пределах влажности почвы, так как водный режим является основным фактором, лимитирующим продукционные процессы и формирующим

определенный мелиоративный режим и мелиоративное состояние земель.

Автоматизированные системы помогают пользователю контролировать расход воды. На основании мониторинга и анализа данных водопользователь получает рекомендации о нормах и сроках полива, согласованные с биологическими потребностями выращиваемых культур. Поддержание диапазона оптимальной влажности почвы на основе обозначенных подходов и использования автоматизированных систем управления орошением реализуется в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3 [5-10].

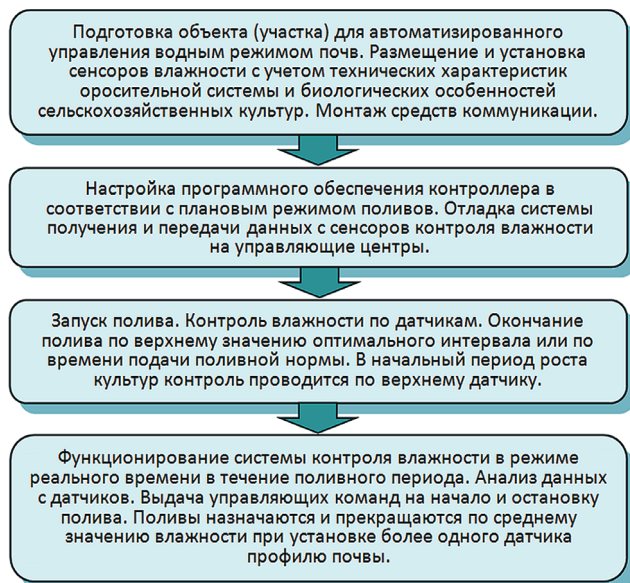


Рис. 3. Алгоритм модельного расчета и автоматизированного контроля при управлении режимом влажности для точных мелиораций

Fig. 3. Algorithm of model calculation and automated control in moisture management for precision reclamation

Выводы

По результатам проведенных исследований выполнен анализ существующих моделей обоснования оптимальной влажности почвы для сельскохозяйственных растений по эффективности, надежности, набору исходных данных для компьютерных расчетов, по фазам развития сельскохозяйственных растений в соответствии с годами разной обеспеченности по влажности. Рекомендована модель В.В. Шабанова.

Результаты выполненных исследований могут быть основой для преобразования формы управления влажностью почвы от традиционного к цифровизированному точному управлению с современным инструментальным

контролем и являются источником материала, помогающего сформулировать стратегию устойчивого развития мелиорированных земель.

Выполнен анализ моделей зависимости продуктивности сельскохозяйственных культур от формирования водного режима почвы для обоснования мелиораций. Приведены четыре подхода при разработке моделей данной направленности.

Выполнены динамические расчеты требуемых влагозапасов в почве по фазам развития растений для зерновых культур, позволяющие более детально регулировать водный режим с учетом развития продукционных процессов. Точность расчетов по модели В.В. Шабанова подтверждена результатами микробиологических исследований. При этом диапазон оптимальной для растений влажности почвы в нашем случае практически совпал с диапазоном влажности почвы, который является наиболее благоприятным для почвообразовательных процессов.

Для осуществления точных мелиораций необходимо не только выполнять модельные расчеты диапазонов оптимальной влажности, но и контролировать значения влажности почвы с достаточной точностью измерений современным оборудованием, а также осуществлять контролируемые поливы с внедрением средств автоматизации и цифровизации.

Использование методики и подходов к осуществлению обоснования диапазона оптимальной влажности и ее контроля на основе автоматизации и цифровизации в соответствии с алгоритмом управления режимом влажности мелиорируемых почв позволит товаропроизводителю увеличить производительность на 30-40% и повысить экономию водных ресурсов в среднем на 20-30%, а также более обоснованно управлять эффективным плодородием почв и мелиоративным состоянием агроэкосистем.

Библиографический список

1. Русакова Т.И. Современная технология поэтапного прогнозирования урожайности и валового сбора зерновых культур / Т.И. Русакова, В.М. Лебедева, И.Г. Грингоф, Н.М. Шкляева // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 7. – С. 101-108.
2. Лебедева В.М. Долгосрочный синоптико-статистический метод прогноза валового сбора зерновых культур по федеральным округам и России в целом // Труды ГУ «ВНИИСХМ». – 2010. – Вып. 37. – С. 69-81.
3. Клещенко А.Д., Найдина Т.А. Динамическая модель продукционного процесса кукурузы с использованием спутниковой информации и методы прогноза урожайности // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 12. – С. 88-98.

References

1. Rusakov T.I. Sovremennaya texnologiya po etapno-g prognozirovaniya urozhajnosti i valovogo sbora zernovykh kultur / Lebedeva V.M., Gringof I.G., Shklyayeva N.M. // Meteorologiya i gidrologiya. – 2006. – № 7. S. 101-108.
2. Lebedeva V.M. Dolgosrochnyj sinoptiko-statisticheskij metod prognoza valovogo sbora zernovykh kultur po federalnym okrugam i Rossii v tselom // Trudy GU «VNIISHM». – 2010. – Vyp. 37. – S. 69-81.
3. Kleshchenko A.D., Najdina T.A. Dinamicheskaya model produktsionnogo protsessa kukuruzy s ispolzovaniem sputnikovoj informatsii i metody prognoza urozhajnosti // Meteorologiya i gidrologiya. – 2012. – № 12. – S. 88-98.
4. Shabanov V.V. Bioklimaticheskoe obosnovanie melioratsij. – L.: Gidrometeoizdat, 1973. – 166 s. EDN: TZRBED5

4. **Шабанов В.В.** Биоклиматическое обоснование мелиораций. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 166 с. EDN: TZRBD5.

5. **Павлов В.Ю.** Параметры оптимальных условий жизнедеятельности почвенных микроорганизмов в агроценозе // Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства: Сборник статей VII Международной научно-практической конференции; Под науч. ред. Н.П. Ларюшина, О.Н. Кухарева. – Пенза: ПГСХА, 2022. – С. 87-89.

6. **Бубер А.А., Добрачев Ю.П., Бородычев В.В., Меншикова С.А.** Имитационная модель формирования урожая картофеля «Potato»: Свид-во о регистрации программы для ЭВМ 2021612970. 26.02.2021. Заяв. № 2021612016 от 18.02.2021.

7. Научные основы создания и управления мелиоративными системами в России / Л.В. Кирейчева, И.Ф. Юрченко, В.М. Яшин и др. – М.: ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2017. – 296 с. EDN ZDXXYB.

8. **Маркин В.Н., Глазунова И.В.** Вопросы районирования территории по необходимости орошения // Природообустройство. – 2022. – № 3. – С. 35-40. – DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-35-40. – EDN KXIETB.

9. **Glazunova I.V., Karpenko N.P.** Analysis of the reclamation measures efficiency within watershed and their impact on the water bodies // Collection: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 9th International Symposium «Steppes of Northern Eurasia». – 2021. – P. 012035.

10. **Барсукова М.В., Король Т.С., Ларутина Н.В.** Экологическая безопасность сельского хозяйства и сельскохозяйственной продукции – реальные шаги // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2020. – № 8. – С. 7-10.

Критерии авторства

Яшин В.М., Глазунова И.В. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 12.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

5. **Pavlov V.Yu.** Parametry` optimalnyh uslovij zhiznedejatelnosti pochvennyh mikroorganizmov v agrotsenoze. / Sbornik: Resursosberegayushchie tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. / Sbornik statej VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakt. konf. Pod nauchnoj redaksiej N.P. Laryushina, O.N. Kukhareva. – Penza: PGSXA, 2022. – S. 87-89.

6. **Buber A.A., Dobrachev Yu.P., Borodychev V.V., Menshikova S.A.** «Imitatsionnaya model formirovaniya urozhaya kartofelya «Rotato» Svidetelstvo o registratsii programmy dlya EVM 2021612970, 26.02.2021. Zayavka № 2021612016 ot 18.02.2021.

7. Nauchnye osnovy sozdaniya i upravleniya meliorativnymi sistemami v Rossii / L.V. Kirejcheva, I.F. Yurchenko, V.M. Yashin[idr.]. – М.: VNIИagrohimiimeni D.N. Pryanishnikova, 2017. – 296 s. ISBN978-5-9238-0235-1. – EDN ZDXXYB.

8. **Markin V.N., Glazunova I.V.** Voprosy rajonirovaniya territorii po neobходимosti orosheniya // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 3. – С. 35-40. – DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-35-40. – EDN KXIETB.

9. **Glazunova I.V., Karpenko N.P.** Analysis of the reclamation measures efficiency within watershed and their impact on the water bodies / Collection: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 9. Cep. “9th International Symposium “Steppes of Northern Eurasia”” 2021. C. 012035.

10. **Barsukova M.V., Korol T.S., Lagutina N.V.** Ekologicheskaya bezopasnost' selskogo hozyajstva i sel'skohozyajstvennoj produktsii – realnye shagi // Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2020. – № 8. – С. 7-10.

Criteria of Authorship

Yashin V.M., Glazunova I.V. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Yashin V.M., Glazunova I.V. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 12.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504: 631.6

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-22-27

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДВУХЪЯРУСНАЯ ОСУШИТЕЛЬНО-УВЛАЖНИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

СМЕТАНИН ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ[✉], д-р техн. наук, профессор

smetanin2000@yandex.ru

БЕДРЕТДИНОВ ГАЯР ХАМЗЯНОВИЧ[✉], канд. техн. наук, доцент

gayar@vniigim.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, корп. 2, Россия

Цель исследований – сокращение периода между сходом снега и готовностью почвы к обработке на слабосклоновых землях с характерным сезонным промерзанием и формированием ранней весной временных водоносных горизонтов в виде верховодки, а также обеспечение требуемого водно-воздушного режима почвы в различные сроки возделывания сельскохозяйственных культур. Объект исследований – горизонтальные закрытые дренажные системы. Предлагается многофункциональная двухъярусная осушительно-увлажнительная система, дрены которой подключены к закрытым коллекторам соответственно нижнего и верхнего ярусов. В устьевой зоне коллектор верхнего яруса соединен с коллектором нижнего яруса, и выше точки их соединения в коллекторе нижнего яруса установлен гидравлический клапан. Работа системы в осушительном режиме происходит в два этапа. На первом этапе работает верхний ярус, обеспечивая отвод излишков воды из оттаявшего верхнего почвенного слоя ранней весной. На втором этапе, после полного сезонного оттаивания, помимо дрен первого яруса, в работу включаются дрены нижнего яруса. Совместная работа в осушительном режиме верхнего и нижнего ярусов обеспечивает требуемую влажность верхнего почвенного слоя и поддержание уровня грунтовых вод на отметке, соответствующей норме осушения. В засушливый период вода из канала, поступая в устье системы коллекторов, с помощью гидравлического клапана перекрывает коллектор нижнего яруса и продолжает наполнение системы верхнего яруса, осуществляя подачу воды в корнеобитаемый слой почвы.

Ключевые слова: мелиоративные приемы, агротехника, плодородие почв, урожайность, сроки посева, зимнее промерзание почв, сценарии весеннего оттаивания почв, двухъярусная осушительно-увлажнительная система нового поколения

Формат цитирования: Сметанин В.И., Бедретдинов Г.Х. Многофункциональная двухъярусная осушительно-увлажнительная система // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 22-27. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-22-27.

© Сметанин В.И., Бедретдинов Г.Х., 2022

Original article

MULTIFUNCTIONAL TWO-TIER DRAINAGE AND HUMIDIFICATION SYSTEM

SMETANIN VLADIMIR IVANOVICH[✉], Dr. Techn. Ph.D., Professor

smetanin2000@yandex.ru

BEDRETDINOV GAYAR HAMZYANOVICH[✉], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

gayar@vniigim.ru

All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov; 127550, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya str., 44, corp. 2, Russia

The purpose of the research is to reduce the period between the snow melt and the readiness of the soil for cultivation on weakly sloped lands with characteristic seasonal freezing and the formation of temporary aquifers in the form of perched water in early spring, as well as to ensure the required water-air regime of the soil at different time of crops cultivation. The object of the study is horizontal

closed drainage systems. A multifunctional two-tier drainage and humidification system is proposed, the drains of which are connected to closed collectors of the lower and upper tiers, respectively. In the mouth zone, the collector of the upper tier is connected to the collector of the lower tier and a hydraulic valve is installed above the point of their connection in the collector of the lower tier. The operation of the system in the drainage mode occurs in two stages. At the first stage, the upper tier works, ensuring the removal of excess water from the thawed topsoil layer in early spring. At the second stage, after complete seasonal thawing, in addition to the drains of the first tier, the drains of the lower tier are included in the work. Joint work in the drainage mode of the upper and lower tiers ensures the required humidity of the topsoil layer and maintains the groundwater level at a level corresponding to the drainage rate. In the dry period, water from the canal, entering the mouth of the collector system, with the help of a hydraulic valve, blocks the collector of the lower tier and continues to fill the upper tier system, supplying water to the root layer of the soil.

Keywords: reclamation techniques, agricultural technology, soil fertility, yield, sowing time, winter soil freezing, scenarios of spring thawing of soils, two-tier drainage and humidification system of a new generation

Format of citation: Smetanin V.I., Bedretdinov G.H. Multifunctional two-tier drainage and humidification system // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 5. – P. 22-27. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-22-27.

Введение. Получение стабильных урожаев в сельскохозяйственном производстве непосредственно связано с одновременным улучшением питательного, водного и воздушного режимов почв, а также с проведением работ в оптимальные агротехнические сроки. Посев культур в оптимальные сроки обеспечивает получение высокого урожая и отдачу средств, вкладываемых в повышение плодородия земель [1, 2].

Одним из основных показателей готовности к предпосевной обработке является влажность почвы, оптимальные значения которой определяют требуемую несущую способность для качественной обработки и получение необходимого фракционного состава почвенных агрегатов для посева сельскохозяйственных культур. Состояние и влажность почвенного слоя в весенний предпосевной период существенно зависят от гидрогеологических условий, наличия снежного покрова и глубины сезонного промерзания. Глубина промерзания почвы зависит от толщины снежного покрова и наступления устойчивых отрицательных температур. При длительном их воздействии мощность промерзшего слоя нарастает, достигая наибольшей величины в конце января – в феврале. В феврале или с начала марта, когда снеговой покров еще продолжает оставаться весьма мощным или даже нарастает, глубина промерзания начинает уменьшаться вследствие оттаивания почвы [3-5].

По Н.А. Качинскому оттаивание может идти следующими путями.

1. Оттаивание, идущее снизу, заканчивается до того, как сойдет снег. Мерзлая прослойка исчезнет у самой поверхности почвы. Этот

случай имеет место при мощном снеговом покрове и неглубоком промерзании почвы.

2. Снеговой покров сходит до того, как полностью оттает почва. Оттаивание почвы начинается также снизу, а затем идет одновременно сверху и снизу, и мерзлая прослойка в конце исчезает на той или иной глубине.

3. Для районов, где среднегодовая температура почвы близка к 0 °С и ниже, характерен третий вариант оттаивания почвы – только сверху, поскольку здесь в глубоких слоях почвы отсутствует запас тепла, который мог бы вызвать оттаивание почвы снизу.

Известно, что независимо от сценария оттаивания мерзлого слоя на длительность периода высыхания почвы до готовности к обработке влияют погодные условия, физическое состояние и уплотненность почвенного слоя и подпочвенного горизонта, размеры весеннего увлажнения и другие факторы. Наличие неоттаявшего мерзлого слоя и переуплотненного подпочвенного горизонта препятствует отводу влаги. В результате почвенный слой дольше остается во влажном состоянии. Переувлажненная почва плохо разрыхляется, налипает на рабочие поверхности обрабатывающих машин и орудий. При движении по ней техники верхний слой деформируется, образуются глубокие колеи, снижаются проходимость, тяговые усилия и производительность машин. Повышенная влажность почвы вынуждает сдвигать сроки посевных работ в сторону увеличения. При этом нарушается вегетация растений и снижается урожайность сельскохозяйственных культур даже на мелиорированных дренажными системами полях [6, 7].

Целью исследований являлась разработка мелиоративных приемов сокращения периода между сходом снега и готовностью почвы к обработке на слабосклоновых землях с характерным сезонным промерзанием и тяжелыми подстилающими грунтами, способными формировать ранней весной временные водоносные горизонты в виде верховодки.

Материалы и методы исследований.

В задачу исследований входило аналитическое обоснование двухъярусной осушительно-увлажнительной системы, способной ранней весной отводить талые воды из оттаивавших верхних горизонтов почвы, не дожидаясь оттаивания всего мерзлого горизонта, а в засушливый период увлажнять корнеобитаемый слой почвы.

Объектом исследований стали закрытые дренажные системы.

По принципу регулирования водного режима почвы осушительные системы выполняются в виде осушительной или осушительно-увлажнительной сетей. Осушительная сеть обеспечивает только отвод избыточных вод, а осушительно-увлажнительная сеть – отвод воды и подачу ее в почву [8-10]. Однако

перечисленные дренажные системы по ряду причин не обеспечивают повышения интенсивности подсыхания почвы в весенний период. Одна из причин заключается в том, что они выполняются в одноярусном исполнении и не учитывают процесс оттаивания почвы.

Результаты и их обсуждение. Для исключения существующих недостатков предлагается применять двухъярусные осушительно-увлажнительные системы (рис. 1).

Двухъярусная осушительно-увлажнительная система включает в себя дрены-осушители нижнего яруса дрены-осушители-увлажнители верхнего. Дрены подключены к закрытым коллекторам соответственно нижнего и верхнего ярусов. Устьевые участки коллекторов соединены между собой, с открытым каналом и водоприемником. Конструктивно дрены-осушители в плане нижнего яруса выполнены прямолинейными, а дрены-осушители-увлажнители верхнего яруса – криволинейными, с постоянным радиусом кривизны ветвей. Кривизна ветвей дрен осушителей-увлажнителей назначается равной половине междренного расстояния дрен нижнего яруса.

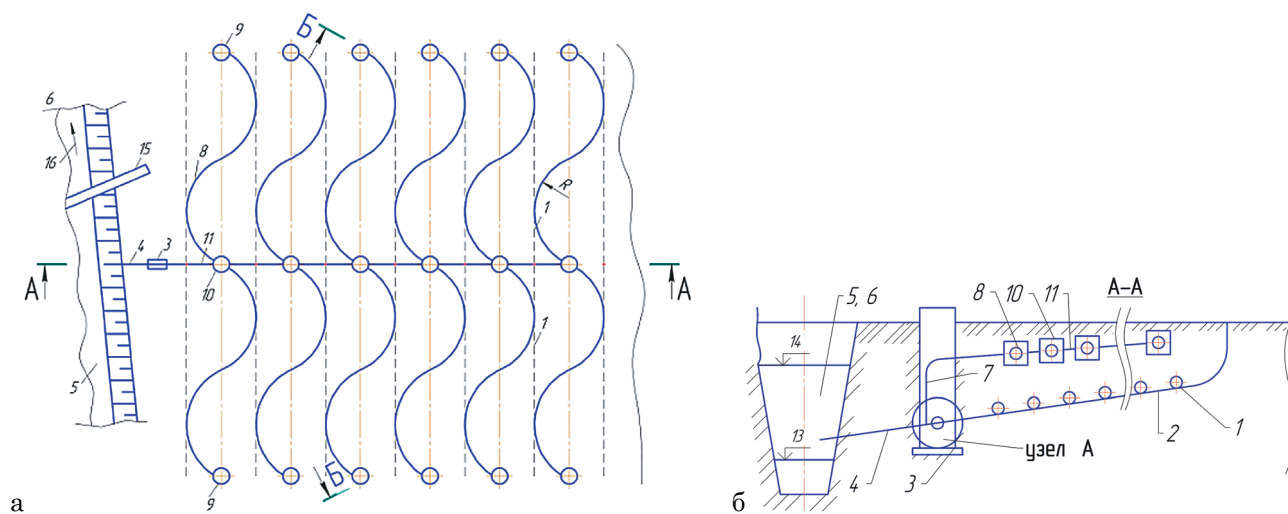


Рис. 1. Двухъярусная осушительно-увлажнительная система:

а – план; б – разрез А-А; 1 – дрены-осушители нижнего яруса; 2 – дренажный коллектор нижнего яруса; 3 – эксплуатационный колодец; 4 – устьевая труба; 5, 6 – соответственно магистральный канал или водоприемник; 7 – устьевая часть коллектора верхнего яруса;

8 – криволинейные дрены-осушители-увлажнители верхнего яруса; 9 – истоковые колодцы; 10 – проводящие колодцы; 11 – коллектор верхнего яруса; 13, 14 – соответственно уровни воды в канале, обеспечивающие работу системы в режиме осушения или увлажнения; узел А

Fig.1 Two-tier drainage and humidification system:

a – plan; b – section A-A; 1 – drains-dehumidifiers of the lower tier; 2 – drainage collector of the lower tier;

3 – operational well; 4 – mouth tube; 5, 6 – respectively, the main channel or water intake;

7 – the mouth of the collector of the upper tier; 8 – curvilinear drains of dehumidifiers-humidifiers of the upper tier;

9 – starting wells; 10 – conductive wells; 11 – collector of the upper tier; 13, 14 – respectively, water levels in the channel, ensuring the operation of the system in the mode of dehumidification or – humidification; unit A

Дрены-осушители-увлажнители верхнего яруса снабжены истоковыми колодцами и соединены в устьях с закрытым коллектором

верхнего яруса через проводящие колодцы (рис. 2). Устье закрытого коллектора нижнего яруса перед соединением с устьевой

частью верхнего коллектора снабжено гидравлическим клапаном (рис. 3).

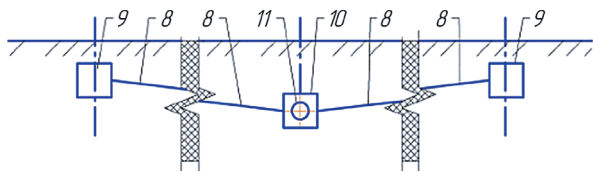


Рис. 2. Разрез Б-Б
по дренажно-увлажнительной системе
верхнего яруса:

- 8 – криволинейные дрены-осушители-увлажнители
верхнего яруса; 9 – истоковые колодцы;
10 – проводящие колодцы;
11 – коллектор верхнего яруса

Fig. 2. Section B-B on the drainage
and humidification system of the upper tier:

- 8 – curvilinear drains of dehumidifiers-humidifiers
of the upper tier; 9 – source wells;
10 – conductive wells; 11 – upper tier collector

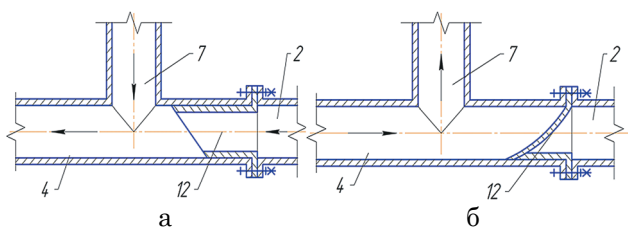


Рис. 3. Гидравлический клапан (узел А):

- а – режим осушения; б – режим увлажнения;
2 – дренажный коллектор нижнего яруса;
4 – устьевая труба коллектора нижнего яруса;
7 – устьевая часть коллектора верхнего яруса;
12 – гидравлический клапан (стрелкой указаны
направления движения дренажных вод
при осушении и увлажнении)

Fig. 3. Hydraulic valve (unit A):

- а – dehumidification mode; б – humidification mode;
2 – drainage collector of the lower tier; 4 – mouth
pipe of the collector of the lower tier; 7 – mouth part
of the collector of the upper tier; 12 – hydraulic valve;
the arrow shows the direction of movement of drainage
water during drainage and humidification

Работа системы в осушительном режиме происходит в два этапа. На первом этапе работает верхний ярус, обеспечивая отвод излишков воды из оттаявшего верхнего почвенного слоя ранней весной. На втором этапе, после полного сезонного оттаивания, в работу включаются дрены нижнего яруса. Совместная работа в осушительном режиме верхнего и нижнего ярусов обеспечивает требуемую влажность верхнего почвенного слоя и поддержание уровня грунтовых вод на отметке, соответствующей проектной норме осушения.

В засушливый период увлажнение корнеобитаемого слоя почвы осуществляется за счет подачи воды в дрены-увлажнители и истоковые

колодцы системы верхнего яруса. Вода подается из канала после заполнения его из водоисточника до соответствующей отметки. После заполнения канала вода под действием напора поступает в устьевую трубу, срабатывает гидравлический клапан, автоматически отключая поступление оросительной воды в осушительную сеть нижнего яруса.

Выполнение осушителей-увлажнителей верхнего яруса криволинейными с рекомендуемым радиусом кривизны в сочетании с наличием гидравлического клапана, истоковых и проводящих колодцев увеличивает суммарную захватывающую способность при осушении и ускоряет подачу воды в корнеобитаемый слой почвы при увлажнении по сравнению с прямолинейными (рис. 1а). Это позволит более интенсивно отводить избыточную влагу с полей в предпосевный и уборочный периоды, а также направленно подавать оросительную воду в корнеобитаемый слой почвы в засушливый период.

Выше точки соединения устьевой части коллектора верхнего яруса с коллектором нижнего яруса установлен гидравлический клапан. С его помощью при повышении уровня воды в канале (водоприемнике) автоматически перекрывается устьевая труба, и увлажнительная вода не поступает в осушительную систему нижнего яруса, тем самым предотвращая переувлажнение грунтового массива, расположенного выше осушительной системы нижнего яруса. Вода из канала через устье поступает по устьевой части коллектора верхнего яруса в проводящие колодцы, а через них – в дрены-осушители-увлажнители и истоковые колодцы, наполняя их водой. По мере наполнения осушительно-увлажнительной системы верхнего яруса водой часть влаги через перфорацию элементов осушительно-увлажнительной сети верхнего яруса поступает в почву, смачивает ее в придренной зоне и по мере капиллярного подъема влаги увлажняет почву в корнеобитаемом слое.

Таким образом, при изменении уровней воды в канале (водоприемнике) благодаря гидравлическому клапану автоматически меняются режимы работы многофункциональной двухъярусной осушительно-увлажнительной системы: осушительный на увлажнительный, и наоборот.

Конструктивно двухъярусная осушительно-увлажнительная система включает в себя дрены-осушители нижнего яруса, соединенные с закрытым дренажным коллектором, проходящим через эксплуатационный колодец по устьевой трубе с выходом в магистральный канал или водоприемник. Глубина закладки

дрен-осушителей в истоках составляет 0,7...0,8 м, в устьях – до 2,5 м. Дренажные трубы дренажно-коллекторной сети нижнего яруса укладывают с уклоном 0,001...0,003 в сторону устья.

Верхний ярус включает в себя криволинейные дрены осушители-увлажнители, соединенные с истоковыми колодцами, а в устьях – через проводящие колодцы с коллектором системы верхнего яруса. Боковые стенки истоковых колодцев выполнены перфорированными. Снаружи они защищены фильтрующим материалом, снизу – глухими, а сверху накрыты крышками (позиции на чертежах не указаны).

Истоковые колодцы размещают на границе осушаемого массива, заглубляя их ниже глубины вспашки, чтобы их верх не препятствовал сельскохозяйственной обработке почвы. Дренажные трубы осушителей-увлажнителей от истоковых колодцев прокладывают в сторону проводящих с уклоном 0,001...0,002. Проводящие колодцы выполняют из неперфорированных труб с днищем, и сверху – с заглушками. Размещают их в местах соединения дренажных труб осушительно-увлажнительных элементов с коллектором системы верхнего яруса на глубине ниже глубины вспашки с учетом соблюдения принятых продольных уклонов для дрен и коллекторов. Все элементы выполняются из пластиковых труб стандартных сортаментов.

В зависимости от этапа выращивания сельскохозяйственных культур система работает в режимах осушения или увлажнения за счет регулирования уровня воды в магистральном канале (водоприемнике).

В режиме осушения система работает следующим образом. С наступлением тепла в весенний период, по мере оттаивания почвы и подпочвенного горизонта, в дрены-осушители-увлажнители и истоковые колодцы поступает избыточная вода. Далее она поступает в проводящие колодцы, коллекторы, устьевую трубу верхнего яруса, устьевую трубу нижнего яруса и отводится в магистральный канал (водоприемник). Данный режим осушения позволяет в более ранние сроки осушить пахотный горизонт и тем самым обеспечить более раннюю сельскохозяйственную обработку почв.

После полного оттаивания включаются в работу дрены нижнего яруса, и избыточные грунтовые воды по дренам-осушителям, через коллектор, клапан и устьевую трубу отводятся в магистральный канал (водоприемник),

обеспечивая поддержание уровня грунтовых вод на отметке, соответствующей проектной норме осушения.

В засушливый период, при дефиците влаги, увлажнение осуществляется за счет повышения уровня воды в канале с помощью водорегулирующего элемента. По мере подъема уровня воды в магистральном канале до требуемого уровня она поступает в устьевую трубу. Под действием создаваемого напора срабатывает гидравлический клапан, отсекая поступление воды в дренажный коллектор системы нижнего яруса. Далее оросительная вода через устьевую отвод по коллектору поступает в проводящие колодцы, из них – в осушители-увлажнители и истоковые колодцы. В результате формируется увлажнительная система, обеспечивающая подачу воды в корнеобитаемый слой почвы.

После завершения режима увлажнения водорегулирующий элемент удаляют. Уровень воды в канале снижается до отметки, при которой обеспечивается осушительный режим работы системы. По мере поступления дренажного стока в коллектор дренажной системы нижнего яруса и отсутствия напора вводы в устьевую трубу гидравлический клапан открывается, переводя работу всей системы в осушительный режим.

Выводы

Рассмотренная многофункциональная двухъярусная осушительно-увлажнительная система способна:

- ускорить готовность почвы к обработке после схода снега;
- при высоком уровне стояния грунтовых вод поддерживать их уровень на отметке, соответствующей проектной норме осушения;
- в засушливое время осуществлять подачу воды в корнеобитаемый слой почвы;
- обеспечивать автоматический перевод системы из осушительного в увлажнительный режим работы, и наоборот;
- обеспечивать требуемый водно-воздушный режим почвы в различные сроки возделывания сельскохозяйственных культур.

Для получения патента РФ на предполагаемое изобретение «Двухъярусная осушительно-увлажнительная система» оформлена заявка на объект-устройство по классификатору МПК8 E02B 11/00 в Федеральную службу по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

Библиографический список

1. Добровольский В.В. География почв с основами почвоведения: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.

References

1. Dobrovolsky V.V. Geografiya pochv s osnovami pochvovedeniya: Ucheb. dlya vuzov. – M.: Vyssh. shk., 1989. – 320 s.

2. **Костяков А.Н.** Основы мелиорации. – М.: Сельхозиздат, 1951. – 751 с.
3. Словарь мелиоратора / Сост. М.Б. Черняк и др. – СПб.: Политех-Пресс, 2019. – 93 с.
4. **Димо В.Н.** Тепловой режим почв СССР. – М.: Колос, 1972. – 360 с.
5. **Зубина В.Л.** Зависимость потерь сельскохозяйственных культур от продолжительности проведения сельскохозяйственных операций // Плодоводство и ягодоводство России. – 2017. – Т. 50. – С. 137-141.
6. **Лавров А.В., Шевцов В.Г., Зубина В.А.** Анализ влияния продолжительности выполнения сельскохозяйственных операций на потери урожая в почвенно-климатических условиях Калужской области // «Адаптивно-ландшафтные системы земледелия – основа эффективного использования мелиорированных земель»: Материалы Международной научно-практической конференции, ФГБНУ ВНИИМЗ. – Тверь: Изд-во ТвГУ, 2017. – С. 35-39.
7. **Зайдельман Ф.Р.** Мелиорация почв: учебник. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – 448 с.
8. Дренажная система: Авт. свид-во SU887711, E02B 11/00. Заяв.: Белорусский НИИМИВХ. Опубл. 07.12.81. Бюл. № 45.
9. Осушительно-увлажнительная система: Авт. свид-во SU1198151, E02B 11/00. Опубл. 15.12.85. Бюл. № 46.
10. Двухъярусная дренажная система: Авт. свид-во SU1629391, E02B 11/00. Заяв.: Украинский НИИГиМ. Опубл. 23.02.91. Бюл. № 7.

Критерии авторства

Сметанин В.И., Бедретдинов Г.Х. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 23.09.2022 г.

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

2. **Kostyakov A.N.** Osnovy melioratsii. – M: Selhozizdat, 1951. – 751 s.

3. Slovar melioratora / sost. M.B. Chernyak [i dr.] /. – SPb.: Politeh-Press, 2019. – 93 s.

4. **Dimo V.N.** Teplovoj rezhim pochv SSSR. – M.: Kolos, 1972. – 360 s.

5. **Zubina V.L.** Zavisimost poter selskohozyajstvennykh kultur ot prodolzhitelnosti provedeniya selskohozyajstvennykh operatsij // Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii. – 2017. – t. 50. – S. 137-141.

6. **Lavrov A.V., Shevtsov V.G., Zubina V.A.** Analiz vliyaniya prodolzhitelnosti vypolneniya selskohozyajstvennykh operatsij na poteri urozhaj v pochvenno-klimaticheskikh usloviyakh Kaluzhskoj oblasti // «Adaptivno-landshaftnye sistemy zemledeliya – osnova effektivnogo ispolzovaniya meliorirovannykh zemel». Materialy mezhdun. nauchno-prakt. konf. FGBNU VNIMZ. – Tver: 2017. – S. 35-39.

7. **Zeidelman F.R.** Melioratsiya pochv. Uchebnik. – 3-e izd., ispr. i dop. M.: Izd-vo MGU, 2003. – 448 s., ill. – (Klassicheskiy universitetskiy uchebnik).

8. Drainage system. Avt. svid. SU887711 kl. E 02B 11/00. Belarusian NIIMIVH. Opublikovano 07.12.81. Byul. № 45

9. Dehumidification and humidification system: Avt. svid. SU1198151 kl. E 02B 11/00, opubl. 15.12.85 byul. № 46

10. Two-tier drainage system: Avt. svid. SU1629391 kl. E 02B 11/00, Application: Ukrainian NIIGiM, opubl. 23.02.91, byul. № 7

Criteria of Authorship

Smetanin V.I., Bedretdinov G.H. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Smetanin V.I., Bedretdinov G.H. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 23.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:631.671

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-28-35

РАСЧЕТ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ КРАСНОГО КЛЕВЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСПАРЕНИЯ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ

ПЧЁЛКИН ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ, д-р техн. наук, профессор

9766793@mail.ru

СЕРГЕЕВА АЛЕНА МИХАЙЛОВНА, аспирант

leka-89@list.ru

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

Предметом исследований является разработка метода расчета водопотребления красного клевера с использованием данных о испарении с водной поверхности, направленного на повышение точности его определения и экономии водных ресурсов, на водоразделах Нечерноземной зоны России. Объектом исследований суммарного водопотребления красного клевера являются дерново-подзолистые почвы и почвенная влага водораздельных площадей при выращивании кормовых культур. Экспериментальные опыты проводились на делянках, в лизиметрах и лаборатории, в различные по метеорологическим условиям годы. При обработке и анализе научных исследований использовались учение о перетоке подземных вод, данные лизиметрических исследований, данные натурных опытов, корреляционный и регрессивный анализ. Водобалансовые исследования выполнялись на научной базе, расположенной в Московской области, по методике, разработанной Ю.Н. Никольским, В.В. Пчёлкиным. Опыты, проведенные в лизиметрах и на делянках в 2015-2017 гг., послужили основой для разработки формулы определения водопотребления красного клевера с использованием испарения с водной поверхности на водоразделах Нечерноземной зоны России.

Ключевые слова: суммарное испарение, орошение, испаряемость, вода, красный клевер, почва

Формат цитирования: Пчёлкин В.В., Сергеева А.М. Расчет водопотребления красного клевера с использованием испарения с водной поверхности в условиях Нечерноземной зоны // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 28-35. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-28-35.

Данные научные исследования проводились в рамках реализации гранта в субсидии Минобрнауки РФ № 075-15-2021-032 от 23.03.2021 г. на создание и развитие инжинирингового центра на базе образовательной организации высшего образования и (или) научной организации в рамках реализации федерального проекта «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» национального проекта «Наука и университет».

© Пчёлкин В.В., Сергеева А.М., 2022

Original article

CALCULATION OF WATER CONSUMPTION OF RED CLOVER USING EVAPORATION FROM THE WATER SURFACE IN THE NON-CHERNOZEM ZONE

PCHELKIN VICTOR VLADIMIROVICH, doctor of technical sciences, professor

9766793@mail.ru т. 8-916-976-6793

SERGEeva ALENA MIKHAILOVNA, post graduate student

leka-89@list.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev, 127434, Moscow, Timiryazevskaya str., 49, Russia

The subject of research is the development of a method for calculating the water consumption of red clover using data on evaporation from the water surface, aimed at improving the accuracy of its determination and saving water resources, in the watersheds of the non-chernozem zone

of Russia. The object of research on the total water consumption of red clover is turf-podzolic soils and soil moisture of watershed areas, when growing fodder crops. Experimental tests were carried out on plots, in lysimeters and laboratories, in different meteorological conditions years. In the processing and analysis of scientific research, the doctrine of groundwater flow, data from lysimetric studies, and data from field experiments, correlation and regressive analysis were used. Water balance studies were carried out on a scientific basis located in the Moscow region, according to the methodology developed by Yu.N. Nikolsky, V.V. Pchelkin. Experiments conducted in lysimeters and plots in 2015... 2017, served as the basis for the development of a formula for determining the water consumption of red clover using evaporation from the water surface in the watersheds of the non-chernozem zone of Russia.

Keywords: total evaporation, irrigation, evaporation, water, red clover, soil

Format of citation: Pchelkin V.V., Sergeeva A.M. Calculation of water consumption of red clover using evaporation from the water surface in the Non-Chernozem zone // Prirodobustroystvo. – 2022. – № 5. – P. 28-35. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-28-35.

These scientific studies were carried out as part of the implementation of a grant in the subsidy of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2021-032 dated 23.03.2021 for the creation and development of an engineering center on the basis of an educational organization of higher education and (or) a scientific organization as part of the implementation of the federal project «Development of infrastructure for scientific research and personnel training» of the national project «Science and Universities».

Введение. Наибольшая урожайность красного клевера может быть получена при создании для него наилучших условий по режиму влажности почвы на фоне оптимальной агротехники. Эти условия получают при помощи современных гидромелиоративных систем. При проектировании этих систем необходимо определять количественные показатели режима орошения, в том числе суммарное водопотребление, которое является основным расходным элементом водного баланса.

Различные методы определения суммарного водопотребления растений в России были разработаны такими учеными, как А.М. Алпатьев [1], В.В. Бородычев [5], М.И. Будыко [2], А.И. Голованов [3], Н.В. Данильченко [4], Н.Н. Дубенок [5], Н.Н. Иванов [6], А.Р. Константинов [7], А.Н. Костяков [8], Ю.Н. Никольский [10], В.П. Остапчик [1], В.В. Пчёлкин [11], Р.А. Чечко [5] и др.

За рубежом вопросами расчета суммарного водопотребления растений занимались S.A. Abdel-Hafez [12], N.G. Ainer [14], A.E. Badr [13], G.A. Bakeer [13], V.S. Bocharnikov [16], O.V. Bocharnikova [16], M.T. El-Tantawy [13], H.M. Eid [11], S.D. Fomin [16], C. Kenneth [17], F. Klatt [15], M.A. Metwally [14], V.V. Ovchinnikov [16], O'Shaughnessy [17], Paul D. Colaizzi [14], C. Robert [17], Schwartz [17], Steven R. Evett [17], Stone [17], A. Susan [17], K. Scott [17], T.K. Zin El-Abedin [18] и др.

Анализ известных методов расчета суммарного водопотребления при возделывании красного клевера с использованием испарения с водной поверхности в условиях

Нечерноземной зоны показал их отсутствие в условиях проведения исследований.

По результатам исследований была разработана зависимость для определения суммарного водопотребления при возделывании красного клевера, использовались данные о величине испарения с водной поверхности (испаряемость) для рассматриваемых условий. Получены коэффициенты уравнения регрессии для дерново-подзолистых почв и южно-таежной подзоны Нечерноземья. Установлены биологические коэффициенты для красного клевера и коэффициенты, учитывающие снижение влажности почвы от наилучшего нижнего уровня для красного клевера.

Целью данных исследований является разработка формулы для расчета суммарного водопотребления при возделывании красного клевера с использованием испарения с водной поверхности на водоразделах Нечерноземной зоны России.

Материалы и методы исследований.

Климат и почвы. Климат Среднерусской провинции характеризуется как умеренно-континентальный. Сумма положительных температур воздуха более 10°C за период вегетации составляет 1600 до 2200°C. Продолжительность безморозного периода – 121-129 дней. Среднегодовое количество осадков – 600 мм. Во время вегетации случаются периоды без осадков (от 4 до 30 сут.), что приводит к иссушению почвы и дефициту влаги в ней.

Изменчивость естественного гидротермического режима существенно влияет на урожайность сельскохозяйственных культур по годам,

в том числе на землях, расположенных на возвышенных элементах рельефа местности. По данным Ю.Н. Никольского [10], колебания урожайности на мелиорируемых землях изменяется по годам в пределах $\pm 20...30\%$ от среднегодовой величины, то есть в пределах колебаний гидротермического показателя Os/LE , что в 2 раза превышает максимальную урожайность над минимальной. Дефицит влаги в почве в отдельные периоды вегетации культурных растений вызывает необходимость орошения земель, расположенных на водораздельных территориях, что позволяет увеличивать урожайность сельскохозяйственных культур на $20...50\%$. Из этого следует, что орошение необходимо.

В европейской части южно-таежной подзоны сформировались в основном дерново-подзолистые почвы. Основные параметры водно-физических характеристик почвы участка исследований в слое 0-1,2 м: плотность естественного сложения почвы по площади и глубине составляет $1,37...1,80 \text{ г/см}^3$; плотность твердой фазы почвы колеблется по глубине в диапазоне от $2,40$ до $2,70 \text{ г/см}^3$; изменение пористости почвы составляет $0,43...0,35$ в долях от объема, $\text{см}^3/\text{см}^3$; полная влагоемкость (ПВ) колеблется от $0,40$ до $0,31$ в долях от объема, $\text{см}^3/\text{см}^3$; предельная полевая влагоемкость (НВ) составляют $0,37...0,25$ в долях от объема, $\text{см}^3/\text{см}^3$; максимальная гигроскопичность мало меняется по профилю и изменяется от $0,055$ до $0,04$ в долях от объема, $\text{см}^3/\text{см}^3$.

Изменение содержание гумуса составляет от $1,08$ до $3,69\%$ и в среднем по опытному участку – $2,34\%$. Кислотность почвы по $\text{pH}_{\text{сол}}$ составила $6,6-7,7$. Содержание нитратного азота (NO_3) составило $19,9-25,3 \text{ мг/кг}$, аммонийного (NH_4) – $6,43-13,18 \text{ мг/кг}$, фосфора (P_2O_5) – $6,43-13,18 \text{ мг/кг}$, калия (K_2O) – $55,49-78,62 \text{ мг/кг}$.

Описание участка научных исследований. Участок научных исследований размещен на возвышенном элементе рельефа местности в центре южно-таежной подзоны европейской части России Федерации, Московской области.

На участке научных исследований были расположены опытные делянки с красным клевером (4 делянки), лизиметры (3 лизиметра), система орошения (насосная станция колодезного типа, распределительный водопровод, поливные водопроводы, гидранты для распыления дождя, бак для воды 3 м^3 , водисточник – поселковый водопровод), дождемеры (2 осадкомера ГГИ 3000). На каждой делянке, кроме системы орошения, установлены трубы для измерения глубины грунтовых вод, и на каждой площадке – полимерные трубы для измерения влажности почвы. В каждом

лизиметре установлены полимерные трубы для измерения влажности почвы.

На экспериментальном участке исследовались разнообразные режимы влажности увлажняемого горизонта дерново-подзолистой почвы возвышенных элементов рельефа местности и связь ее с продуктивностью красного клевера.

Площадь делянок составляла 80 м^2 каждая. При этом все делянки делили на 4 площадки $3,2 \times 3,2 \text{ м}$. Влажность почвы поддерживалась с помощью поливов в следующем диапазоне: 1 вариант – $(0,60...0,70) \text{ ПВ}$; 2 вариант – $(0,70...0,80) \text{ ПВ}$; 3 вариант – $(0,80...0,90) \text{ ПВ}$; 4 – контроль (без орошения). При снижении влажности почвы до нижней границы в течение вегетации красного клевера ($1-0,6 \text{ ПВ}$; $2-0,7 \text{ ПВ}$; $3-0,8 \text{ ПВ}$) назначали поливы.

Полив красного клевера в 2015-2017 гг. осуществлялся при помощи оросительной системы Rain Bird (модель 1812). В центре делянок были смонтированы гидранты, представлявшие собой форсунки дождя с телескопической частью.

Вода к гидранту подавалась по оросительной сети. Для этого под землей был проложен распределительный трубопровод диаметром 32 мм , сопряженный с поливными трубопроводами (ПТ) диаметром 20 мм . Вода на полив забиралась из поселкового водопровода. Сначала (до полива) вода подавалась в пласмассовую емкость объемом 3 м^3 , далее из емкости она подавалась по соединительному водоводу к насосу, затем от него попадала к гидрантам и форсункам, которые распыляли воду в виде дождя на делянках.

Влажность почвы определялась в слое $0,5 \text{ м}$. Данный слой делили на 5 горизонтов, в которых производили измерения влажности почвы прибором TRIME-FM3. Каждый горизонт для измерения влажности почвы составлял $0,1 \text{ м}$. Такое деление обусловлено зоной влияния датчика влагомера TRIME – FM3. Осадки измеряли осадкомером ГГИ 3000, поливные нормы рассчитывались и измерялись с помощью расходомеров, установленных на поливных водоводах, просачивание влаги в почве определяли в лизиметрах с помощью труб инфильтрации. Суммарное водопотребление в лизиметре рассчитывали с помощью уравнения водного баланса (1) на основании измеренных элементов водного баланса W , Os , m , $-q$ (условные обозначения даны ниже, в разделе 2.3).

Глубина лизиметра с поддоном составляла 2 м , а диаметр – $1,6 \text{ м}$. Лизиметры заряжали монолитом дерново-подзолистой почвы с нарушенным сложением. Содержание NPK, гумуса и другие агрохимические показатели

почвы определяли в лаборатории ООО ЦСЭМ «Московский» по стандартным методикам.

Расчет водопотребления и режима орошения. Формула взаимосвязи между элементами водного баланса аэрированного слоя почвы лизиметров и деженок представлена, мм, как

$$E = W_n - W_k \pm q + O_c + m, \quad (1)$$

где E_n – суммарное испарение красного клевера; W_k – конечные и начальные влагозапасы почвы; $\pm q$ – влагообмен корнеобитаемого слоя почвы с нижележащими горизонтами; $-q$ – просачивание влаги в почву; $+q$ – капиллярное увлажнение зоны аэрации со стороны грунтовых вод; O_c – дождевые осадки; m – норма полива.

Составляющие водного баланса W , O_c , m , $-q$ измерялись, а суммарное водопотребление при возделывании красного клевера E_p вычислялось как неизвестное.

Определение потенциального суммарного водопотребления при возделывании красного клевера производилось по формуле (2), предложенной В.В. Пчёлкиным [11]:

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

где E_p – потенциальное суммарное водопотребление при возделывании красного клевера, мм/дек.; a , b – эмпирические коэффициенты, зависящие от климатической зоны, типа почвы и культуры; nd – число декад за период вегетации красного клевера; $\sum d_{si}$ – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха в i декаду периода вегетации, мм/дек.

Результаты и их обсуждение. Существующие расчетные методы используют эмпирические зависимости, выражающие корреляционные связи между суммарным водопотреблением и климатическими факторами по данным метеорологических наблюдений. Значительное количество метеорологических станций измеряет испарение с водной поверхности, которое используется при определении суммарного водопотребления в формулах Н.Н. Иванова [6], Х.Л. Пенмана, Л. Тюрка [9] и др. Для перехода от испаряемости к суммарному водопотреблению при возделывании конкретной культуры следует вводить переходные коэффициенты K_{rp} , K_6 , K_b , учитывающие отклонение потенциального водопотребления от испаряемости, биологические особенности сельскохозяйственной культуры, отклонение влажности почвы от оптимальных значений:

$$E_p = K_{rp} K_6 K_b E_o, \quad (3)$$

где E_o – испарение с водной поверхности (испаряемость), мм/дек.; E_p – суммарное водопотребление при возделывании красного клевера, мм/дек.; K_{rp} – коэффициент, учитывающий отклонение потенциального суммарного водопотребления (E_p) от испаряемости, E_o ; K_6 – биологический коэффициент; K_b – коэффициент, учитывающий влажность почвы.

С целью определения K_{rp} были выполнены опыты по измерению испарения с водной поверхности (испаряемости) с помощью испаромера ГГИ-3000 и определению потенциального суммарного водопотребления при возделывании красного клевера в лизиметрах. Увлажненность почвы в лизиметрах выдерживалась в наилучших пределах (70-80% ПВ) [11] в течение вегетации исследуемой культуры.

Применяя данные испарения с водной поверхности (испаряемость) и сумму среднесуточных дефицитов влажности воздуха за декадные периоды, установили зависимость между данными величинами (4):

$$E_o = a_1 d_s^{n_1}, \quad (4)$$

где a_1 , n_1 – эмпирические коэффициенты, $a = 0,58$; $n = 0,99$.

Используя результаты лизиметров по потенциальному суммарному водопотреблению при возделывании красного клевера при оптимальной влажности почвы и сумму среднесуточных дефицитов влажности воздуха за декадные периоды, получили формулу (5):

$$E_p = a_2 d_s^{n_2}, \quad (5)$$

где d_s – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха, мм/дек.; E_p – потенциально возможное суммарное водопотребление при возделывании красного клевера, мм/дек.; a_2 , n_2 – коэффициенты уравнения регрессии, учитывающие климатическую зону и почвы, составляющие 1,31 и 0,77 соответственно.

С помощью зависимостей (4) и (5) определялись потенциальное суммарное водопотребление при возделывании красного клевера (E_p) и испарение с водной поверхности (E_o). Данные определения испарения с водной поверхности (E_o), потенциального суммарного испарения (E_p) и коэффициентов связи испаряемости с суммарным водопотреблением при возделывании красного клевера (K_{rp}) представлены в таблице 1.

Коэффициенты (K_{rp}) связи испарения с водной поверхности с потенциальным суммарным водопотреблением при возделывании красного клевера определяли по формуле:

$$K_{rp} = E_p / E_o, \quad (6)$$

где E_p – потенциально возможное водопотребление при возделывании красного клевера, мм/дек.; E_o – испарение с водной поверхности (испаряемость), мм/дек.

При использовании значения испаряемости (E_o) и коэффициентов перехода K_{rp} (табл. 2) были составлены статистические ряды и получено уравнение регрессии.

При расчете суммарного водопотребления при возделывании красного клевера было применено уравнение (7) [11]:

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

Таблица 1

Данные определения испарения с водной поверхности (E_o), потенциального суммарного водопотребления (E_p) и коэффициентов связи испаряемости с суммарным водопотреблением при возделывании красного клевера ($K_{рп}$)

Table 1

Data on the determination of evaporation from the water surface (E_o), potential total water consumption (E_p) and coefficients of the relationship of evaporation with total water consumption in the cultivation of red clover ($K_{рп}$)

Год	Дек., №	Месяц	Декада	ds	E_o	E_p	$K_{рп}$
2015	1	VI	3	39	22	22	1
	2		1	78	43	38	0,88
	3		2	69	38	35	0,92
	4		3	73	41	36	0,88
	5	VII	1	80	44	38	0,86
	6		2	69	38	34	0,89
	7		3	28	15	17	1,13
	8	VIII	1	45	25	25	1
2016	1	V	1	62	35	31	0,88
	2		2	37	21	21	1
	3		3	48	27	26	0,96
	4	VI	1	31	17	18	1,06
	5		2	51	28	27	0,96
	6		3	75	42	37	0,88
	7	VII	1	59	33	30	0,91
	8		2	71	39	35	0,90
	9		3	66	37	33	0,89
	10	VIII	1	80	44	38	0,86
2017	1	V	1	43	24	24	1
	2		2	43	24	24	1
	3		3	56	31	29	0,93
	4	VI	1	36	20	21	1,05
	5		2	38	21	22	1,04
	6		3	52	29	27	0,93
	7	VII	1	22	12	14	1,17
	8		2	49	27	26	0,96
	9		3	67	37	33	0,89
	10	VIII	1	60	33	31	0,94

Биологические коэффициенты K_b представлены в таблице 2 [11].

Данные рисунка 1 показывают, что коэффициент корреляции закономерности изменения расчетного суммарного водопотребления ($E_{рп}$) от фактического суммарного водопотребления при возделывании красного клевера (E_f) составляет $0,937 \pm 0,0697$. Это доказывает плотность рассматриваемой связи.

С повышением влажности почвы суммарное водопотребление при возделывании красного клевера возрастает до 0,72 ПВ. Последующее повышение влажности почвы существенно не влияет на величину суммарного водопотребления при возделывании красного клевера.

Коэффициенты влажности (K_v) почвы представлены в таблице 3.

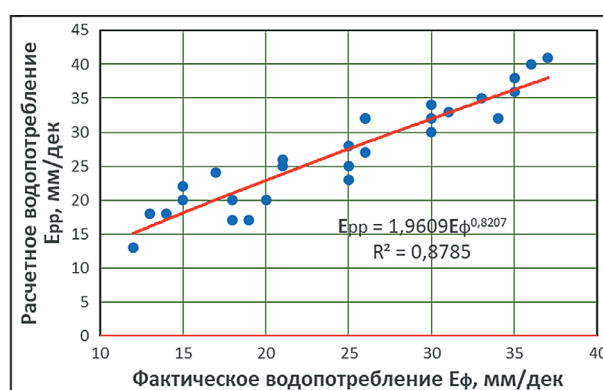


Рис. 1. Закономерность изменения расчетного суммарного водопотребления ($E_{рп}$) от фактического суммарного водопотребления при возделывании красного клевера (E_f)

Fig. 1. Regularity of changes in the estimated total water consumption ($E_{рп}$) from the actual total water consumption during the cultivation of red clover (E_f)

Таблица 2

Биологические коэффициенты K_b , расчетное водопотребление красного клевера $E_{рф}$ и $E_{рр}$ и фактические значения водопотребления $E_{ф}$

Table 2

Biological coefficients K_b , estimated water consumption of red clover $E_{рф}$ and $E_{рр}$ and actual values of water consumption of $E_{ф}$

Год	Месяц	Декада	K_b	$E_{рф}$	$E_{рр}$	$E_{ф}$
2015	V	1	0,49	10	11	-
		2	0,62	27	23	-
		3	0,7	25	25	25
	VI	1	0,84	36	30	34
		2	0,91	38	35	38
		3	0,98/0,85	33	34	27
	VII	1	1,00	14	17	24
		2	1,01	23	25	21
		3	1,00	31	31	33
	VIII	1	0,98/0,83	20	21	26
2016	V	1	0,49	12	15	20
		2	0,62	11	13	18
		3	0,74	20	19	17
	VI	1	0,84	16	18	17
		2	0,91	24	25	28
		3	0,98/0,85	32	36	40
	VII	1	1,00	27	30	30
		2	1,01	32	35	36
		3	1,00	29	33	35
	VIII	1	0,98/0,83	32	37	41
2017	V	1	0,49	12	12	13
		2	0,62	15	15	22
		3	0,74	20	21	31
	VI	1	0,84	18	18	20
		2	0,91	21	20	20
		3	0,98/0,85	25	26	27
	VII	1	1,00	16	14	18
		2	1,01	25	26	32
		3	1,00	25	26	32
	VIII	1	0,98/0,83	29	30	32

Таблица 3

Коэффициент, определяющий снижение влажности почвы [11]

Table 3

Coefficient determining the decrease in soil moisture [11]

Влажность почвы Soil moisture	(0,72-0,8) ПВ	0,7 ПВ	0,57 ПВ
K_b	1	0,93	0,74

По зависимостям (3) и (7) было осуществлено определение $E_{рр}$ и $E_{рф}$. Данные расчета рассматриваемых величин представлены в таблице 2. По результатам расчета получена прямая связи данных величин (рис. 2).

Анализ графика (рис. 2) показывает, что коэффициент корреляции составляет $0,95 \pm 0,07$. Это говорит о тесной связи между рассматриваемыми признаками, поэтому

формулу (3) можно рекомендовать для практического использования.

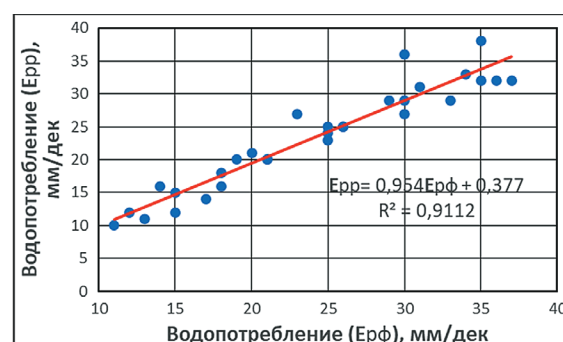


Рис. 2. Прямая связи суммарного водопотребления при возделывании красного клевера, полученная по данным, рассчитанным по зависимостям (3) $E_{рр}$ и (7) $E_{рф}$
Fig.2. Direct relationship of total water consumption in the cultivation of red clover, obtained from the data calculated from the dependencies (3) $E_{рр}$ and (7) $E_{рф}$

Выводы

С целью повышения продуктивности красного клевера в южно-таежной подзоне Нечерноземья России следует проводить поливы в засушливые периоды вегетации. Выполненное экспериментальное исследование является эксклюзивным, потому что на дерново-подзолистых почвах возвышенных территорий южно-таежной подзоны России при производстве красного клевера:

- установлена зависимость между испарением с водной поверхности (E_o) и дефицитом влажности воздуха (ds), получено уравнение регрессии между данными характеристиками (ограничения по дефициту влажности воздуха – 22-80 мб/дек.);

- определена закономерность изменения суммарного водопотребления при возделывании красного клевера (E_{pp}) от испарения с водной поверхности (испаряемости) (E_o), получена формула для расчета суммарного водопотребления исследуемой культуры (ограничение по испаряемости (E_o) – 12-44 мм/дек.). Кроме того, получены численные значения по коэффициентам K_{rp} перехода от испарения с водной поверхности к потенциальному суммарному испарению, биологические коэффициенты K_o для красного клевера и коэффициенты K_v ,

учитывающие отклонение влажности почвы от наилучших значений для условий дерново-подзолистых почв водоразделов южно-таежной подзоны Нечерноземья России;

- определена закономерность изменения расчетного суммарного водопотребления (E_{pp}) от фактического водопотребления при возделывании красного клевера (E_f);

- установлена связь между суммарным водопотреблением при возделывании красного клевера, полученным при использовании данных дефицита влажности воздуха (ds), и суммарным водопотреблением, полученным при использовании данных испарения с водной поверхности (E_o).

Организациям по проектированию оросительных систем следует применять формулу для расчета суммарного водопотребления красного клевера с использованием испаряемости, биологических коэффициентов и коэффициентов, учитывающих снижение влажности почвы. Сельскохозяйственным организациям предлагается применять результаты эксперимента при расчете эксплуатационного режима орошения.

В последующем планируется выполнять экспериментальные исследования с другими растениями и иными технологиями полива.

Библиографический список

1. Алпатъев А.М., Остапчик В.П. К обоснованию формирования поливных норм с использованием биоклиматического метода расчета суммарного испарения // Мелиорация и водное хозяйство. – 1971. – Вып. 19. – С. 13-17.
2. Бudyko М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 256 с.
3. Голованов А.И., Пчелкин В.В., Али М.С. Связь испарения с водной поверхности с водопотреблением сельскохозяйственных культур на осушаемых пойменных землях // Природообустройство. – № 3. – 2012. – С. 16-20.
4. Данильченко Н.В. Методические особенности расчета оросительных норм с.-х. культур в НЧЗ РСФСР // В кн.: Техника и технология механизированного орошения. – М., 1982. – С. 177-186.
5. Дубенок Н.Н., Бородычев В.В., Чечко Р.А. Малоинтенсивное дождевание картофеля в Нижнем Поволжье: Монография. – М.: Проспект, 2017. – 176 с.
6. Иванов Н.Н. Об определении величины испаряемости // Известия Всесоюзного географического общества. – 1954. – Т. 86. Вып. 2. – С. 189-196.
7. Константинов А.Р. Испарение в природе. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – С. 307-319.
8. Костяков А.Н. Основы мелиорации. – М.: Сельхозгиз, 1960. – С. 54-66.
9. Мелиорация земель: Учебник для вузов / А.И. Голованов, И.П. Айдаров, М.С. Григоров и др. – М.: СПб.: Лань, 2015. – 816 с.
10. Никольский Ю.Н. Оптимизация водного режима осушаемых земель грунтового типа питания: Автореф. дис. ... д-ра технических наук. – М.: МГМИ, 1988.

References

1. Alpatjev A.M., Ostapchik V.P. K obosnovaniyu formirovaniya polivnyh norm s ispolzovaniem bioklimaticheskogo metoda rascheta summarnogo ispareniya // Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo. – 1971. – Vyp. 19. – S. 13-17.
2. Budyko M.I. Teplovoj balans zemnoj poverhnosti. – L.: Gidrometeoizdat, 1956. – 256 s.
3. Golovanov A.I., Pchelkin V.V., Ali M.S. Svyaz ispareniya s vodnoj poverhnosti s vodopotrebleniem selskohozyajstvennyh kultur na osushaemyh pojmennyh zemlyax // Prirodoobustroystvo. – № 3. – 2012. – S. 16-20.
4. Danilchenko N.V. Metodicheskie osobennosti rascheta orositelnyh norm s.-h. kultur v NChZ RSFSR. / V kn.: Tehnika i tehnologiya mehanizirovannogo orosheniya. – M., 1982. – S. 177-186.
5. Dubenok N.N., Borodychev V.V., Checho R.A. Malointensivnoe dozhdovanie kartofelya v Nizhnem Povolzhje: monografiya. – M.: Prospekt, 2017. – 176 s. ISBN978-5-392-24871-1.
6. Ivanov N.N. Ob opredelenii velichiny isparyaemosti // Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva. – 1954. – t. 86. vyp. 2. – S. 189-196.
7. Konstantinov A.R. Isparenienie v prirode. – L.: Gidrometeoizdat, 1968. – S. 307-319.
8. Kostyakov A.N. Osnovy melioratsii. – M.: Selhozgiz, 1960. – S. 54-66.
9. Melioratsiya zemel. Uchebnik dlya vuzov / A.I. Golovanov, I.P. Ajdarov, M.S. Grigorov i dr. – M.: SPb.: Lan, 2015. – 816 s.
10. Nikolskij Yu.N. Optimizatsiya vodnogo rezhima osushaemyh zemel gruntovogo tipa pitaniya/ Avtoreferat doktorskoj dissertatsii. – M.: MGMI, 1988.

11. Пчёлкин В.В., Сергеева А.М., Кузина О.М. Водопотребление красного клевера на дерново-подзолистых почвах водораздельных площадей Нечерноземной зоны // Научная жизнь. – 2020. – Т. 15. – Вып. 9. – С. 1186-1194.

12. Abdel-Hafez S.A., Bengamen I.S., El-Tantawy M.M. Estimation of water needs for vegetable crop in the old lands / S.A. Abdel-Hafez I.S. Bengamen, M.M. El-Tantawy W.L. Mesiha and G.M. Gad El-Rab // Meteorological Research Bulletin. – Egyptin, meteorological Authority. – 2001. – Vol. – № 16. – Pp. 106-121.

13. Badr A.E., Bakeer G.A. Sprinkler and trickle irrigation affected by climatic conditions in upper Egypt / A.E. Badr, G.A. Bakeer, M.T. El-Tantawy and A.H. Awwad // Misr J. Ag. Eng. – 2006. – № 23 (2). – Pp. 346-361.

14. Eid H.M., Ainer N.G., Metwally M.A. Estimation of irrigation and temoerature needs for the new pods in Egypt Conf // of Agri. Sci. On food Deficiency Overcoming Through Autonomous Efforts in Egypt Mannsoura Univ. – 1987. – Pp. 907-914.

15. Klatt F. Die Steuerung den Beregnung nach dem Beregnungsdiagramm // Z. Landeskultur. – 1967. № 2. – S. 89-98.

16. Optimum control model of soil water regime under irrigation / A.S. Ovchinnikov, V.V. Borodychev, M.N. Lytov, V.S. Bocharnikov, S.D. Fomin, O.V. Bocharnikova, E.S. Vorontsova // Bulgarian journal of agricultural Science. – 2018. – № 24 (5). – Pp. 909-913.

17. Steven R. Evett, Kenneth C. Stone, Robert C. Schwartz, Susan A. O'Shaughnessy, Paul D. Colaizzi, Scott K. // Anderson & David J. Anderson Resolving discrepancies between laboratory-determined field capacity values and field water content observations: implications for irrigation management. – Irrigation Science, 2019. – Vol. 37. – Pp. 751-759.

18. Zin El-Abedin T.K. Improving moisture distribution pattern of subsurface drip irrigation in sandy soil by using synthetic soil conditioner // Misr J. Ag. Eng., 2006. – № 23 (2). – Pp. 374-399.

Критерии авторства

Пчёлкин В.В., Сергеева А.М. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.08.2022 г.

Одобрена после рецензирования 18.10.2022 г.

Принята к публикации 25.10.2022 г.

11. Pchelkin V.V., Sergeeva A.M., Kuzina O.M. Vodopotreblenie krasnogo klevera na dernovo-podzolistykh pochvax vodorazdelnykh ploschadej Nechernozemnoj zony // Nauchnaya zhizn. – 2020. – Tom 15. Vyp. 9. – S. 1186-1194.

12. Abdel-Hafez S.A.; Bengamen I.S.; El-Tantawy M.M.; Mesiha W.L.; and G.M. Gad El-Rab. (2001). Estimation of water needs for vegetable crop in the old lands. Egyptin, meteorological Authority, Meteorological Research Bulletin, Vol. 16: 106-121.

13. Badr A.E.; Bakeer G.A.; El-Tantawy M.T. and A.H. Awwad. (2006). Sprinkler and trickle irrigation affected by climatic conditions in upper Egypt. Misr J. Ag. Eng., 23(2): 346-361.

14. Eid H.M.; Ainer N.G.; Metwally M.A. (1987). Estimation of irrigation and temoerature needs for the new pods in Egypt Conf. of Agri. Sci. On food Deficiency Overcoming Through Autonomous Efforts in Egypt Mannsoura Univ. Pp. 907-914.

15. Klatt F. Die Steuerung den Beregnung nach dem Beregnungsdiagramm. – Z. Landeskultur, H. 2, 1967, s. 89-98.

16. Optimum control model of soil water regime under irrigation [Tekst]/ A.S. Ovchinnikov, V.V. Borodychev, M.N. Lytov, V.S. Bocharnikov, S.D. Fomin, O.V. Bocharnikova, E.S. Vorontsova // Bulgarian journal of agricultural Science. – № 24 (5). 2018. – P. 909-913.

17. Steven R. Evett, Kenneth C. Stone, Robert C. Schwartz, Susan A. O'Shaughnessy, Paul D. Colaizzi, Scott K. // Anderson & David J. Anderson Resolving discrepancies between laboratory-determined field capacity values and field water content observations: implications for irrigation management / Irrigation Science volume37, pages751-759(2019) Cite this article.

18. Zin El-Abedin T.K. (2006). Improving moisture distribution pattern of subsurface drip irrigation in sandy soil by using synthetic soil conditioner. Misr J. Ag. Eng., 23(2): 374-399.

Criteria of authorship

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

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 17.08.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:631.6

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-36-44

ВОДОПОНИЖЕНИЕ И ВОДООТЛИВ КАК СПОСОБ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОСУШЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ ПАРКА АКАДЕМИКА САХАРОВА Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

КАЛИНИЧЕНКО РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ , канд. с.-х. наук, доцент
kalinichenko_rv@mail.ru

СЕМЕНОВА КРИСТИНА СЕРГЕЕВНА , канд. техн. наук, доцент
kristi11.05.88@yandex.ru

КАБЛУКОВ ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент
o.kablukov@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 125434, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44, Россия

Цель работы – определить причины переувлажнения территории, спроектировать систему временного предварительного осушения, обеспечивающую эффективное отведение избыточных вод в период строительства постоянной осушительной системы в условиях парка академика Сахарова. Основными причинами избыточного увлажнения в пределах объекта являются влажный климат (осадки превышают испарение в 2,8 раза), неглубокое залегание водоупоров водоносного горизонта, высокое положение грунтовых вод, что приводит к образованию линз верховодки в течение года. Согласно климатическим и гидрогеологическим исследованиям перед началом работ по строительству осушительной системы следует произвести предварительное осушение. Рассмотрены конструктивные особенности системы водопонижения и водоотлива, а также этапы строительства. Согласно расчетам по водоотливу в условиях парка академика Сахарова при мощности дренируемого водоносного пласта в пределах 1,0...1,4 м, средней глубине залегания водоупора 2,0...2,3 м и длине траншеи от 110...225 м время на осушение составляет 5...6 сут., а расчетный приток воды к устью траншеи находится в пределах 3,29...3,85 м³/сут. Для обеспечения эффективной работы по водоотливу из траншеи с длиной до 225 м и при мощности дренируемого водоносного пласта до 1,4 в гидрогеологических условиях территории парка Сахарова рекомендуется применять отечественное насосно-силовое оборудование типа «Вихрь» ДН-400 с расходом 11,5 м³/ч.

Ключевые слова: водоотлив, водопонижение, осушение, Санкт-Петербург, парк Академика Сахарова

Формат цитирования: Калинин Р.В., Семенова К.С., Каблук О.В. Водопонижение и водоотлив как способ предварительного осушения территории парка Академика Сахарова г. Санкт-Петербурга // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 36-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-36-44.

Статья подготовлена при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2021-032 от «23» марта 2021 г. о предоставлении гранта в форме субсидии на создание и развитие инжинирингового центра на базе образовательной организации высшего образования и (или) научной организации в рамках реализации федерального проекта «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» национального проекта «Наука и университеты»

© Калинин Р.В., Семенова К.С., Каблук О.В., 2022

Original article

WATERDRAWDOWN AND DEWATERING AS A METHOD OF PRELIMINARY DRAINAGE OF THE TERRITORY OF THE PARK OF ACADEMICIAN SAKHAROV, ST. PETERSBURG

KALINICHENKO ROMAN VLADIMIROVICH , candidate of agricultural sciences, associate professor
kalinichenko_rv@mail.ru

SEMENOVA KRISTINA SERGEEVNA , candidate of technical sciences, associate professor
kristi11.05.88@yandex.ru

KABLUKOV OLEG VICTOROVICH, candidate of technical sciences, associate professor
o.kablukov@rgau-msha.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 125434, Moscow, B. Academicheskayul., 44. Russia

The purpose of our work is to determine the causes of overwetting of the territory, to design a temporary pre-drainage system that ensures the effective removal of excess water during the construction of a permanent drainage system in the conditions of the Academician Sakharov Park. The main causes for excessive moisture within the object are: humid climate (precipitation exceeds evaporation by 2.8 times), shallow occurrence of the aquifer confining layer, high ground water position, which leads to the formation of headwater lenses during the year. According to climatic and hydrogeological studies, prior drainage should be carried out before starting work on the construction of a drainage system. The article considers in detail the design features of the water drawdown and dewatering, as well as the stages of construction. According to calculations on dewatering in the conditions of the Academician Sakharov Park with the capacity of the drained aquifer 1.0...1.4 m, the average depth of the confining layer 2.0 ...2.3 m and trench lengths from 110 ...225 m, the time for drainage is 5...6 days, and the estimated inflow of water to the mouth of the trench is within 3.29...3.85 m³/day. To ensure effective work on dewatering from a trench with lengths of up to 225 m and with a drained aquifer capacity of up to 1.4 in the hydrogeological conditions of the territory of the Sakharov Park, it is recommended to use domestic pumping and power equipment of the «Vih» type DN-400 with a flow rate of 11.5 m³/h.

Keywords: dewatering, water drawdown, drainage, Saint-Petersburg, Academician Sakharov Park

Format of citation: Kalinichenko R.V., Semenova K.S., Kablukov O.V. Water drawdown and dewatering as a method of preliminary drainage of the territory of the park of Academician Sakharov, St. Petersburg // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 5. – P. 36-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-36-44.

The article was prepared with the support of the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the agreement No. 075-15-2021-032 of March 23, 2021 on the provision of a grant in the form of a subsidy for the creation and development of an engineering center on the basis of an educational organization of higher education and (or) a scientific organization as part of the implementation of the federal project «Development of infrastructure for scientific research and personnel training» of the national project «Science and Universities»

Введение. Парк Академика Сахарова расположен в Калининском районе, в центральной исторической части г. Санкт-Петербурга. Территория ограничена с юго-востока Пискаревским проспектом, с юга – проспектом Маршала Блюхера, с северо-запада – застройкой Замшиной улицы и Бестужевской улицей. Кадастровая площадь парка составляет 228635 м². Планировка территории регулярно-пейзажная, состоящая в основном из газонных трав и деревьев (липа, тополь, дуб, рябина и др.), куртинами размещены кустарники (барбарис, спирея, сирень, жимолость). Парк является местом культурного и активного отдыха, где проходят праздники и мероприятия.

Большая часть земель территории Санкт-Петербурга, в том числе парка Сахарова, находится в переувлажненном состоянии. На рассматриваемой территории часто фиксируется образование луж на пониженных элементах рельефа, что приводит к затоплению пешеходных дорожек и ухудшению условий произрастания газонных трав и древесно-кустарниковых

пород. Многие газоны и дорожки на протяжении всего года находятся «в воде». В результате переувлажнения страдают не только растения, но фундаменты сооружений по всему городу [1].

С целью регулирования водного режима на территории парка требуется строительство осушительной системы. Строительство осушительной сети необходимо начинать с предварительного водопонижения, то есть снижения уровня подземных вод для проведения временных строительных или ремонтных работ [2]. Поверхностное водопонижение считается самой востребованной методикой водоотвода [3]. На участке организуют систему траншей с дренами, вода просачивается через откосы, стекает в специальные водоприемные колодцы, и с помощью насосов воду откачивают в систему городской канализации. В дальнейшем данная система будет использоваться как постоянная осушительная система [4].

Цель исследований – определить причины переувлажнения территории парка,

спроектировать систему временного предварительного осушения, обеспечивающую формирование оптимального водного режима и эффективное отведение избыточных вод в период строительства осушительной системы постоянного действия в условиях парка Сахарова.

Материалы и методы исследований.

Парк располагается в Центральном подрайоне Приневского ландшафтного района и представляет собой склон южной экспозиции с перепадом высот от 16,94 до 12,40 м над уровнем моря (Балтийская система высот), вытянутой с севера на юг на 730 м. Длина участка составляет 670 м, ширина – 400 м. Абсолютная максимальная отметка – 18,19 м, абсолютная минимальная отметка – 12,02 м.

Причина переувлажнения почв парка складывается в особых климатических и гидрогеологических условиях. Климат территории умеренный, влажный, переходный от умеренно-континентального к умеренно-морскому, который находится под влиянием воздушных масс реки Невы и Балтийского моря. Годовое количество осадков в 660 мм/год превышает испаряемость на 330 мм/год, а также превышает испарение – 240 мм/год – в 2...3 раза. Это говорит об переувлажнении территории парка за счет осадков.

По составу и физико-механическим свойствам на исследуемом участке выделено 6 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Верхний слой представлен насыпными грунтами и верхнечетвертичными отложениями (озерно-ледниковые). ИГЭ-1 – насыпные грунты слежавшиеся: супеси, пески с обломками кирпичей, древесины, с растительными остатками с мощностью от 0,3 до 2,3 м, расположенные на глубине от 0,3

до 2,3 м. Насыпные грунты: пески пылеватые, супеси – сильнопучинистые и чрезмерно пучинистые. Озерно-ледниковые отложения представлены песками. ИГЭ-2 – пески мелкие средней плотности, коричневые влажные и насыщенные водой мощностью от 0,2 до 4,0 м, на глубине от 0,1 до 1,6 м. Пески мелкие – сильнопучинистые и чрезмерно пучинистые. ИГЭ-3 – пески пылеватые средней плотности, коричневые влажные и насыщенные водой с прослоями супесей на глубине от 0,8 до 2,6 м, мощностью от 0,5 до 3,6 м. Пески пылеватые – сильнопучинистые и чрезмерно пучинистые. Водоносный горизонт состоит из насыпного грунта (ИГЭ-1) и озерно-ледниковых отложений, представленных песками мелкими (ИГЭ-2) и пылеватыми (ИГЭ-3, на глубине от 0,8 до 2,6 м) общей мощностью 1,0...3,5 м [5] (рис. 1).

Относительным водупором являются озерно-ледниковые суглинки (ИГЭ-4 на глубине от 2,3 до 4,0 м) и ледниковые отложения: супеси (ИГЭ-5 на глубине от 1,8 до 4,0 м), и суглинки (ИГЭ-6 на глубине от 1,3 до 3,6 м). ИГЭ-4 – суглинки тяжелые пылеватые текучеplastичные, с прослоями мягкоplastичных, коричневатосерых ленточных тиксотропных суглинков, расположенных на глубине от 2,3 до 4,0 м, мощностью от 1,0 до 2,7 м, в основном сильно пучинистые и реже – чрезмерно пучинистые. ИГЭ-5 – супеси пылеватые пластичные серые с гравием, галькой до 5% на глубине от 1,8 до 4,0 м, мощностью от 1,0 до 2,9 м, являющиеся среднепучинистыми. ИГЭ-6 – суглинки легкие пылеватые полутвердые, серые с гравием, галькой, до 5% на глубине от 1,3 до 3,6 м, мощностью от 1,2 до 3,7 м, являющиеся слабопучинистыми [5] (рис. 1).

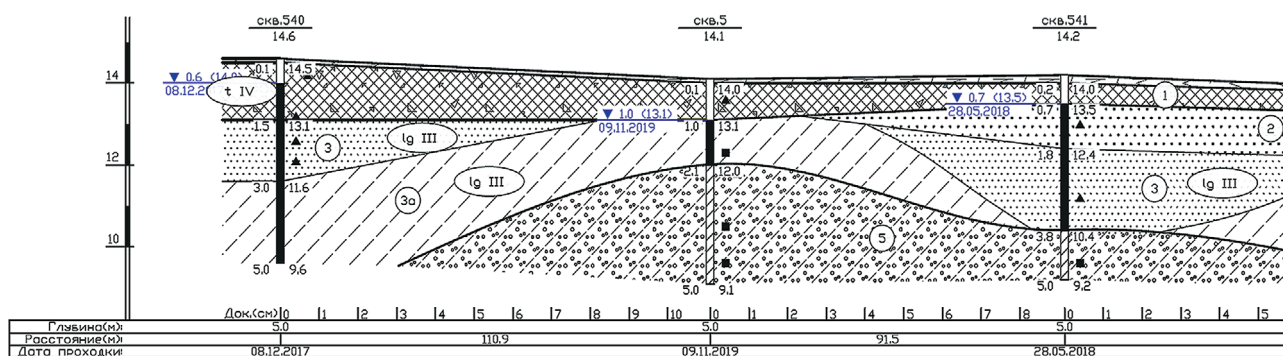


Рис. 1. Гидрогеологический разрез по скважинам 540-5-541 парка Академика Сахарова

Fig. 1. Hydrogeological section of wells 540-5-541 of the park of Academician Sakharov

- насыпные грунты: супеси, пески влажные с обломками кирпичей, древесины, растительными остатками, с глубиной 0,6 м, насыщенные водой;
- bulk soils: loams, wet sands with fragments of bricks, wood, plant residues, with a depth of 0.6 m, saturated with water;
- супеси пылеватые текучие серые с прослоями супесей;
- dusty fluid grey sandy loams with layers of loams;
- пески пылеватые средней плотности коричневые насыщенные водой с прослоями супесей;
- medium density brown dusty sands saturated with water with layers of sandy loams;
- суглинки легкие пылеватые полутвердые серые с гравием, галькой до 5%
- light pulverized semi-hard grey loams with gravel, pebbles up to 5%

Для наблюдения за режимом подземных вод были уставлены 3 наблюдательные скважины (пьезометрические) – 3,6,7. Грунтовые воды расположены в толще озерно-ледниковых отложений. Максимальное положение уровня грунтовых вод наблюдается в периоды снеготаяния и выпадения обильных осадков в середине лета и удерживается на глубине 0,54...0,72 м в зависимости от рельефа, а осенью 2019 г. уровень грунтовых вод установился на глубине 0,2...0,3 м, достигнув высокого критического. В северной части парка глубина грунтовых вод может быть выше 0,7...0,8 м от дневной поверхности. В южной части парка в периоды повышения уровня грунтовые воды могут образовывать открытую водную поверхность в понижениях рельефа.

Переувлажнению территории способствует неглубокое залегание водоупора водоносного горизонта, затрудняющего инфильтрацию атмосферных осадков вглубь разреза четвертичных отложений. В условиях высокого положения грунтовых вод и поступления обильных осадков формируется местный поверхностный сток. Во влажные периоды года происходит соединение уровня грунтовых вод и верховодки, что приводит к длительному подтоплению земель парка и фундаментов сооружений, активизируется процесс заболачивания. Тип водного питания – смешанный (грунтовый, атмосферный и, как следствие, формирования намывного типа питания). Для борьбы с переувлажнением территории парка, для понижения уровня грунтовых вод, уменьшения плотности и увеличения пористости верхних слоев почвы и грунтов требуется строительство осушительной системы [1, 4, 6, 7].

В соответствии с рекомендациями Технического отчета по инженерно-геологическим изысканиям (074-19К-ИГИ), СП 104.13330.2016, СП 116.13330.2012, СП 100.13330.2016 и рекомендаций специалистов в области осушительных мелиораций и ландшафтного строительства для территорий спортивно-оздоровительных объектов и зон рекреационного и защитного назначения (зеленые насаждения общего пользования, парки, санитарно-защитные зоны) норму осушения следует принимать равной 1 м.

В качестве способа осушения на территории парка Сахарова был выбран закрытый горизонтальный дренаж исходя из следующих соображений: дренаж находится в толще почвогрунта и не влияет на эстетическую привлекательность ландшафта; не снижает коэффициент земельного использования территории и позволяет осуществлять различные виды хозяйственных, организационных, культурных и других мероприятий на большей территории

парка (более 90%) в рамках, ограниченных архитектурно-ландшафтной композицией; не требует значительных финансовых и трудовых затрат при его эксплуатации по сравнению с открытыми осушителями (каналами). Общее топографическое состояние территории, в том числе уклон склонов, позволяет запроектировать закрытый горизонтальный дренаж с бесподпорным самотечным стоком дренажных вод.

На территориях с высоким уровнем грунтовых вод разработку траншей следует начинать с более низких мест для обеспечения стока воды и осушения вышележащих участков (СП 81.13330.2017), то есть с предварительного отвода грунтовых вод и создания системы водопонижения. Система водопонижения предусматривает сначала строительство водосборных колодцев с насосами на пониженных элементах рельефа парка, куда скапливается основной сток поверхностных и грунтовых вод на небольшом расстоянии от технологических точек сброса (колодец) городской канализационной сети, и проведение работ по водоотливу (рис. 2) [6].

Для отвода поверхностного и дренажных стоков выделены 3 точки подключения системы водопонижения к местной городской канализационной сети в виде водосборных колодцев (рис. 2) с общим максимальным расходом стока, равным 80 л/с, согласно техническим условиям ГБУ «Водоканал» г. Санкт-Петербурга. Из водосборных колодцев откачиваемая вода по водосборному трубопроводу диаметром 152 мм (толщина стенки – 4 мм) отводится в систему канализации. Водосборной трубопровод монтируется на деревянных опорах. Расстояние между опорами составляет 5,0 м. Для защиты поверхности грунтов от размыва производится крепление колодцев щебнем фракции 20...40 мм. Затем устраивают небольшие участки траншей глубиной 2 м, начиная с пониженных, и далее продвигаются выше по уклону. В траншее предусмотрена фильтрующая подсыпка из песчано-гравийной смеси (толщина слоя – 200 мм), обеспечивающая лучшую инфильтрацию вод и дренажную канавку из щебня (толщина слоя – 250 мм с уклоном 0,007) [8-10].

Для предотвращения засорения водосборного колодца дренажным стоком входные отверстия перекрываются металлической сеткой с ячейкой 5 × 5 мм. С помощью насосов воду откачивают из водоприемного колодца в систему городской ливневой канализации с обязательной предварительной очисткой воды через фильтрующий материал.

Общая протяженность водоотводной сети с водопонижением составляет 519 м. Уклон водосборного трубопровода – не менее 0,005.

решение позволяет в дальнейшем более эффективно эксплуатировать будущую дренажную сеть, а именно проводить очистку колодца и промывку дрен.

Присоединение трубы сбросного коллектора (200 мм) к водосбросному колодцу требуется производить на проектных отметках, отвечающих требованиям бесподпорного самотечного

приема воды. Проектную отметку устья сбросного коллектора в точке подключения № 1 следует принимать равной не ниже 9,50 м, в точке № 2 – не ниже 11,00 м, в точке № 3 – не ниже 10,22 м. Вертикальное сопряжение линейных элементов сети – от Д-1-3 к точке технологического подключения сети водопонижения и водоотлива с системой городской канализации № 3 (рис. 3).

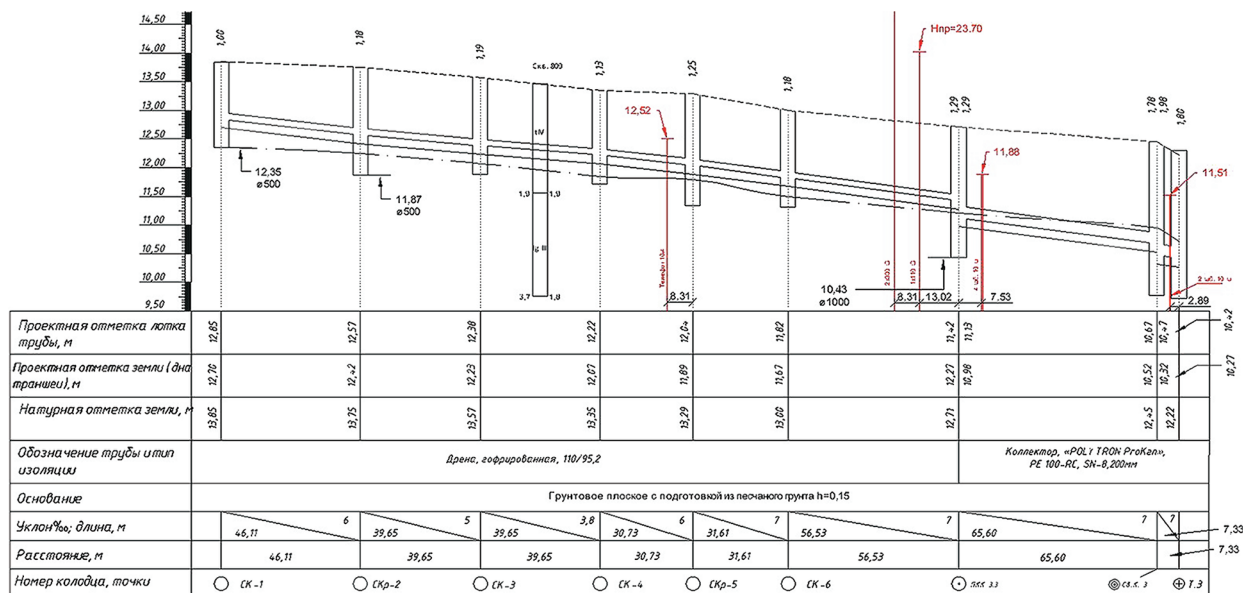


Рис. 3. Продольный профиль дрена Д-1-3-К-1-3 – точка № 3

Fig. 3. Longitudinal profile of the drain D-1-3-K-1-3-point No. 3

- – поверхность земли / the surface of the earth;
- — — — — проектная глубина траншеи / design depth of the trench;
- СК-1 – смотровой колодец / inspection chamber;
- СК-2 – смотровой колодец ревизионный / inspection revision well;
- СК-3 – приемный колодец коллектора / collector's receiving well;
- СК-4 – водосбросной колодец / spillway well;
- ⊕ Т.3 – технологическая точка № 3 / technological point No 3

Расход однолинейной горизонтальной дрены совершенного типа в безнапорном пласте определялся по преобразованной формуле Дюпюи [11]:

$$q = \frac{k \cdot H^2}{R_t}, \quad (2)$$

где q – расход дрены на единицу ее длины; H – пониженный напор в водоносном пласте; R_t – радиус депрессии в момент времени, определяемый по формуле.

Расход однолинейной горизонтальной дрены несовершенного типа в тех же условиях определялся по формуле А.В. Романова [11]:

$$q = k \left[\frac{h^2}{R_t} + \frac{2\pi(H-T)}{\ln \frac{2T}{\pi b} + \frac{\pi R_t}{2T}} \right], \quad (3)$$

где k – коэффициент фильтрации, м/сут. [12]; h – расстояние от подошвы дрены до непониженного уровня воды, м; T – расстояние от подошвы дрены до водоупора, м; b – ширина дрены, м; R_t – радиус депрессии в момент времени t , определяемый по формуле:

$$R_t = \sqrt{3 \frac{k}{\mu} \cdot H \cdot t}; \quad (4)$$

μ – коэффициент водоотдачи, μ (для определения коэффициента водоотдачи используется график зависимости коэффициента водоотдачи от коэффициента фильтрации); H – средняя мощность дренируемого водоносного пласта в начальный момент времени, м; t – принятое время от начала работы дренажа, сут., $t = 2$ сут.

Время на осушение определяется по формуле:

$$t = \frac{R_t^2}{3 \cdot S_0 \cdot \frac{k}{\mu}}, \quad (5)$$

где $S_0 = H - h_0$ – напор воды, понижаемый в канале, м; H – расстояние от подошвы дрены до непониженного уровня; h_0 – минимальное превышение от подошвы дрены до пониженного уровня воды в канале.

Расчетный приток к устью траншеи определяется по формуле:

$$Q = q \cdot L. \quad (6)$$

Время работы насоса рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{нас}} = 24 \cdot \frac{Q}{Q_i}. \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение. Применение метода водопонижения обусловлено снижением рисков прорыва подземных плывунов на водонасыщенных участках, а также с целью обеспечения общей устойчивости грунта, придания ему дополнительной прочности при проведении выемки грунта. Наиболее часто на практике применяется способ открытого водопонижения, когда в нескольких местах по площади участка устраиваются колодцы или бурятся скважины. Удаление воды из них производится при помощи наносов

с последующим отведением через дренажные каналы. В этом случае образуется устойчивая депрессионная кривая с пониженным уровнем подпочвенных вод [6].

Одним из этапов проведения мелиоративных работ является разработка траншей под прокладку проводящей сети [13] на территории парка. Сложность данного технологического процесса напрямую обусловлена физическими и водно-физическими свойствами залегаемых грунтов и высоким уровнем грунтовых вод. В связи с этим проектом предусмотрен расчет эффективно действующего водоотлива открытого типа.

Результаты расчета водоотлива и работы насосно-силового оборудования на участке строительства представлены в таблице.

Таблица

Расчет водоотлива на территории парка Академика Сахарова

Table

Calculation of drainage on the territory of the Academician Sakharov park

Параметр <i>Parameter</i>	Ед. изм. <i>Unit of measurement</i>	Технологическая точка, № <i>Technological point, No</i>		
		1	2	3
Номер скважины, соответствующей технологической точке <i>No of the technological well corr Number of the well corresponding to the technological point</i>	№	3	343	808
tIV (ИГЭ-1), мощность, м / capacity, m	м	0,9	0,4	1,5
Коэффициент фильтрации, Кф₁ <i>Coefficient of filtration, C_{f1}</i>	м/сут / m / day	2	2,0	2
IgIII (ИГЭ-2) (№ 2), мощность, м / capacity, m	м	1,1	1,9	0,8
Коэффициент фильтрации. Кф₂ <i>Coefficient of filtration, C_{f2}</i>	м/сут / m / day	2	2	2
IgIII (ИГЭ-3) (№ 3), мощность, м / capacity, m	м	1,4	2,7	1,8
Коэффициент фильтрации, Кф₃ <i>Coefficient of filtration, C_{f3}</i>	м/сут / m / day	0,02	0,02	0,015
Средний коэффициент фильтрации водосодержащей толщи, k <i>Average filtration coefficient of water-containing strata, c</i>	м/сут / m / day	2,0	2,0	2,0
Коэффициент водоотдачи, μ <i>Water efficiency coefficient, μ</i>	Доля / share	0,17	0,17	0,17
Глубина грунтовых вод до водопонижения (непониженный уровень по данным геологического отчета) <i>Depth of ground water before water draw down according to the geological report)</i>	м	0,6	1,0	0,9
Глубина залегания водоупора <i>Depth of occurrence of water confining layer</i>	м	2,0	2,3	2,3
Тип дренажа <i>Type of draining</i>		Соверш. <i>Performed</i>	Несовер. <i>Not per- formed</i>	Несовер. <i>Not per- formed</i>
Средняя мощность дренируемого водоносного пласта в начальный момент времени, Н <i>Average capacity of the drained aquifer at the initial moment in time, N</i>	М / m	1,4	1	1,1

Окончание табл. 3

Параметр <i>Parameter</i>	Ед. изм. <i>Unit of measurement</i>	Технологическая точка, № <i>Technological point, No</i>		
		1	2	3
Радиус депрессии в момент времени t , R_t <i>Radius of depression at the moment of time t, R_t</i>	м	8,40	9,94	8,40
Расстояние от подошвы дрены до водоупора, T <i>Distance from the drain sole to the confining layer, T</i>	м	0,0	0,3	0,3
Ширина траншеи по основанию, b <i>Trench width at the base, b</i>	м	0,7	0,7	0,7
Расход однолинейной горизонтальной дрены, q <i>Flow rate of single-line horizontal drain, q</i>	м ³ /сут нап.м. m ³ /day per running meter	0,39	0,45	0,50
Радиус депрессии в момент времени t , R_t <i>Radius of depression at the moment of time t, R_t</i>	м	9,94	8,40	8,81
Время на осушение, t / <i>Time for drying, t</i>	Сутки / day	5,3	6,2	5,9
Принятая длина траншеи (усредненная по отношению ко всей длине коллектора), L <i>Accepted trench length (averaged with relation to the entire length of the collector), L</i>	м	110	225	184
Расчётный приток к устью траншеи, Q <i>Estimated inflow to the mouth of the trench, Q</i>	м ³ /сут / m ³ / day	43,38	100,71	92,45
	м ³ /час / m ³ / hour	1,81	4,20	3,85
Расход насоса (Вихрь ДН-400), Q_n <i>Pump capacity (Vihr DN-400), Q_n</i>	м ³ /час / m ³ / hour	11,5	11,5	11,5
	м ³ /сут / m ³ / day	276	276	276
Время работы насоса, $t_{\text{нас}}$ <i>Time of pump operation, $t_{\text{нас}}$</i>	маш.-час./сут. mach.-hour / day	3,8	8,8	8,0

Расчет водоотлива на территории парка Академика Сахарова был проведен для трех коллекторов со средней длиной 173 м, каждый из которых соединен с технологической точкой: № 1 – совершенной дрены; № 2 и № 3 – несовершенной дрены. Установленная глубина грунтовых вод до водопонижения согласно геологическим отчетам в среднем в точке № 1 равна 0,6 м, в точке № 2–1,0 м, в точке № 3–0,9 м. Мощность дренируемого водоносного пласта после проведения водопонижения установится на глубине 1,4 м; 1 м; 1,1 м. Расчетный приток к устью траншеи составляет 43,38 м³/сут., 100,71 м³/сут., 92,45 м³/сут. соответственно по следовательности указанных скважин.

Для откачки воды используется дренажный насос Вихрь ДН-400 с максимальным расходом 11500 л/ч (276 м³/сут.) и напором до 8 м. Время, необходимое для понижения уровня грунтовых вод до проектной, соответствует 5,3 сут.; 6,2 сут.; 5,9 сут. – при непрерывной работе насоса соответственно. Стоимость строительства составила от 400 000 до 500 000 руб.

Выводы

Основными причинами избыточного увлажнения в пределах объекта являются влажный климат (осадки превышают испарение

в 2,8 раза), неглубокое залегание водоупоров водоносного горизонта и высокое положение грунтовых вод. От длительного переувлажнения парка страдают растения, активизируется процесс заболачивания. Климатические и гидрогеологические особенности территории парка Сахарова обуславливают необходимость проведения следующих мероприятий по осушению земель.

1. Проектом предусмотрена организация водоотлива открытого типа из траншей для своевременного удаления дождевых и грунтовых вод и формирования необходимого мелиоративного режима на участке перед строительством осушительной сети. Согласно сводам правил по осушению земель для территорий спортивно-оздоровительных объектов и зон рекреационного и защитного назначения (зеленые насаждения общего пользования, парки, санитарно-защитные зоны) норму осушения следует принимать равной 1 м.

2. Согласно расчетам по водоотливу в условиях парка Академика Сахарова при мощности дренируемого водоносного пласта в пределах 1,0...1,4 м, средней глубине залегания водоупора 2,0...2,3 м, длине траншей от 110...225 м время на осушение составляет 5...6 сут., а расчетный приток воды к устью траншеи находится в пределах 3,29...3,85 м³/сут.

3. Для обеспечения эффективной работы по водоотливу из траншеи с длиной до 225 м и при мощности дренируемого водоносного пласта до 1,4 в гидрогеологических

условиях территории парка Сахарова рекомендуется применять отечественное насосно-силовое оборудование типа «Вихрь» ДН-400 с расходом 11,5 м³/ч.

Библиографический список

1. Ковязин В.Ф. Инженерное обустройство территорий: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2015. – 480 с.
2. Сольский С.В., Булганин Е.В., Герасимова Е.В. Проблемы реконструкции дренажа в условиях плотной застройки // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2008. – Т. 252. – С. 27-35.
3. Давыдова Я.С., Семанина Е.П. Осушение как способ защиты от действия грунтовых вод возводимых объектов строительства при подготовке территории под застройку на насыпных грунтах // Синергия Наук. – 2016. – № 6. – С. 575-597.
4. Каблуков О.В. Эксплуатация и мониторинг систем и сооружений: учебное пособие. – М.: Спутник+, 2019. – 285 с.
5. ГОСТ 25100-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2020. – 38 с.
6. Откачка воды из котлована. Информационный портал kakfundament. – URL: <https://kakfundament.ru/kotlovan/vodootliv> (дата обращения: 23.09.2022).
7. Аверьянов С.Ф. Управление водным режимом мелиорируемых сельскохозяйственных земель / Под общ. ред. Ю.Н. Никольского. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. – 540 с.
8. Пчёлкин В.В. Осушение земель поселений: Учебное пособие. – М.: «Спутник+», 2021. – 178 с.
9. Каблуков О.В. Формирование функциональных блоков гидромелиоративных систем высокого ранга организованности // Мелиорация и водное хозяйство. – 2021. – № 5. – С. 18-24.
10. Семенова К.С., Каблуков О.В. Методика мониторинга двустороннего регулирования влажности почвы при эксплуатации инженерных мелиоративных систем // Природообустройство. – 2021. – № 4. – С. 23-30.
11. ВСН 045-72. Ведомственные строительные нормы. Указания по проектированию дренажа подземных гидротехнических сооружений. – М.: Гидропроект, 1973. – 114 с.
12. Солодухин М.А., Архангельский И.В. Справочник техника-геолога по инженерно-геологическим и гидрогеологическим изысканиям. – М.: Недра, 1982. – 288 с.
13. Semenova K.S., Kablukov O.V. Methodology for monitoring soil moisture in systems of double-acting irrigation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Т. 981. – № 2. – С. 1-7.

Критерии авторства

Калиниченко Р.В., Семенова К.С., Каблуков О.В. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 26.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

References

1. Kovyazin V.F. Inzhenernoe obustroystvo territorij. – 1-e, Novoe. – SPb: Lan', 2015. – 480 s.
2. Solskij S.V., Bulganin E.V., Gerasimova E.V. Problemy rekonstruktsii drenazha v usloviyah plotnoj zastrojki. // Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva. – 2008. – Tom 252. – S. 27-35.
3. Davydova Ya.S., Semanina E.P. Osushenie kak sposob zashchity ot dejstviya gruntovykh vod vozvodimyykh objektov stroitelstva pri podgotovke territorii pod zastroyku na nasypnykh gruntax // Sinergiya Nauk. – 2016. – № 6. – S. 575-597.
4. Kablukov O.V. Ekspluatatsiya i monitoring sistem i sooruzhenij: uchebnoe posobie. – M.: Sputnik+, 2019. – 285 s.
5. GOST 25100-2020. Mezhgosudarstvennyj standart. Grunty. Klassifikatsiya. – M.: Standartinform, 2020. – 38 s.
6. Otkachka vody iz kotlovana. Informatsionnyj portalkak fundament. URL: <https://kakfundament.ru/kotlovan/vodootliv> (Data obrashheniya: 23.09.2022).
7. Averyanov S.F. Upravlenie vodnym rezhimom melioriruemykh selskhozayajstvennykh zemel / pod obshch. red. Yu.N. Nikolskogo. – M.: Izd-vo RGAU-MSHA, 2015. – 540 s.
8. Pchelkin V.V. Osushenie zemel poselenij: uchebnoe posobie. – M.: «Sputnik+», 2021. – 178 s.
9. Kablukov O.V. Formirovanie funktsionalnykh blokov gidromeliorativnykh sistem vysokogo ranga organizovannosti // Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo. – 2021. – № 5. – S. 18-24.
10. Semenova K.S., Kablukov O.V. Metodika monitoringa dvustoronnego regulirovaniya vlazhnosti pochvy pri ekspluatatsii inzhenernykh meliorativnykh sistem // Prirodoobustroystvo. – 2021. – № 4. – S. 23-30.
11. VSN045-72. Vedomstvennye stroitelnye normy. Ukazaniya po proektirovaniyu drenazha podzemnykh gidrotehnicheskikh sooruzhenij. – M.: Gidroproekt, 1973. – 114 s.
12. Soloduhin M.A., Arhangelskij I.V. Spravochnik tehnika-geologa po inzhenerno-geologicheskim i gidrogeologicheskim izyskaniyam. – M.: Nedra, 1982. – 288 s.
13. Semenova K.S., Kablukov O.V. Methodology for monitoring soil moisture in systems of double-acting irrigation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Т. 981. – № 2. – С. 1-7.

Criteria of authorship

Kalinichenko V.V., Semenova K.S., Kablukov O.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Kalinichenko V.V., Semenova K.S., Kablukov O.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 26.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:631.432

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-45-51

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ БЛАГОПРИЯТНОСТИ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ И ПОЧВЕННО-МЕЛИОРАТИВНЫХ УСЛОВИЙ БАССЕЙНА САНЫ ДЛЯ АГРОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ ОСНОВНЫХ КУЛЬТУР

ИСАЕВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ, инженер

andisrgau@mail.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44, корп.2, Россия

Основной задачей исследований является определение агрохозяйственных требований ведущих сельскохозяйственных культур к агроклиматическим и почвенно-мелиоративным условиям для последующего выявления возможных ареалов выращивания в условиях богарного и орошаемого земледелия бассейна Саны. Обобщены имеющиеся в научных источниках данные об агрохозяйственных требованиях ведущих сельскохозяйственных культур, исследован многовековой опыт земледельцев в границах горных природно-сельскохозяйственных районов. Проведены также дополнительные исследования требований ведущих сельскохозяйственных культур к условиям окружающей природной среды бассейна Саны, в том числе продолжительности вегетационного периода, средним срокам сева и посадки, температурного и светового режима, почвенным условиям, потребности в удобрениях, чувствительности к засолению, потребности в воде, глубине корневой системы по стадиям развития. Полученные данные по агрохозяйственным требованиям ведущих сельскохозяйственных культур были сопоставлены с земельными, агроклиматическими и почвенно-мелиоративными условиями горных природно-сельскохозяйственных районов бассейна Саны. Сделаны выводы о возможных ареалах выращивания ведущих сельскохозяйственных культур в условиях богарного и орошаемого земледелия.

Ключевые слова: земельные ресурсы, агроклиматические условия, почвенно-мелиоративные условия, агрохозяйственные требования ведущих сельскохозяйственных культур к условиям окружающей среды

Формат цитирования: Исаев А.С. Оценка степени благоприятности агроклиматических и почвенно-мелиоративных условий бассейна Саны для агрохозяйственных требований основных культур // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 45-51. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-45-51.

© Исаев А.С., 2022

Original article

ASSESSMENT OF THE DEGREE OF FAVORABILITY OF AGROCLIMATIC AND SOIL-RECLAMATION CONDITIONS OF THE SANAA BASIN TO THE AGRICULTURAL REQUIREMENTS OF THE MAIN CROPS

ISAEV ANDREY SERGEEVICH, engineer

andisrgau@mail.ru

All-Russian scientific research institute of hydraulic engineering and land reclamation named after A.N. Kostyakov; 127550, Moscow, B. Akademicheskaya St., house 44, building 2. Russia

The main objective of the study is to determine the agro-economic requirements of leading agricultural crops to agro-climatic and soil-reclamation conditions, for the subsequent identification of possible areas of cultivation in the conditions of rain-fed and irrigated agriculture of the Sanaa basin. The data available in scientific sources on the agro-economic requirements of leading agricultural crops are summarized, the long-term experience of farmers within the boundaries of mountainous natural and agricultural areas is studied, and additional studies of the requirements of leading agricultural

crops to the environmental conditions of the basin of Sana'a, including the duration of the growing season, average sowing time and planting, temperature and light conditions, soil conditions, fertilizer needs, sensitivity to salinization, water needs, the depth of the root system by stages of development. The data obtained on the agro-economic requirements of the leading agricultural crops were compared with the land, agro-climatic and soil-reclamation conditions of the mountainous natural and agricultural areas of the Sanaa basin. Conclusions are drawn about possible areas of cultivation of leading agricultural crops in the conditions of rain-fed and irrigated agriculture.

Keywords: *land resources, agro-climatic conditions, soil-reclamation conditions, agro-economic requirements of leading agricultural crops to environmental conditions*

Format of citation: *Isaev A.S. Assessment of the degree of favorability of agro climatic and soil-reclamation conditions of the basin to the agricultural requirements of the main crops // Prirodoobustroystvo. – 2022. – № 5 – P. 45-51. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-45-51.*

Введение. Основной задачей исследования является определение агрохозяйственных требований ведущих сельскохозяйственных культур к условиям окружающей природной среды и сравнение полученных данных с земельными, агроклиматическими и почвенно-мелиоративными условиями горных природно-сельскохозяйственных районов бассейна Саны. В процессе работы были обобщены имеющиеся в научных источниках данные об агрохозяйственных требованиях ведущих сельскохозяйственных культур, исследован многовековой опыт земледельцев в границах горных природно-сельскохозяйственных районов, а также проведены дополнительные исследования требований ведущих сельскохозяйственных культур к условиям окружающей природной среды бассейна Саны. Полученные данные позволили определить возможные ареалы выращивания ведущих сельскохозяйственных культур в условиях богарного и орошаемого земледелия.

Агрохозяйственные требования ведущих культур бассейна Саны. Для ведущих сельскохозяйственных культур бассейна Саны определены следующие агрохозяйственные требования к условиям окружающей природной среды: продолжительность вегетационного периода, средние сроки сева и посадки, температурный режим, климатические ограничения и требования, световой режим, почвенные условия, потребность в удобрениях, чувствительность к засолению, потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС), потребность в воде, глубина корневой системы по стадиям развития. Определялась также урожайность при благоприятных условиях [1-9].

Пшеница выращивается в разнообразных климатических условиях, что объясняется коротким вегетационным периодом продолжительностью 100-160 сут. и разнообразием сортов с разными агроклиматическими требованиями. Средние сроки сева: зимой – декабрь-февраль; летом – июль-август. Оптимальная температура

воздуха для роста составляет 15-20°C, температура кущения – 10-12°C, колошения – 16-23°C, молочной спелости – 16-23°C. Необходимая сумма положительных температур воздуха за вегетацию составляет 2100-2200°C. Пшеница – наиболее устойчивая к заморозкам культура. Критическая температура начала повреждения и частичной гибели в фазу всходов составляет –9...–10°C, в фазу цветения – –1...–2°C, в фазу созревания – –2...–4°C.

Пшеница – культура длинного светового дня. Наиболее пригодны для нее плодородные структурные почвы среднего гранулометрического состава с pH = 6,0-7,5. Потребность в удобрениях за вегетационный период составляет: азот (N) – 100-150 кг/га; фосфор (P₂O₅) – 35-45 кг/га; калий (K₂O) – 25-50 кг/га. Чувствительность культуры к засолению – умеренно-устойчивая. Потеря урожая при разных уровнях удельной электропроводности (ЕС) составляет: 10% при 7,4 мСм/см; 25% при 9,5 мСм/см; 50% при 13,0 мСм/см; 100% при 20,0 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период – 450-650 мм. Глубина корней по фазам развития: всходы – 4-6 см; кущение – 40-50 см; выход в трубку – 50-60 см; колошение – 50-60 см; молочная, восковая и полная спелость – 60-70 см. Урожайность при благоприятных условиях составляет 60-70 ц/га.

Ячмень – скороспелая урожайная культура. Выращивается в разнообразных почвенно-климатических условиях, что объясняется коротким вегетационным периодом продолжительностью 85-130 сут. Средние сроки сева: зимой – декабрь-февраль, летом – июнь-август. Начинает прорастать при температуре воздуха 1-3°C. Оптимальная температура воздуха фазы прорастания составляет 15-20°C, роста – 18-23°C. Необходимая сумма положительных температур воздуха за вегетацию – 1850°C.

Ячмень – культура, наиболее устойчивая к заморозкам. Критическая температура начала повреждения и частичной гибели в фазу

всходов составляет $-7...-8^{\circ}\text{C}$, в фазу цветения $-2...-3^{\circ}\text{C}$, в фазу созревания $-2...-4^{\circ}\text{C}$. Ячмень является культурой длинного светового дня. Наиболее пригодны для него плодородные структурные почвы среднего гранулометрического состава с $\text{pH} = 6,6-7,5$, супесчаные и песчаные почвы не подходят. Потребность в удобрениях за вегетационный период: азот (N) – 80-120 кг/га; фосфор (P_2O_5) – 40-60 кг/га; калий (K_2O) – 25-40 кг/га. Чувствительность культуры к засолению – умеренно-устойчивая. Потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС): 10% при 7,4 мСм/см; 25% при 9,5 мСм/см; 50% при 13,0 мСм/см; 100% при 20,0 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период составляет 450-650 мм. Глубина корней по фазам развития: всходы – 4-6 см; кущение – 40-50 см; выход в трубку – 50-60 см; колошение – 50-60 см; молочная, восковая и полная спелость – 60-70 см. Урожайность при благоприятных условиях составляет 60-70 ц/га.

Сорго (дурра) – теплолюбивая засухоустойчивая культура. Продолжительность вегетационного периода в зависимости от сорта составляет 90-150 сут. Средние сроки сева – май-июнь. Минимальная температура роста – $16-18^{\circ}\text{C}$, оптимальная температура роста – $24-30^{\circ}\text{C}$. Минимальная температура фазы цветения – $14-15^{\circ}\text{C}$, фазы созревания – 12°C . Необходимая сумма положительных температур за вегетацию составляет 2000-2500 $^{\circ}\text{C}$.

Сорго – малоустойчивая к заморозкам культура. Критическая температура начала повреждения и частичной гибели в фазу всходов составляет $-2...-3^{\circ}\text{C}$, в фазу цветения – $-1...-2^{\circ}\text{C}$, в фазу созревания – $-1...-2^{\circ}\text{C}$. Низкие температуры воздуха могут вызвать стерильность зерна. Сорго является культурой короткого светового дня с оптимальной продолжительностью 10 ч. Наиболее пригодны для него плодородные структурные, хорошо дренированные почвы среднего гранулометрического состава с $\text{pH} = 6,5-7,5$. Потребность в удобрениях за вегетационный период: азот (N) – 100-180 кг/га; фосфор (P_2O_5) – 20-45 кг/га; калий (K_2O) – 35-80 кг/га. На производство 1 ц зерна требуется внесение в почву 2,0-2,7 кг/га азота (N); 0,7-0,6 кг/га фосфора (P_2O_5); 1,5-1,6 кг/га калия (K_2O). Чувствительность культуры к засолению – умеренно-устойчивая. Потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС): 10% при 5,1 мСм/см; 25% при 7,2 мСм/см; 50% при 11,0 мСм/см; 100% при 18,0 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период составляет 550-600 мм. Средний урожай формируется при выпадении

осадков за вегетацию 325 мм, в том числе 25 мм – в период от посева до всходов, 250 мм – в период роста, 50 мм – в период формирования зерна. Корневая система мочковатая, мощная, уходит в глубину на 2,0-2,5 м. Урожайность при благоприятных условиях составляет 40-50 ц/га.

Кукуруза на зерно – теплолюбивая культура. Продолжительность вегетационного периода для раннеспелых сортов составляет 90 сут., для среднеспелых – 105-120 сут., для позднеспелых – 135-150 сут. Средние сроки сева приходятся на май-июнь. Оптимальная температура воздуха для прорастания и дальнейшего роста составляет $20-26^{\circ}\text{C}$. Кукуруза на зерно положительно реагирует на повышение температуры воздуха до 35°C , а температура воздуха ниже 20°C препятствует созреванию. Необходимая сумма положительных температур воздуха за вегетацию раннеспелых сортов – 1800-2000 $^{\circ}\text{C}$, среднеспелых – 2000-2300 $^{\circ}\text{C}$, позднеспелых – 2300-2600 $^{\circ}\text{C}$.

Кукуруза на зерно – культура, малоустойчивая к заморозкам. Критическая температура начала повреждения и частичной гибели в фазу всходов – $-2...-3^{\circ}\text{C}$, в фазу цветения – $-1...-2^{\circ}\text{C}$, в фазу созревания – $-2...-3^{\circ}\text{C}$. Это культура длинного и короткого светового дня, более благоприятен для нее короткий световой день. Наиболее пригодны плодородные структурные, хорошо дренированные почвы легкого и среднего гранулометрического состава с $\text{pH}=6,5-7,0$. Потребность в удобрениях за вегетационный период составляет: азот (N) – 100-200 кг/га; фосфор (P_2O_5) – 50-80 кг/га; калий (K_2O) – 60-100 кг/га. На производство 1 ц зерна требуется внесение в почву 2,4 кг/га азота (N); 2,2 кг/га фосфора (P_2O_5); 3,0 кг/га (K_2O). К засолению это умеренно-чувствительная культура. Потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС): 10% при 2,5 мСм/см; 25% при 3,8 мСм/см; 50% при 5,9 мСм/см; 100% при 10 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период составляет 550-700 мм. Глубина корней по стадиям развития: всходы – 3-5 см; кущение – 30-35 см; выход в трубку – 40-50 см; выметывание – 50-60 см; созревание – 75-80 см; полная спелость – 75-80 см. Урожайность при благоприятных условиях составляет 70-100 ц/га.

Картофель выращивается в разных климатических условиях на всей территории бассейна Саны, что объясняется разнообразием сортов и их агроклиматических требований. Продолжительность вегетационного периода составляет 80-150 сут. Средние сроки сева – март-август. Оптимальная температура воздуха для прорастания – $18-20^{\circ}\text{C}$. Критическим для формирования урожая картофеля является

период от фазы цветения до фазы начала увядания ботвы, в течение которого происходит интенсивное клубнеобразование, требующее температуры воздуха 21-25°C. Необходимая сумма положительных температур воздуха за вегетацию для раннеспелых и среднеспелых сортов составляет 1400°C, для позднеспелых – 2400°C.

Картофель – малоустойчивая к заморозкам культура. Критическая температура начала повреждения и частичной гибели в фазу всходов составляет –2...–3°C, в фазу цветения –1...–2°C, в фазу созревания –1...–2°C, что сопровождается почернением и гибелью ботвы. Это культура короткого светового дня. Наиболее пригодны для нее плодородные структурные, хорошо дренированные почвы легкого гранулометрического состава с pH = 5,0-6,0. Потребность в удобрениях за вегетационный период составляет: азот (N) – 80-100 кг/га; фосфор (P₂O₅) – 50-80 кг/га; калий (K₂O) – 125-160 кг/га. Чувствительность культуры к засолению – умеренно-устойчивая. Потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС): 10% при 2,5 мСм/см, 25% при 3,8 мСм/см, 50% при 5,9 мСм/см, 100% при 10 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период составляет 550-650 мм. Глубина корней питания по стадиям развития: всходы, бутонизация – 40-50 см, цветение – 60-70 см, созревание – 60-70 см. Урожайность при благоприятных условиях составляет 350-400 ц/га.

Томаты. Продолжительность вегетационного периода составляет 90-120 сут. Средние сроки сева – апрель-июнь. Оптимальная температура воздуха для посадки – 15-20°C, для роста – 20-25°C. При температуре воздуха ниже 15°C растения не зацветают, а при 10°C приостанавливаются в росте. Необходимая сумма положительных температур воздуха за вегетацию составляет 1800-2000°C.

Томаты – малоустойчивая к заморозкам культура. Критическая температура начала повреждения и частичной гибели в фазу всходов – 0...–1°C, в фазу цветения – 0...–1°C, в фазу созревания – 0...–1°C. Томаты нечувствительны к продолжительности светового дня, хорошо растут при коротком и длинном световом дне. Наиболее пригодны для них плодородные структурные, хорошо дренированные почвы легкосуглинистого гранулометрического состава с pH = 4,5-7,0. Потребность в удобрениях за вегетационный период: азот (N) – 100-150 кг/га; фосфор (P₂O₅) – 65-110 кг/га; калий (K₂O) – 160-240 кг/га. Чувствительность культуры к засолению – умерен-

но-чувствительная. Потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС) составляет: 10% при 3,5 мСм/см; 25% при 5,0 мСм/см; 50% при 7,6 мСм/см; 100% при 12,5 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период – 650-700 мм. Основная масса корней находится в зоне 50-60 см. Урожайность при благоприятных условиях составляет 500-700 ц/га.

Лук репчатый. Продолжительность вегетационного периода составляет 135-175 сут. в зависимости от сорта. Сев осуществляется в течение года. Минимальная температура воздуха для прорастания – 5-10°C, оптимальная температура прорастания и роста – 15-25°C. Необходимая сумма положительных температур воздуха за вегетацию составляет 1500-2500°C.

Лук репчатый – среднеустойчивая к заморозкам культура. Критическая температура начала повреждения и частичной гибели в фазу всходов составляет –2...–5°C. Это культура длинного светового дня. Наиболее пригодны для нее плодородные структурные почвы легкого и среднего гранулометрического состава с pH = 5,5-7,0. Лучшие почвы – песчаные, с влажным поверхностным горизонтом. Потребность в удобрениях за вегетационный период составляет: азот (N) – 60-100 кг/га; фосфор (P₂O₅) – 25-45 кг/га; калий (K₂O) – 45-80 кг/га. Лук репчатый – чувствительная к засолению культура. Потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС) составляет: 10% при 1,8 мСм/см; 25% при 2,8 мСм/см; 50% при 4,3 мСм/см; 100% при 7,5 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период – 350-550 мм. Основная масса корней находится в зоне 20-30 см. Урожайность при благоприятных условиях на богаре составляет 300-400 ц/га.

Арбуз. Продолжительность вегетационного периода составляет 100-150 сут. Средние сроки сева – март-май. Минимальная температура воздуха для прорастания семян – 16-17°C. Оптимальная температура роста – 22-30°C. Необходимая сумма положительных температур воздуха за вегетацию составляет 3000-3500°C.

Арбуз является неустойчивой к заморозкам культурой. Критическая температура начала повреждения и частичной гибели в фазу всходов – –0,5...–1°C; в фазу цветения – –0,5...–1°C; в фазу созревания – –0,5...–1°C. К продолжительности дня культура нечувствительна. Наиболее пригодны для нее плодородные структурные почвы легкого гранулометрического состава (супеси, легкие суглинки) с pH = 5,8-7,2. Потребность в удобрениях за вегетационный период: азот (N) – 80-100 кг/га; фосфор (P₂O₅) – 25-65 кг/га; калий (K₂O) – 35-80 кг/га.

Арбуз – умеренно-чувствительная к засолению культура. Потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС): 10% при 3,3 мСм/см; 25% при 4,4 мСм/см; 50% при 6,3 мСм/см; 100% при 10,0 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период составляет 400-600 мм. Глубина корней по стадиям развития: всходы – 6-10 см; цветение – 50-60 см; созревание плодов – 60-70 см. Основной корень достигает глубины 3-5 м. Урожайность при благоприятных условиях на богаре составляет 200-250 ц/га, при орошении – 450-550 ц/га.

Люцерна – кормовая высокоурожайная культура орошаемого севооборота. Продолжительность вегетационного периода составляет 365 сут. Сев осуществляется в течение года. **Хорошо переносит низкие температуры зимой и высокие температуры летом, а также воздушную засуху в течение вегетации, кроме периода формирования репродуктивных органов.** Культура является теплолюбивой: прорастать начинает при температуре воздуха 2-3°C, оптимальная температура воздуха для роста и формирования урожая сена одного укоса – 20-26°C. **Продолжительность периода между укосами составляет 25-50 сут. Для формирования урожая сена одного укоса требуется 500-600°C.** Критическая температура начала повреждения и частичной гибели в фазу всходов – -3...-6°C.

Люцерна – культура длинного светового дня. Наиболее пригодны для нее плодородные структурные, хорошо дренированные почвы легкого гранулометрического состава с pH = 6,5-7,5. **Высокая способность поглощать из почвы питательные вещества и усваивать азот из воздуха способствует тому, что люцерна нетребовательна к плодородию почвы.** Потребность в удобрениях за вегетационный период составляет: азот (N) – 0-40 кг/га; фосфор (P₂O₅) – 55-65 кг/га; калий (K₂O) – 75-100 кг/га. К засолению культура умеренно-чувствительная. Потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС): 10% при 3,4 мСм/см; 25% при 8,8 мСм/см; 50% при 10,0 мСм/см; 100% при 15,5 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период составляет 600-1000 мм. Люцерна требовательна к влажности почвы, так как расходует значительное количество влаги на физиологическое испарение (транспирацию). При урожае сена 100 ц/га она потребляет влаги до 6000-7000 м³/га. Корни в первый год жизни проникают на глубину 2-3 м, в последующие годы достигают 8-10 м. Урожайность сена за вегетацию при благоприятных условиях составляет 200-250 ц/га.

Виноград. Продолжительность вегетационного периода – 180-240 сут. Средняя температура начала роста составляет около 10°C и не меняется в зависимости от сорта. Оптимальная температура роста – 20-25°C. Виноград устойчив к морозу до -18°C в состоянии покоя, но в период роста предпочитает продолжительное теплое (жаркое) сухое лето. Критические температуры, вызывающие повреждение генеративных органов винограда: распутившиеся почки – -1°C; цветки – 0°C; закрытые бутоны – -4°C. **Понижение температуры воздуха до -1...-2°C в начале вегетации вызывает повреждение распутившихся почек, верхушек побегов и соцветий, что не приводит к гибели виноградных кустов, но значительно снижает урожай текущего года. Понижение температуры до 4-5°C в период созревания урожая не вызывает повреждений культуры.**

Виноград – культура длинного светового дня. Наиболее пригодны для него плодородные структурные почвы легкого гранулометрического состава с pH = 6,0-7,5. Потребность в удобрениях за вегетационный период составляет: азот (N) – 100-160 кг/га; фосфор (P₂O₅) – 40-60 кг/га; калий (K₂O) – 160-230 кг/га. Виноград является умеренно-чувствительной к засолению культурой. Потеря урожая при разных уровнях электропроводности (ЕС) составляет: 10% при 2,5 мСм/см; 25% при 4,1 мСм/см; 50% при 6,7 мСм/см; 100% при 12,0 мСм/см. Потребность в воде за вегетационный период – 400-600 мм. Корневая система находится в зоне 2-3 м. Основная масса корней находится на глубине 1 м, отдельные корни достигают глубины 2-3 м. Урожайность при особо благоприятных условиях составляет 150-300 ц/га.

В результате сопоставления биоэкологических требований с агроклиматическими ресурсами природно-сельскохозяйственных районов установлены благоприятные периоды возделывания культурных растений при орошении и возможное количество урожаев в году (табл.). В качестве благоприятного периода для возделывания той или иной культуры принят период, в течение которого складываются наиболее подходящие температурные условия и отсутствуют критические значения заморозков. Из данных таблицы следует, что при орошении на половине площади пахотнопригодных земель горных природно-сельскохозяйственных районов А, В, С климатические условия позволяют получить два урожая основных полевых культур [1-9].

Таблица
Благоприятные периоды возделывания культурных растений при орошении [10]
Table

Favorable periods of cultivation of cultivated plants during irrigation [10]

Культуры и требуемая сумма положительных температур воздуха <i>Cultures and the required amount of positive air temperatures</i>	Горный природно-сельскохозяйственный район <i>Mountainous natural and agricultural area</i>	Благоприятный период возделывания культур <i>Favorable period of cultivation of crops</i>	Сумма положительных температур за благоприятный период. °С <i>The sum of positive temperatures for a favorable period</i>	Продолжительность вегетации культур, сут <i>Duration of vegetation of crops, day</i>	Возможное количество урожаев в год <i>Possible number of harvests per year</i>
Ячмень <i>Barley</i> 1850-2100°C	A	I-XII	6825	85-120	2
	B, C	II-X	4930	95-120	2
		III-IX	3570	105-130	1
	E	III-IX	3300	115-130	1
Пшеница <i>Wheat</i> 2100-2500°C	A	I-XII	6825	100-130	2
	B, C	II-X	4930	100-135	2
		III-IX	3570	140-145	1
	E	III-IX	3300	150-160	1
Сорго (дурра) <i>Sorghum (Durra)</i> 2000-2500°C	A	I-XI	6370	100-140	2
	B, C	III-IX	4020	100-140	2
		IV-IX	3115	115-145	1
	E	V-IX	2450	125-150	1
Кукуруза <i>Mais</i> 1800-2600°C	A	I-XI	6370	90-135	2
	B, C	III-IX	4020	100-135	2
		IV-IX	3115	110-140	1
	E	V-IX	2450	120-150	1
Томаты <i>Tomatoes</i> 1800-2000°C	A	II-X	5450	90-110	2-3
	B, C	III-IX	4020	100-110	2
		IV-IX	3115	100-120	1
	E	V-IX	2450	110-120	1
Картофель <i>Potatoes</i> 1400-2400°C	A	III-X	4980	80-120	2
	B, C	III-IX	4020	85-130	2
		IV-IX	3115	90-150	1
	E	V-IX	2450	90-150	1
Виноград <i>Grapes</i> 2100-3500°C	A	II-XI	5900	190-220	1
	B, C	III-X	4500	220-240	1
		IV-IX	3115	180	1
	E	Возможность возделывания ограничена из-за недостатка температур <i>Cultivation is limited due to lack of temperatures</i>			
Люцерна <i>Alfalfa</i> 500-600°C	A	I-XII	6825	25-35	11-14
	B, C	I-XII	6175	30-40	10-11
		I-XII	5475	30-45	9-10
	E	I-XII	5075	30-50	8-10

Примечание. Для люцерны приводится сумма температур, необходимая для отрастания одного укоса, периоды отрастания и количество укосов зелёной массы за год.

Note. For alfalfa, the sum of the temperatures required for the regrowth of one mowing, the periods of regrowth and the number of mowing of the green mass per year are given.

Анализируя рассматриваемый материал, можно сделать вывод о благоприятном с точки зрения развития сельскохозяйственных культур почвенно-климатическом режиме бассейна Саны.

Земельные ресурсы, почвенно-мелиоративные и агроклиматические условия бассейна Саны позволяют выращивать разнообразные сельскохозяйственные культуры. При этом

земельные и термические ресурсы намного превышают возможности их использования, так как практически во всех районах ограничены водные ресурсы.

Кратковременные незначительные осадки редкой повторяемости позволяют вести только рискованное земледелие с гарантированным урожаем один раз в 3-4 года.

Выводы

Земельные, агроклиматические и почвенно-мелиоративные условия бассейна Саны благоприятны для выращивания ведущих сельскохозяйственных культур

Библиографический список

1. Методическое руководство по агроэкологической оценке земель, проектированию адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Под ред. акад. РАСХН В.И. Кирюшина, акад. РАСХН А.Л. Иванова. – М.: РГАУ-МСХА, 2005. – 741 с.
2. Классификация почв и агроэкологическая типология земель: учебное пособие для вузов / автор-составитель В.И. Кирюшин. – Изд. 3-е, стер. – СПб.: Лань, 2021. – 284 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/152447> (дата обращения: 09.12.2021).
3. Кирюшин В.И., Кирюшин С.В. Агротехнологии: учебник. – СПб.: Лань, 2021. – 464 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/168811> (дата обращения: 09.12.2021).
4. Ступин Д.Ю. Влияние изменения климата на агроэкологические системы: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2020. – 224 с.
5. Глухих М.А. Системы земледелия и их развитие: Учебное пособие для вузов. – СПб.: Лань, 2021. – 116 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/176857> (дата обращения: 09.12.2021).
6. Юлусhev И.Г. Почвенно-агрохимические основы адаптивно-ландшафтной организации систем земледелия ВКЗП: учебное пособие. – М.: Академический Проект, 2020. – 368 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/132243> (дата обращения: 09.12.2021).
7. Адаптивное растениеводство: учебное пособие для вузов / В.Н. Наумкин, А.С. Ступин, Н.А. Лопачев и др. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2021. – 356 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/183107> (дата обращения: 09.12.2021).
8. Растениеводство: учебник для вузов / В.Е. Ториков, Н.М. Белоус, О.В. Мельникова, С.В. Артюхова; Под общ. ред. В.Е. Торикова. – СПб.: Лань, 2020. – 604 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/147326> (дата обращения: 09.12.2021).
9. Медведев Г.А., Ципляев А.Н. Бахчеводство: учебник для вузов. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2021. – 192 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/154402> (дата обращения: 09.12.2021).
10. Схема использования водных ресурсов бассейна Саны. – Кн. 1-5. – М.: Мосгипроводхоз, 1986.

Критерии авторства

Исаев А.С. выполнил теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись, имеет на статью авторское право и несёт ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 21.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

практически на всей его территории. При этом земельные и термические ресурсы намного превышают возможности их использования ввиду ограниченности подземных водных ресурсов и незначительных осадков.

References

1. Metodicheskoe rukovodstvo po agroekologicheskoy otsenke zemel, proektirovaniyu adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya i agrotehnologii. Pod redaktsiej akademika RASHN V.I. Kiryushina, akademika RASHN A.L. Ivanova. – M.: RGAU-MSHA, 2005. – 741 s.
2. Klassifikatsiya pochv i agroekologicheskaya tipologiya zemel: uchebnoe posobie dlya vuzov / avtor-sostavitel V.I. Kiryushin. izd., 3-e ster. – SPb.: Lan, 2021. – 284 s. ISBN978-5-8114-6790-7. Tekst: elektronnyy // Lan: elektronno-bibliotchnaya sistema. – URL: <https://e.lanbook.com/book/152447> (data obrashcheniya: 09.12.2021). – Rezhim dostupa: dlya avtoriz. polzovatelej.
3. Kiryushin V.I., Kiryushin S.V. Agrotehnologii: uchebnik. – SPb.: Lan, 2021. – 464 s. ISBN978-5-8114-1889-3. Tekst: elektronnyy // Lan: elektronno-bibliotchnaya sistema. – URL: <https://e.lanbook.com/book/168811> (data obrashcheniya: 09.12.2021). – Rezhim dostupa: dlya avtoriz. polzovatelej.
4. Stupin D.Yu. Vliyanie izmeneniya klimata na agroekologicheskie sistemy: uchebnoe posobie. – SPb.: Lan, 2020. – 224 s. ISBN978-5-8114-4198-3. Tekst: elektronnyy // Lan: elektronno-bibliotchnaya sistema. URL: – rezhim dostupa: dlya avtoriz. polzovatelej.
5. Gluhikh M.A. Sistemy zemledeliya i ih razvitiye: uchebnoe posobie dlya vuzov. – SPb.: Lan, 2021. – 116 s. ISBN978-5-8114-7691-6. Tekst: elektronnyy // Lan: elektronno-bibliotchnaya sistema. URL: <https://e.lanbook.com/book/176857> (data obrashcheniya: 09.12.2021). Rezhim dostupa: dlya avtoriz. polzovatelej.
6. Yulushev I.G. Pochvenno-agrohimicheskie osnovy adaptivno-landshaftnoj organizatsii sistem zemledeliya VKZP: uchebnoe posobie. – M.: Akademicheskij Proekt, 2020. – 368 s. ISBN978-5-8291-3014-5. Tekst: elektronnyy // Lan: elektronno-bibliotchnaya sistema. URL: <https://e.lanbook.com/book/132243> (data obrashcheniya: 09.12.2021). Rezhim dostupa: dlya avtoriz. polzovatelej.
7. Adaptivnoe rastenievodstvo: uchebnoe posobie dlya vuzov / V.N. Naumkin, A.S. Stupin, N.A. Lopachev [i dr.]. / 3-e izd., ster. – SPb.: Lan, 2021. – 356 s. ISBN978-5-8114-8894-0. Tekst: elektronnyy // Lan: elektronno-bibliotchnaya sistema. URL: <https://e.lanbook.com/book/183107> (data obrashcheniya: 09.12.2021). Rezhim dostupa: dlya avtoriz. polzovatelej.
8. Rastenievodstvo: uchebnik dlya vuzov / V.E. Torikov, N.M. Belous, O.V. Melnikova, S.V. Artyuhova; pod obshchej redaktsiej V.E. Torikova. – SPb.: Lan, 2020. – 604 s. ISBN978-5-8114-4744-2. Tekst: elektronnyy // Lan: elektronno-bibliotchnaya sistema. URL: <https://e.lanbook.com/book/147326> (data obrashcheniya: 09.12.2021). Rezhim dostupa: dlya avtoriz. polzovatelej.
9. Medvedev G.A., Tsipliyayev A.N. Bahchevodstvo: uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., ster. – SPb.: Lan, 2021. – 192 s. ISBN978-5-8114-7064-8. Tekst: elektronnyy // Lan: elektronno-bibliotchnaya sistema. URL: <https://e.lanbook.com/book/154402> (data obrashcheniya: 09.12.2021). – Rezhim dostupa: dlya avtoriz. polzovatelej.
10. Skhema ispolzovaniya vodnykh resursov bassejna Sany. Kn. 1-5. – M.: Mosgiprovodhoz, 1986.

Criteria of authorship

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

The article was submitted to the editorial office 21.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

2.1.6. Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 502/504: 626.814(470.620)

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-52-59

БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ДОЛИНЫ РЕКИ ПСЕКУПС С УЧЕТОМ ИЗМЕНИВШИХСЯ ВО ВРЕМЕНИ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ

ВОЛОСУХИН ВИКТОР АЛЕКСЕЕВИЧ , д-р техн. наук, профессор
director@ibgts.ru

БАНДУРИН МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ, д-р техн. наук, доцент,
декан факультета гидромелиорации
chepura@mail.ru

ПРИХОДЬКО ИГОРЬ АЛЕКСАНДРОВИЧ , канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой
prihodkoigor2012@yandex.ru

ВЕРБИЦКИЙ АРТЕМ ЮРЬЕВИЧ, студент 1 курса магистратуры
trd.uncle@yandex.ru

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия

Использованы геофизические исследования оградительной плотины долины р. Псекупс, позволившие уточнить границы инженерно-геологических элементов грунтов, определить динамические свойства плотины и основания, которые использованы при расчете оградительной плотины на сейсмические нагрузки. Следует отметить, что уровень воды в Краснодарском водохранилище существенно меняется в течение года. Минимальное значение его приходится, как правило, на осенне-зимний период, а максимальное – на весенний период. Это существенно влияет на величину фильтрационного расхода через тело оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс и на положение кривой депрессии. Основная цель исследований – обосновать устойчивость оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс после продолжительной эксплуатации и в связи с увеличением нормативной сейсмичности территории. Установлено, что расхождение одного из первых приближенных методов расчета устойчивости откосов по В. Фелениусу с выполненными в ходе проведенного исследования находится в пределах ошибки исходных данных, полученных в полевых условиях. Выполнено сопоставление результатов расчета с помощью программного комплекса, с использованием четырех наиболее признанных в научных, проектных и строительных организациях России методов: метода Крея, метода Терцаги, метода ВНИИГ, метода Можжевитинова и метода по СП 39.13330.2012.

Ключевые слова: водохозяйственный комплекс, устойчивость оградительной плотины, Краснодарское водохранилище, климатические изменения, математическое моделирование

Формат цитирования: Волосухин В.А., Бандурин М.А., Приходько И.А., Вербицкий А.Ю. Безопасность сооружений инженерной защиты долины реки Псекупс с учетом изменившихся во времени нагрузок и воздействий // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 52-59. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-52-59.

© Волосухин В.А., Бандурин М.А., Приходько И.А., Вербицкий А.Ю., 2022

Original article

SAFETY OF ENGINEERING PROTECTION FACILITIES OF THE PSEKUPS RIVER VALLEY, TAKING INTO ACCOUNT TIME-VARYING LOADS AND IMPACTS

VOLOSUKHIN VICTOR ALEKSEEVICH[✉], *doctor of technical sciences, professor*
director@ibgts.ru

BANDURIN MIKHAIL ALEKSANDROVICH, *doctor of technical sciences, associate professor, dean of the faculty of hydro reclamation*
chepura@mail.ru

PRIKHODKO IGOR ALEKSANDROVICH[✉], *candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of construction and operation of water management facilities*
prihodkoigor2012@yandex.ru

VERBITSKY ARTEM YURIEVICH, *student of the 1st MA course*
trd.uncle@yandex.ru

Kuban state agrarian university named after I.T. Trubilin; 350044, Krasnodar, Kalinina str.13., Russia

The article uses geophysical studies of the protective dam of the valley of the river Psekups, which made it possible to clarify the boundaries of engineering-geological soil elements and determine the dynamic properties of the dam and foundation, which were used in the calculation of the barrier dam for seismic loads. It should be noted that the water level in the Krasnodar reservoir varies significantly throughout the year; its minimum value, as a rule, occurs in the autumn-winter period, and the maximum – in the spring, this significantly affects the value of seepage flow through the body of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the river Psekups and on the position of the depression curve. The main purpose of the work is to substantiate the stability of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the river Psekups after a long operation and due to an increase in the normative seismicity of the territory. It is established that the discrepancy of one of the first approximate methods for calculating the stability of slopes according to V. Felenius with those performed in the course of the study are within the error of the initial data obtained in the field a comparison of the calculation results using a software package using the four most recognized methods in scientific, design and construction organizations in Russia – the Cray method, the Terzaghi method, the VNIIG method, the Mozhevitinov method and the method according to SP 39.13330.2012 -was carried out.

Keywords: *water management complex, barrier dam stability, Krasnodar reservoir, climate change, mathematical modeling*

Format of citation: Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Verbitsky A.Yu. *Safety of the engineering protection facilities of the Psekups river valley taking into account time-varying loads and impacts // Prirodobustroystvo. – 2022. – No. 5. – P. 52-59. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-52-59.*

Введение. На территории Республики Адыгея расположены дамбы обвалования и берегоукрепительных сооружений, входящие в систему противопаводковой защиты Нижней Кубани [1-3], протяженностью 60 км. Отличительная особенность оградительных дамб Юга России – отсутствие установленной в них контрольно-измерительной аппаратуры в период строительства, что не позволяет оценить их реальное напряженно-деформированное состояние. Обследование таких сооружений проводится, как правило, визуально и не в период сложных работ сооружения при наихудших сочетаниях постоянных, временных, кратковременных и особых нагрузок и воздействий [4, 7].

В связи со значительным периодом эксплуатации (30-40 и более лет)

сооружений III и IV классов, увеличением нормативной сейсмичности территории согласно СНКК 22-301-2000 (приложение Б по ОСП-97-С – 1%) сейчас, в 2022 г., она составляет 8 баллов [5]. Также, в связи с возрастающим стоком рек (по данным Росгидромета расход рек малой обеспеченности юга России к 2030 г. возрастет на 14% по сравнению с 2000 г.), актуальным и своевременным является проведение расчетных исследований устойчивости длительно эксплуатирующихся оградительных дамб Краснодарского водохранилища, в том числе в долине реки Псекупс, с учетом изменившихся сейсмических воздействий, на основе современных методов расчета, с использованием программного комплекса «УСТОЙЧИВОСТЬ», для обеспечения

надежности и в то же время – экономичности проектных решений [6-8].

Основная цель исследований – выполнение расчетного обоснования устойчивости оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс после 40 лет ее эксплуатации и в связи с увеличением нормативной сейсмичности территории [9-11].

Материалы и методы исследований. Исследуемый участок инженерной защиты долины р. Псекупс расположен на левом берегу Краснодарского водохранилища в 4,0-8,5 км от основной грунтовой плотины. Общая протяженность оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине реки Псекупс составляет 5,7 км. Характеристика плотины: коэффициент $m_b = 3,5$; высота $h_{max} = 11,5$ м; ширина гребня – 8 м; отметка верха (абсолютная) – 37,2 м. Крепление дамбы железобетонными плитами $h = 16-25$ см верхнего откоса с задернованным нижним откосом $m_n = 3,5$ (рис. 1) [12, 13].



Рис. 1. Оградительная плотина инженерной защиты долины р. Псекупс (фото авторов, сентябрь 2022 г.)

Fig. 1. Barrier dam of engineering protection of the valley of the r. Psekups (the author's photo, September 2022)

Расчет устойчивости оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс выполнен с использованием программного комплекса «УСТОЙЧИВОСТЬ» [14, 15].

С целью научного обоснования наименьших значений запасов устойчивости откосов плотины на статические и сейсмические нагрузки взяли два расчетных случая:

♦ I вариант. Уровень воды в Краснодарском водохранилище на НПУ = 32,75, сейсмичность – по СН КК 22-301-2000 «Строительство в сейсмических районах Краснодарского края» и СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах».

♦ II вариант. Уровень воды в Краснодарском водохранилище находится на уровне ФУ = 35,23, сейсмические нагрузки отсутствуют.

Все расчеты выполнены для 8 створов (II-II', ПК 6 + 2,15; III-III', ПК 13 + 00; IV-IV',

ПК 20 + 30,48; V-V', ПК 26 + 00,35; VI-VI', ПК 32 + 21,61; VII-VII', ПК 40 + 3,49; VIII-VIII', ПК 49 + 93,09; IX-IX', ПК 56 + 65,13). Расчет откосов оградительной дамбы Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс осуществлялся методами Крея, Терцаги, ВНИИГ (усовершенствованный метод Терцаги, метод ВНИИГ-Терцаги), методом, рекомендованным в СП 39.13330.2012 (для круглоцилиндрических поверхностей сдвига).

Нами использованы данные отчета о натурных геофизических исследованиях оградительной плотины долины р. Псекупс [16], позволившие уточнить границы инженерно-геологических элементов грунтов и определить динамические свойства плотины и основания, которые использованы при расчете оградительной плотины на сейсмические нагрузки [17].

На рисунке 2 представлено изображение дамбы. Будем считать, что тело дамбы состоит из идеально сыпучего грунта с уложенным верховым откосом α .

Вес частицы $F = mg$ раскладываем на две составляющие (нормальную N к линии откоса АВ и касательную T) и учитываем, что на верховом откосе дамбы расположена твердая частица.

В расчетах придерживаемся условия того, что сила T стремится сдвинуть части к подножью откоса, но ей будет противодействовать сила трения T' пропорционально нормальному давлению, то есть

$$T' = f \cdot N = tg\phi \cdot N,$$

где $f = tg\phi$ является коэффициентом трения.

Проектируя действующие силы на грань АВ, имеем:

$$T - T' = 0; F \cdot \sin \alpha - tg\phi \cdot N = 0;$$

$$F \cdot \sin \alpha - tg\phi \cdot F \cdot \cos \alpha = 0.$$

Отсюда

$$tg\alpha = tg\phi.$$

В итоге получим

$$\alpha = \phi.$$

В результате установлено равенство между углами внутреннего трения грунта и откосом сыпучих грунтов. Такой угол называется углом естественного откоса [2].

Согласно методике [3] в наших исследованиях по безопасности сооружений инженерной защиты долины реки Псекупс, с учетом изменившихся во времени нагрузок и воздействий, принимаем угол $\alpha = \phi_1 = 18^\circ$, то есть $m_b = ctg\phi_1 = ctg18^\circ = 3,0$, $m_n = 3,0$.

На обоснование устойчивого угла верхового и низового откосов влияют как угол естественного откоса (ϕ), так и сцепление (c).

Уравнение III. Кулона:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi,$$

где c – удельная сила сцепления, σ – нормальное напряжение, ϕ – угол трения, τ – касательная напряжения.

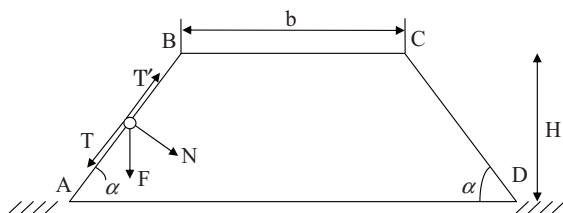


Рис. 2. Дамба из идеально сыпучего грунта

Fig. 2. A dam made of perfectly loose soil

В грунтовом массиве одновременно возникает семейство поверхностей предельного равновесия, по которой возможен сдвиг, и задача заключается в отыскании наиболее опасной.

Приведем решение задачи для ограды Каспийского водохранилища в долине р. Псекупс для двух створов: для максимальной высоты плотины $H = 11,5$ м; для расчетного створа II – II' (ПК 6 + 2,5).

Исходные данные приняты по материалам натурных исследований плотины.

Расчет для створа с максимальной высотой дамбы:

$$H = 11,5 \text{ м.}$$

Коэффициент запаса устойчивости откоса:

$$k = 1,0, \gamma = 20,1 \text{ кН/м}^3;$$

$$c_1 = 27 \text{ кПа}, \phi_1 = 18^\circ.$$

Расчетные параметры:

$$b = \operatorname{tg} \phi_1 = \operatorname{tg} 18^\circ = 0,3249; d = c = 27 \text{ кПа};$$

$$\zeta_0 = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_1}{c} \right) = \operatorname{tg}^2 36^\circ = 0,5278;$$

$$P_0 = \frac{2d}{\sqrt{\zeta_0}} = \frac{2 \cdot 27}{\sqrt{0,5278}} = 74,32 \text{ кПа};$$

$$h_0 = \frac{P_0}{\gamma} = \frac{74,32}{20,1} = 3,698 \text{ м};$$

$$H_0 = \frac{H - h_0 \zeta_0}{1 - \zeta_0} = \frac{11,5 - 3,698 \cdot 0,5278}{1 - 0,5278} = 20,22 \text{ м};$$

$$\zeta = \zeta_0 \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right) = 0,5278 \left(1 - \frac{3,698}{20,22} \right) = 0,4313;$$

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{1 - \zeta}{2\sqrt{\zeta}} = \frac{1 - 0,4313}{2\sqrt{0,4313}} = 0,4329; m = \operatorname{ctg} \omega = 2,30.$$

Откос будет устойчивым при $m = 2,30$, что является близким к рекомендациям строительных норм 1962 г.

Расчет для створа II-II' (ПК 6 + 2,5):

$$H_0 = \frac{H - h_0 \cdot \zeta_0}{1 - \zeta_0} = \frac{6,76 - 3,698 \cdot 0,5278}{1 - 0,5278} = 10,18 \text{ м};$$

$$\zeta = \zeta_0 \left(1 - \frac{h_0}{H} \right) = 0,5278 \left(1 - \frac{3,698}{10,18} \right) = 0,3362;$$

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{1 - \zeta}{2\sqrt{\zeta}} = \frac{1 - 0,3362}{2\sqrt{0,3362}} = 0,5724; m = \operatorname{ctg} \omega = 1,75.$$

Получена величина устойчивого откоса при коэффициенте запаса, составляющая 1,0.

Из приведенного следует, что расхождение одного из первых приближенных методов расчета устойчивости откосов В. Фелениуса (1927 г.) с самыми последними (2022 г.) численными расчетами находится в пределах ошибки исходных данных, полученных в полевых условиях.

Результаты и их обсуждение. Следует обратить внимание на одну особенность при сопоставлении результатов расчета. Используя тот или иной метод расчета устойчивости, необходимо найти минимальное значение коэффициента запаса устойчивости откоса. Это требует проведения расчетов для минимум 5-7 случаев («ручной» счет) или же от 500 до 1000 при расчете на ЭВМ.

На рисунке 3 представлено сопоставление результатов расчета с помощью программного комплекса «УСТОЙЧИВОСТЬ», с использованием четырех наиболее признанных в научных, проектных и строительных организациях России методов: Крея, Терцаги, ВНИИГ и метода по СП 39.13330.2012.



Рис. 3. Расчет минимального коэффициента устойчивости

низового откоса плотины

методом Крея (Бишопа): $k_{\min} = 1,3401$

Fig. 3. Calculation of the minimum coefficient of stability of the downstream slope of the dam by the Cray (Bishop) method $k_{\min} = 1.3401$

Фактические отметки отличаются от проектных. Так, в расчетном створе ПК 6 + 2,15 отметка верха плотины составляет 37,68; в створе ПК 20 + 30,48-37,11; в створе ПК 32 + 21,61-37,29; в створе ПК 40 + 3,49-37,22; в створе ПК 49 + 93,09-37,39; в створе ПК 56 + 65,13-37,33.

Заложение верхового откоса:

по разрезу II-II' $m_b = 3,2$;

по разрезу III-III' $m_b = 3,1$;

по разрезу IV-IV' $m_b = 3,6$;
 по разрезу V-V' $m_b = 3,5$;
 по разрезу VI-VI' $m_b = 3,6$;
 по разрезу VII-VII' $m_b = 3,6$.
 Заложение низового откоса:
 по разрезу II-II' $m_n = 3,0$;
 по разрезу III-III' $m_n = 3,3$;
 по разрезу IV-IV' $m_n = 3,9$;
 по разрезу V-V' $m_n = 4,2$;
 по разрезу VI-VI' $m_n = 3,8$;
 по разрезу VII-VII' $m_n = 4,9$.

Существенно изменяется высота ограждающей дамбы Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс. В программный комплекс «УСТОЙЧИВОСТЬ» вводились параметры расчетных створов, геологическое строение плотины и основания по результатам натурных инженерно-геодезических работ.

На рисунке 4 представлены расчетные схемы для варианта I.

В результате бурения 16 скважин диаметром 132 мм глубиной до 25 м буровой установкой УГБ-1ВС отобрано 50 монолитов с ненарушенной структурой и 24 пробы

с нарушенной структурой. В результате лабораторных исследований проведено 6 определений, включающих в себя полный комплекс физико-механических свойств грунтов с компрессией и срезом по нормативным документам, и 41 определение, включающее в себя сокращенный комплекс вычисления физико-механических свойств грунтов со срезом.

Проведенные лабораторные исследования позволили выделить 9 инженерно-геологических элементов (ИГЭ) грунтов и получить нормативные и расчетные значения (при $\alpha_{II} = 0,85$ и $\alpha_I = 0,95$) параметров физико-механических свойств глинистых и песчаных грунтов.

На рисунке 5 представлены примеры ввода физико-механических свойств грунтов по разрезу II-II', разбитие сечений на расчетные подобласти, рисунку, приведены расчетные схемы для варианта II.

На рисунках 6-11 представлены примеры расчета устойчивости ограждающей дамбы Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс различными методами: Крея, Терцаги, ВНИИГ-Терцаги, Можевитинова.



Рис. 4. Результаты ввода грунтов для первого расчетного случая в расчетном сечении ограждающей плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс

Fig. 4. The results of soil input for the first design case in the design section of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the r. Psekups



Рис. 5. Результаты ввода грунтов для второго расчетного случая в расчетном сечении ограждающей плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс

Fig. 5. The results of soil input for the second design case in the design section of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the r. Psekups

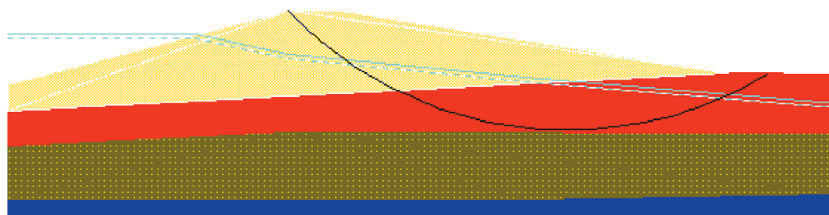


Рис. 6. Результаты расчета устойчивости низового откоса ограждающей плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс в расчетном сечении II-II' по методу Крея (Бishopa)

Fig. 6. The results of the calculation of the stability of the downstream slope of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the r. Psekups in design section II-II' according to the Cray (Bishop) method

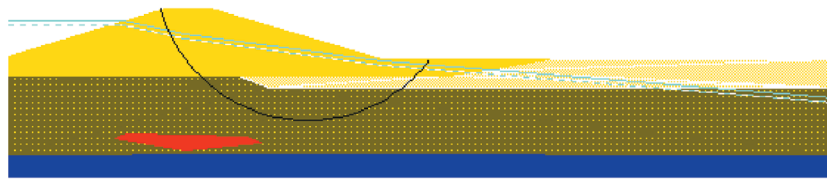


Рис. 7. Результаты расчета устойчивости низового откоса оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс в расчетном сечении III-III' по методу Терцаги

Fig. 7. The results of the calculation of the stability of the downstream slope of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the r. Psekups in the calculated section III-III' according to the Terzaghi method

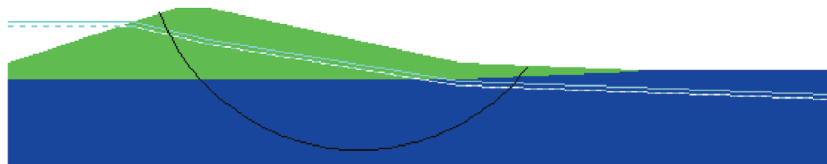


Рис. 8. Результаты расчета устойчивости низового откоса оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс в расчетном сечении V-V' по методу ВНИИГ-Терцаги

Fig. 8. The results of the calculation of the stability of the downstream slope of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the river. Psekups in the calculated section V-V' according to the VNIIG-Terzaghi method

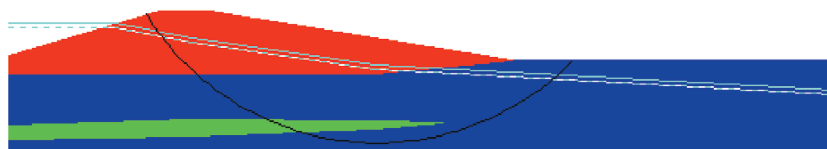


Рис. 9. Результаты расчета устойчивости низового откоса оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс в расчетном сечении VI-VI' по методу СП 39.13330.2012, по соотношению моментов сил

Fig. 9. The results of the calculation of the stability of the downstream slope of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the river. Psekups in the calculated section VI-VI' according to the method of CP 39.13330.2012 according to the ratio of the moments of forces

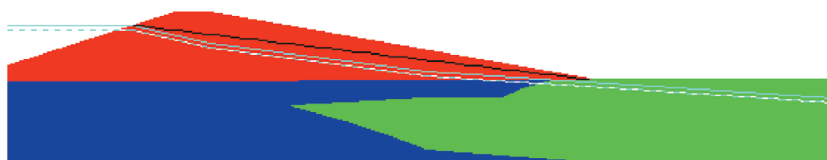


Рис. 10. Результаты расчета устойчивости низового откоса оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс в расчетном сечении IV-IV' по методу Можевитинова

Fig. 10. The results of the calculation of the stability of the downstream slope of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the river. Psekups in the calculated section IV-IV' according to the Mozhevitinov method

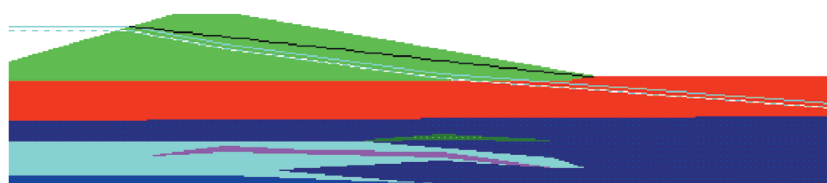


Рис. 11. Результаты расчета устойчивости низового откоса оградительной плотины Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс в расчетном сечении IX-IX' по методу СП 39.13330.2012, по соотношению сил

Fig. 11. The results of the calculation of the stability of the downstream slope of the protective dam of the Krasnodar reservoir in the valley of the river. Psekups in the calculated section IX-IX' according to the method of CP 39.13330.2012 according to the ratio of forces

Выводы

Выполнены расчеты более 100 тыс. расчетных случаев устойчивости откосов оградительной дамбы Краснодарского водохранилища в долине р. Псекупс в 8 расчетных створах на статические и сейсмические нагрузки.

Проведенные численные исследования противопаводковой системы Нижней Кубани с использованием современных методов расчета: Крея, Терцаги, ВНИИГ-Терцаги, Можевитинова – показали, что контроль за безопасностью сооружений инженерной защиты долины реки Псекупс, с учетом изменившихся во времени

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда (грант № 22-17-20001).

Библиографический список

1. Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет: Программа многофакторных исследований ГТС. Проведение натурных работ по комплексному обследованию и геодезическим измерениям / О.Д. Рубин, Н.В. Ханов, С.Е. Лисичкин, А.С. Антонов. – М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – 111 с.
2. **Юрченко И.Ф.** Безопасность автоматизированных технологий регулирования мелиоративного режима агроэкосистемы // Инженерные технологии и системы. – 2022. – Т. 32, № 1. – С. 28-40.
3. Improvement of the theory of shaft spillway calculations / A. Gur'yev, N. Khanov, M. Chumicheva et al. // E3S Web of Conferences, Tashkent, 1-3 апреля 2021 г. – Tashkent, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202126403031.
4. **Юрченко И.Ф.** Оценка современного состояния индустрии цифровизации мелиорации // Природообустройство. – 2022. – № 2. – С. 6-12. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-6-12.
5. Numerical analysis of static strength for different damages of hydraulic structures when changing stressed and strained state / V.A. Volosukhin, M.A. Bandurin, V.V. Vanzha, A.V. Mikheev, Y.V. Volosukhin // Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry, 2018. Enterprise Information Systems. – 2018. – P. 042061.
6. Alternative Solutions for the Energy Dissipation of Idle Discharges at the Rogun HPP / A.P. Gur'ev, N.A. Safonova, D.V. Kozlov et al. // Power Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 54, № 1. – Pp. 7-12. DOI: 10.1007/s10749-020-01157-3.
7. **Bandurin M.A.** Finite-element simulation of possible natural disasters on landfill dams with changes in climate and seismic conditions taken into account / M.A. Bandurin, V.A. Volosukhin, A.V. Mikheev, Y.V. Volosukhin, V.V. Vanzha // Journal of Physics: Conference Series «International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 – Microprocessor Systems and Telecommunications». – 2018. – P. 032011.
8. **Кирейчева Л.В., Шевченко В.А., Юрченко И.Ф.** Оценка эффективности использования сельскохозяйственных угодий в агропроизводстве //

нагрузок и воздействий, возможны только посредством внедрения системы автоматизированного ведения мониторинга ГТС в сочетании с системой поддержки принятия решений (СППР).

Наиболее низкая несущая способность дамб обвалования отмечается, как правило, в период прохождения паводков по причине снижения прочностных свойств за счет фильтрационных вод в теле дамб. Вышеназванные сведения требуют проведения в предпаводковый период мониторинговых исследований по оценке несущей способности дамб системы обвалования Нижней Кубани.

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation (grant No. 22-17-20001).

References

1. Multifactorial studies of hydraulic structures with a service life of more than 25 years: Program of multifactorial studies of hydraulic structures Conducting full-scale surveys and geodetic measurements / O.D. Rubin, N.V. Khanov, S.E. Lisichkin, A.S. Antonov. – Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy. K.A. Timiryazev, 2022. – 111 p. – ISBN978-5-9675-1867-6.
2. **Yurchenko I.F.** Safety of automated technologies for regulating the reclamation regime of the agroecosystem. Inzhenernye tekhnologii i sistemy. 2022. V. 32. No. 1. pp. 28-40.
3. Improvement of the theory of shaft spillway calculations / A. Gur'yev, N. Khanov, M. Chumicheva [et al.] // E3S Web of Conferences, Tashkent, 01-03 April 2021. – Tashkent: 2021. – DOI: 10.1051/e3sconf/202126403031.
4. **Yurchenko I.F.** Evaluation of the current state of the digitalization industry of melioration / I.F. Yurchenko // Nature Engineering. – 2022. – No. 2. – pp. 6-12. – DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-6-12.
5. Numerical analysis of static strength for different damages of hydraulic structures when changing stressed and strained state / V.A. Volosukhin, M.A. Bandurin, V.V. Vanzha, A.V. Mikheev, Y.V. Volosukhin // Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 Enterprise Information Systems. 2018. P. 042061.
6. Alternative Solutions for the Energy Dissipation of Idle Discharges at the Rogun HPP / A.P. Gur'ev, N.A. Safonova, D.V. Kozlov [et al.] // Power Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 54. – No1. – pp. 7-12. – DOI: 10.1007/s10749-020-01157-3.
7. **Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Mikheev A.V., Volosukhin Y.V., Vanzha V.V.** Finite-element simulation of possible natural disasters on landfill dams with changes in climate and seismic conditions taken into account // Journal of Physics: Conference Series. Ser. «International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 – Microprocessor Systems and Telecommunications» 2018. – P. 032011.
8. **Kireycheva L.V., Shevchenko V.A., Yurchenko I.F.** Otsenka effektivnosti ispolzovaniya selskohozyajstvennyh ugodij v agroproduktse / Agrarnaya nauka. – 2021. – No. 9. – S. 135-139. – DOI: 10.32634/0869-8155-2021-352-9-135-139.

Аграрная наука. – 2021. – № 9. – С. 135-139. DOI: 10.32634/0869-8155-2021-352-9-135-139.

9. **Yurchenko I.F.** Information support system designed for technical operation planning of reclamative facilities // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2018. – Т. 96, № 5. – Pp. 1253-1265.

10. Integrating geographic information system, remote sensing, and modeling to enhance reliability of irrigation network / E.H. Ashour, S.M. Elsayed, S.E. Ahemd, M.E. Basiouny, F.S. Abdelhaleem // *Water and Energy International*. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 6-13.

11. Features of investing in reconstruction of reclamation objects by the example of irrigation systems of the Saratov region / L.A. Zhuravleva, T.V. Fedyunina, L.Yu. Evsyukova A.V. Rusinov, D.A. Kolganov, L.N. Pototskaya // *Revista Turismo Estudos & Práticas*. – 2020. – № 4. – С. 19.

12. Over-extraction from shallow bedrock versus deep alluvial aquifers: reliability versus sustainability considerations for India's groundwater irrigation / R.M. Fishman, U. Lall, T. Siegfried, P. Raj, V. Modi // *Water Resources Research*. – 2011. – Т. 47, № 12.

13. Method for assessing the reliability of earth dams in irrigation systems / K.S. Sultanov, B. Khusanov, P.V. Loginov Sh. Normatov // *Construction of Unique Buildings and Structures*. – 2020. – № 4 (89). – P. 8901.

14. **Волосухин В.А., Дыба В.П., Моргунов В.Н.** Сейсмобезопасность строительных объектов и гидротехнических сооружений. – М.: РУСАЙНС, 2020. – 264 с.

15. **Волосухин В.А.** Краснодарский гидроузел: проблемы безопасности (1975-2015) / В.А. Волосухин, Е.Н. Белоконов, Я.В. Волосухин, И.Г. Явнов и др. – Новочеркасск: Лик, 2016. – 394 с.

16. **Бабешко В.А., Волосухин В.А., Горшкова Е.М.** О применении метода блочного элемента в проблеме исследования одного типа предположенных структур. – Краснодар: КубГУ, 2016. – 264 с.

17. **Ананьин И.В.** Сейсмичность Северного Кавказа. – М.: Наука, 1977. – 148 с.

9. **Yurchenko I.F.** Information support system designed for technical operation planning of reclamative facilities // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2018. V. 96. No. 5. – pp. 1253-1265.

10. Integrating geographic information system, remote sensing, and modeling to enhance the reliability of irrigation network / E.H. Ashour, S.M. Elsayed, S.E. Ahemd, M.E. Basiouny, F.S. Abdelhaleem // *Water and Energy International*. – 2021. – Vol. 64r. No. 1. – pp. 6-13.

11. Features of investing in reconstruction of reclamation objects by the example of irrigation systems of the Saratov region / L.A. Zhuravleva, T.V. Fedyunina, L.Yu. Evsyukova A.V. Rusinov, D.A. Kolganov, L.N. Pototskaya // *Revista Turismo Estudos & Práticas*. 2020. No. S4. pp. 19.

12. Over-extraction from shallow bedrock versus deep alluvial aquifers: reliability versus sustainability considerations for India's groundwater irrigation / R.M. Fishman, U. Lall, T. Siegfried, P. Raj, V. Modi // *Water Resources Research*. – 2011. – V. 47. – No. 12.

13. Method for assessing the reliability of earth dams in irrigation systems / K.S. Sultanov, B. Khusanov, P.V. Loginov Sh. Normatov // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020. No. 4 (89). pp. 8901.

14. **Volosukhin V.A., Dyba V.P., Morgunov V.N.** Seismobezопасnost stroitelnyh objektov i gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. – M.: RUSAINS, 2020. – 264 s.

15. **Volosukhin V.A.** Krasnodarskij gidrouzel: problemy bezопасnosti (1975-2015) / Belokonev E.N., Volosukhin Ya.V., Yavnov i. G. i dr. – Novocherkassk: Lik, 2016. – 394 s.

16. **Babeshko V.A., Volosukhin V.A., Gorshkova E.M.** O primenenii metoda blochnogo elementa v probleme issledovaniya odnogo tipa predpolozhennykh struktur. – Krasnodar: KubGU, 2016. – 264 s.

17. **Ananyin I.V.** Seismichnost Severnogo Kavkaza. – M.: Nauka, 1977. – 148 s.

Критерии авторства

Волосухин В.А., Бандурин М.А., Приходько И.А., Верbitsкий А.Ю. выполнили натурные и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 07.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

Criteria of Authorship

Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Verbitsky A.Yu. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Verbitsky A.Yu. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests. All authors have made an equal contribution to the preparation of the publication.

Contribution of the authors

All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted to the editorial office 07.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:627.8:626.01:693.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-60-67

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СООРУЖЕНИЙ ПРИМЫКАНИЯ БАТОПОРТА СУХОГО ДОКА С УЧЕТОМ ПОЭТАПНОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ И КОМПЛЕКСНЫХ НАГРУЗОК

БАКЛЫКОВ ИГОРЬ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ, ведущий специалист

i.baklykov@hydroproject.ru

Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука – НИИ энергетических сооружений», АО «Институт Гидропроект»-НИИЭС), 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, Россия

В статье представлены результаты расчетных исследований прочности сооружений примыкания батопорта сухого дока. Расчетные исследования выполнены на основе пространственной конечно-элементной модели примыкания, в которой моделировались ограждающие стены из трубошпунта, железобетонный устой, грунт основания и засыток. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния и прочности показали, что максимальные перемещения конструкций, напряжения в трубошпунте, грунтовых анкерах и арматуре не превышают предельно допустимых значений. На основании выполненных расчетных исследований обоснованы сооружения примыкания батопорта. Примыкание батопорта к сооружениям сухого дока служит для его упора и передачи усилий прижатия батопорта в грунт. Ограждающие конструкции примыкания батопорта приняты в виде вертикальных стенок из трубошпунта с устройством железобетонной конструкции устоя в верхней части. Для обеспечения прочности принято традиционное решение с анкерровкой трубошпунта стальными тягами и грунтовыми анкерами. Для создания водонепроницаемого контура проектом предусмотрены заглубление трубошпунта в скальное основание, заполнение бетоном полости труб, заварка замков металлической пластиной с заполнением полости полимерной смолой.

Ключевые слова: примыкание батопорта, железобетонный устой, расчетные исследования, напряженно-деформированное состояние, трубошпунт, прочность, комплексные нагрузки, поэтапность возведения

Формат цитирования: Баклыков И.В. Расчетное обоснование сооружений примыкания батопорта сухого дока с учетом поэтапности возведения и комплексных нагрузок // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 60-67. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-60-67.

© Баклыков И.В., 2022

Original article

COMPUTATIONAL SUBSTANTIATION OF THE ABUTMENT STRUCTURES OF THE FLOATING BULKHEAD OF THE DRY DOCK TAKING INTO ACCOUNT THE STAGED CONSTRUCTION AND COMPLEX LOADS

BAKLYKOV IGOR VYACHESLAVOVICH, leading specialist

i.baklykov@hydroproject.ru

Branch of JSC "Design, Survey and Research Institute «Hydroproject» named after S.Ya. Zhuk – Research Institute of Energy Structures», (JSC «Institute Hydroproject»-«NIIES»), 125080, Moscow, Volokolamskoe sh., 2, Russia

The article presents the results of calculated studies of the strength of the abutment structures of the floating dam of the dry dock. The calculated studies were carried out on the basis of the spatial finite-element model of abutment, in which there were simulated the enclosing walls of the pipe sheet pile, reinforced concrete abutment, soil of the base and filling. The results of stress-strain state and strength calculations have shown that the maximum displacements of the structures, stresses in the pipe sheet pile, ground anchors and reinforcement do not exceed the maximum permissible values. On the basis of the computational studies performed, the abutment structures of the floating bulkhead were substantiated. The abutment of the floating bulkhead to the dry dock structures serves to support it

and transfer the pressing forces of the floating bulkhead to the ground. The enclosing abutment structures of the floating bulkhead are designed as vertical walls made of pipe sheet pile with a reinforced concrete abutment structure in the upper part. To ensure strength, a traditional solution was adopted with the anchoring of the pipe sheet pile with steel rods and ground anchors. To create a waterproof circuit, the project provides for the deepening of the pipe sheet pile into the rock base, the filling of the pipe cavity with concrete, welding of the locks with a metal plate with the filling of the cavity with polymer resin.

Keywords: abutment of the floating bulkhead, reinforced concrete abutment, computational studies, stress-strain state, pipe sheet pile, strength, complex loads, staged construction

Format of citation: Baklykov I.V. Computational substantiation of the abutment structures of the floating bulkhead of the dry dock taking into consideration the staged construction and complex loads // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 5. – P. 60-67. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-60-67.

Введение. Примыкание батопорта сухого дока является ответственным сооружением, которое служит для упора батопорта сухого дока и передачи усилий прижатия батопорта в грунт.

Общая схема расположения примыкания представлена на рисунке 1.

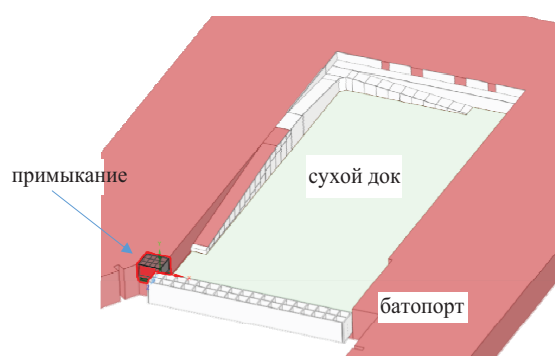


Рис. 1. Общая схема расположения примыкания батопорта сухого дока

Fig. 1. General scheme of the abutment location of pipe sheet pile of the dry dock

Конструктивно примыкание представляет собой заанкерванный больверк с лицевой

стенной из трубошпунта. Отметка верха трубошпунтовой стенки составляет +4,00 м. Верх труб устанавливается на отметке +3,50 м. В пределах отметок +3,50...+4,00 м устраивается железобетонный оголовок. От отметки –9,000 м и выше устанавливается железобетонный устой с заполнением ячеек ПГС.

Трубошпунт выполняется из труб $\varnothing 1020 \times 16$. Для обеспечения прочности трубошпунта предусмотрена установка в трубы сварных армокаркасов с последующим бетонированием. Армокаркасы изготавливаются из арматуры $\varnothing 25$ мм класса А400. В зависимости от длины трубы бетонирование выполняется бетоном В20W6F200 с использованием метода вертикально перемещаемой трубы.

Для крепления трубошпунта при отметке дна у сооружения –21,70 м устанавливаются грунтовые анкеры с учетом их расчетных и конструктивных особенностей. Установка анкеров ведется поярусно, по мере устройства котлована. Угол наклона анкеров составляет 45° .

На рисунке 2 представлены положение и детальный вид примыкания.

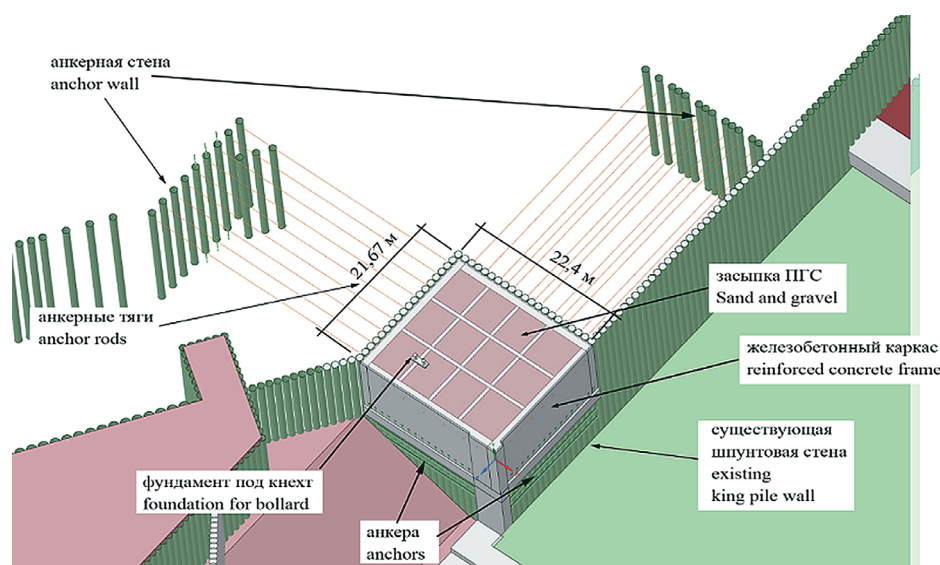


Рис. 2. Детальный вид примыкания

Fig. 2. Detailed view of the abutment

Физико-механические параметры материалов

Table

Physical and mechanical parameters of materials

№	Название Name	Модуль деформации Е, МПа Module of deformation E, MPa	Коэффициент Пуассона, μ Poisson's ratio, μ	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg / m ³	Угол внутреннего трения, φ° Internal friction angle, φ°	Сцепление С, МПа Adhesion C, MPa
1	ИГЭ 222	14	0,3	2190	24	19
2	ИГЭ 236	3	0,3	2000	9	7
3	ИГЭ 422	17	0,3	2260	30	22
4	ИГЭ 501	10000	0,3	2730	-	-
5	Бетон В30 Concrete	30000	0,2	2300	-	-
6	Металл Metal	210000	0,4	7780	-	-

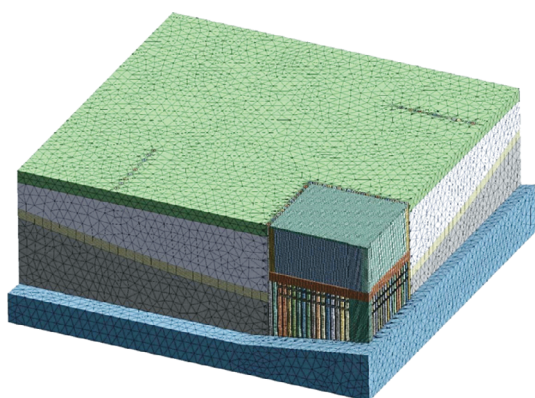


Рис. 4. Конечно-элементная модель примыкания

Fig. 4. Finite element abutment model

Материалы и методы исследований. Расчетные исследования были выполнены с учетом методик и опыта подобных расчетных исследований [1-11].

При расчетах гидротехнических сооружений, их конструкций и оснований подлежит проверке такое условие, обеспечивающее недопущение наступления предельных состояний, как

$$\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot F \leq \gamma_c \cdot R :$$

$\gamma_{lc} = 1,00$ – основное сочетание – коэффициент сочетания нагрузок;

$\gamma_{lc} = 0,95$ – строительный период – коэффициент сочетания нагрузок;

$\gamma_{lc} = 0,90$ – особого сочетания – коэффициент сочетания нагрузок.

Проверка несущей способности существующих анкерных тяг и новых грунтовых анкеров по материалу выполняется в соответствии с российскими нормами, с учетом понижающего коэффициента $K_a = 1,5$ (согласно п. 11.3.24 СП 287.1325800.2016. Сооружения морские причальные. Правила проектирования и стро-

ительства) и $K_m = 1,5$ (согласно п. 6.11 СТО-ГК «Трансстрой» 023-2007. Применение грунтовых анкеров и свай с тягой из трубчатых винтовых штанг «Титан»).

Действующие в конструкциях усилия определялись с использованием результатов расчетов напряженно-деформированного состояния на основе пространственной конечно-элементной модели сооружения и основания.

Расчеты прочности и армирования железобетонных конструкций производились по действующим усилиям в соответствии с положениями СП.41.13330.2012.

Расчетные исследования были выполнены с учетом реальной поэтапности возведения конструкций. Поэтапность возведения представлена следующим образом:

Этап 1. Природное напряженно-деформированное состояние.

Этап 2. Установка трубошпунта до отм. +4,000 м по осям 2/4 и Б/1, до отм. –6,000 м по осям 2 и Б. Установка анкерных тяг.

Этап 3. Установка свай железобетонного устоя.

Этап 4. Бетонирование фундаментной плиты устоя.

Этап 5. Бетонирование стен устоя, заполнение ПГС, бетонирование перекрытия.

Этап 6. Разработка котлована до отм. –12,000 м.

Этап 7. Установка анкеров первого ряда.

Этап 8. Разработка котлована до отм. –14,000 м.

Этап 9. Установка анкеров второго ряда.

Этап 10. Планировка дока –16,200 м (скинлэйр), котлован со стороны залива на отм. –20,100 м.

Этап 11. Бетонирование перекрытия на отм. +4,000 м.

Результаты и их обсуждение. Перемещения, сформированные на этапе 1, являются начальными (нулевыми) для всех последующих этапов расчетных исследований. После формирования природного НДС грунтового массива последующие перемещения происходят относительно этапа 1. При этом напряжения в грунте сохраняются и учитываются на всех расчетных этапах.

На этапе 1 (рис. 5) формируется напряженное состояние природного залегания грунтов (initial state). Сооружений на данном этапе нет.

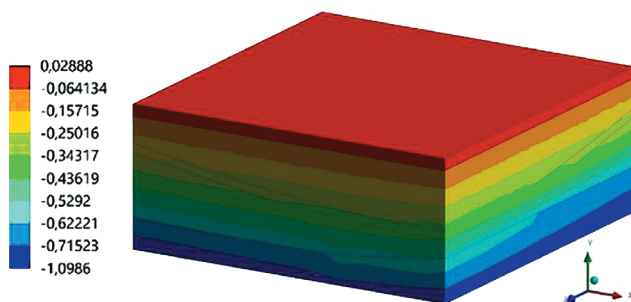


Рис. 5. Вертикальные напряжения в грунте, МПа

Fig. 5. Vertical stresses in the ground, MPa

На расчетном этапе 2 (рис. 6) возводятся «существующие» конструкции трубошпунта, разрабатывается котлован под железобетонный устой.

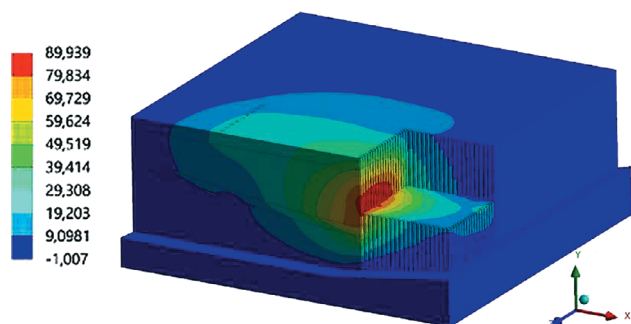


Рис. 6. Этап 2. Горизонтальные перемещения UX, мм

Fig. 6. Stage 2. Horizontal UX displacements, mm

Как следует из рисунка 6, при разработке котлована под железобетонный устой начинает действовать давление грунта на трубошпунт. Трубошпунт выгибается, и его перемещения направлены в сторону дока. Максимальное перемещение составляет 89 мм, что не превышает допустимые перемещения шпунтовой стены 250 мм, определенные в соответствии с СП 80.13330.2016 и составляющие 1% от высоты шпунтовой стены 25 м.

Горизонтальные перемещения возникают также и в направлении оси UZ. При этом в шпунте возникают напряжения сжатия-растяжения, представленные на рисунке 7.

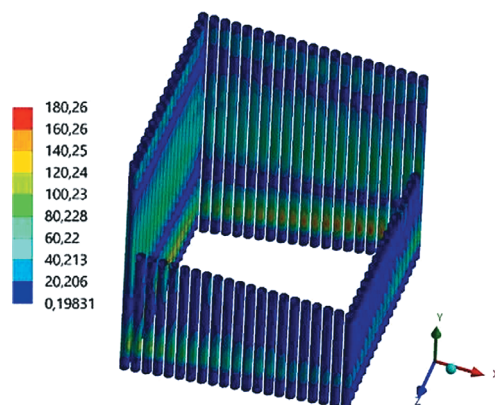


Рис. 7. Этап 2. Эквивалентные напряжения в шпунте, МПа

Fig. 7. Stage 2. Equivalent stresses in the pipe sheet pile, MPa

Максимальные эквивалентные напряжения в шпунте составляют 180,26 МПа (рис. 7), что не превышает расчетное сопротивление стали.

$$\begin{aligned}\sigma_{pile} &= 180,26 \cdot 1,20 = 216,31 [\text{МПа}] \leq R_y = \\ &= \frac{345}{1,2} = 287,5 [\text{МПа}].\end{aligned}$$

Поскольку верх трубошпунта крепится анкерными тягами, в них также возникают растягивающие усилия, напряжения от которых представлены на рисунке 8.



Рис. 8. Этап 2. Вид сверху. Напряжения в анкерных тягах, МПа

Fig. 8. Stage 2. Top view. Stresses in anchor rods, MPa

Как следует из рисунка 8, максимальные эквивалентные напряжения в существующих анкерных тягах составляют 121,68 МПа, что не превышает расчетные сопротивления стали.

$$\begin{aligned}\sigma_{rod} &= 121,68 \cdot 1,20 = 146,02 [\text{МПа}] \leq R_y = \\ &= \frac{345}{1,2} = 287,5 [\text{МПа}].\end{aligned}$$

На этапе 5 происходит возведение железобетонных конструкций устоя. При этом перемещения, возникшие на предыдущих этапах, сохраняются.

На рисунке 9 представлены горизонтальные перемещения на этапе 5.

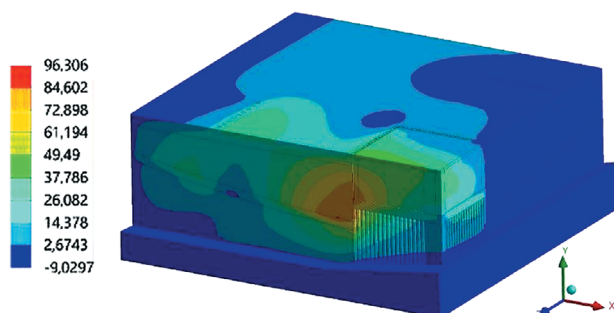


Рис. 9. Этап 5. Горизонтальные перемещения UX, мм

Fig. 9. Stage 5. Horizontal UX displacements, mm

При возведении устоя увеличиваются напряжения в шпунте с 180 МПа до 201 МПа, не превышающие расчетное сопротивление стали.

На рисунке 10 представлены напряжения в железобетоне устоя.

Как следует из рисунка 10, локальные растягивающие напряжения в бетоне устоя превышают расчетное сопротивление бетона В30 на растяжение, и требуется, соответственно, армирование.

Расчеты прочности и армирования железобетонных конструкций производились по действующим усилиям.

На рисунках 11-12 представлено расчетное армирование конструкций устоя в виде площадей армирования, $\text{см}^2/\text{пог. м}$.

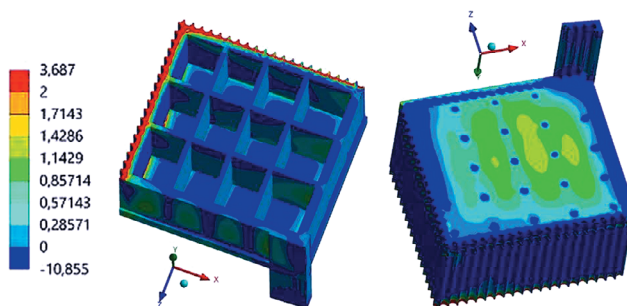


Рис. 10. Этап 5. Напряжения по оси X, МПа

Fig. 10. Stage 5. Stresses on X-axis, MPa

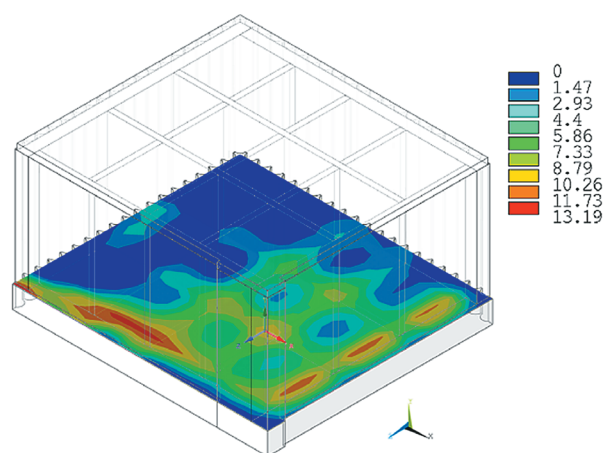


Рис. 11. Площади армирования верхней грани по оси X, $\text{см}^2/\text{пог. м}$

Fig. 11. Reinforcement area of the upper face on the X axis, $\text{cm}^2/\text{run. m}$

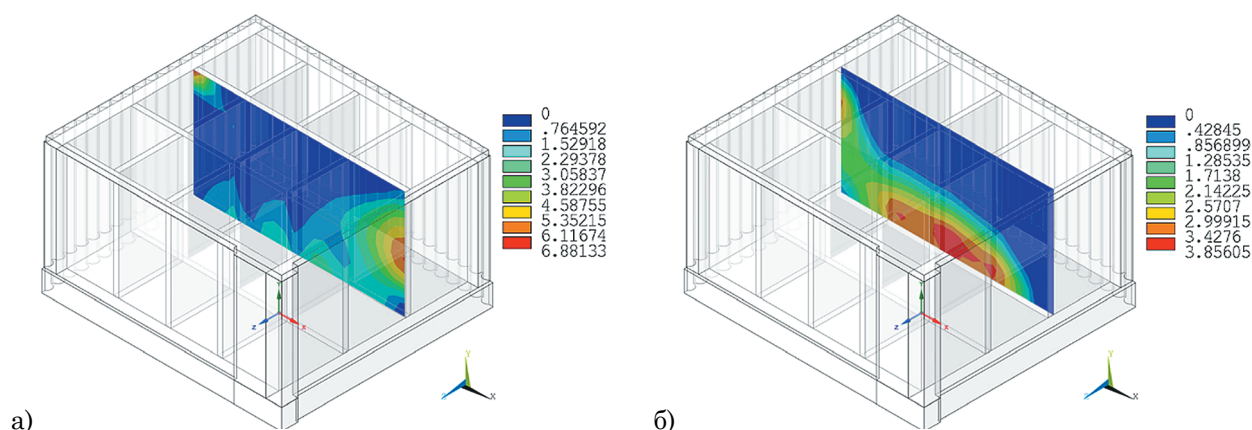


Рис. 12. Площади армирования:

- а) наружной грани (со стороны залива) по оси X (горизонтальная), $\text{см}^2/\text{пог. м}$;
б) внутренней грани (со стороны грунта) по оси Y (вертикальная), $\text{см}^2/\text{пог. м}$

Fig. 12. Reinforcement areas of:

- a) the outer face (from the bay side) along the X axis (horizontal), $\text{cm}^2/\text{run.m}$
b) the inner face (from the ground side) along the Y axis (vertical), $\text{cm}^2/\text{run.m}$

Таким образом, выполнено расчетное обоснование конструкций примыкания батопорта.

Выводы

1. Расчетное обоснование примыкания батопорта было выполнено на основе

пространственной конечно-элементной модели с учетом поэтапности возведения конструкций при действии комплекса нагрузок.

1. Максимальные расчетные горизонтальные перемещения составили 89 мм, что не превышает допустимые перемещения шпунтовой стены 250 мм, определенные в соответствии с СП 80.13330.2016 и составляющие 1% от высоты шпунтовой стены 25 м.

2. Возникающие напряжения в металлическом трубошпунте составляют 203,5 МПа и не превышают величины расчетного сопротивления стали 345 МПа.

3. В грунтовых анкерах возникают растягивающие напряжения, достигающие 125,8 МПа, что не превышает расчетные сопротивления стали анкера 500 МПа.

Библиографический список

1. **Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е.** Экспериментальные исследования железобетонных подпорных стен // Природообустройство. – 2020. – № 1. – С. 72-78. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-1-72-79.
2. **Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пашченко Ф.А.** Результаты экспериментальных исследований железобетонных подпорных стен // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020. – Т. 16, № 2. – С. 152-160. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-2-152-160.
3. **Migurenko V.R., Lisichkin S.E.** Hydrotechnical construction: Verification of design of turbine block with steel-reinforced-concrete spiral casing in the powerhouse at the rogun HPP // Power Technology and Engineering. – 2012. – Vol. 46, № 4. – P. 253-261. DOI: 10.1007/s10749-012-0342-9.
4. **Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пашченко Ф.А.** Разработка методики расчета напряженного состояния в горизонтальных сечениях гидротехнических подпорных стен углового типа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2019. – Т. 15, № 5. – С. 339-344. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-5-339-344.
5. **Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е.** Проведение обследований фундаментной плиты водоприемника в проточной части водоводов № 5 и № 6 эксплуатируемой Загорской ГАЭС // Природообустройство. – 2019. – № 4. – С. 61-68. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-61-69.
6. **Рубин О.Д.** Инструментальные и расчетные исследования низовых подпорных стен Загорской ГАЭС / О.Д. Рубин, И.В. Баклыков, А.С. Антонов, С.Е. Лисичкин, К.Е. Фролов // Природообустройство. – 2019. – № 2. – С. 80-87. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-80-88.
7. **Рубин О.Д.** Особенности напряженно-деформированного состояния стен камер шлюзов / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, В.Б. Николаев, Д.С. Башкиров // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, № 4 (127). – С. 473-483. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.473-483.
8. **Nikolaev V.B.** Steel-reinforced concrete penstock experiments / V.B. Nikolaev, S.E. Lisichkin, A.S. Lisichkin, O.D. Rubin // Power Technology and Engineering. – 2017. – Vol. 50, № 5. – P. 466-472. – DOI: 10.1007/s10749-017-0734-y.
9. **Рубин О.Д., Шестопалов П.В.** Особенности математического конечно-элементного моделирования систем «Строящееся бетонное сооружение-нескальное

4. Локальные растягивающие напряжения в бетоне устоя составляют 2 МПа и превышают расчетное сопротивление бетона В30 на растяжение (1,2 МПа). В соответствии с СП 41.13330.2012 требуется армирование.

5. Максимальные расчетные площади арматуры в железобетонных конструкциях устоя составляют:

- для фундаментной плиты – 22,17 см²/пог. м ($\mu = 0,0011$);
- наружных стен устоя – 12,75 см²/пог. м ($\mu = 0,0010$);
- внутренних перегородок – 7,01 см²/пог. м ($\mu = 0,0014$).

6. На основании выполненных расчетов исследований обоснованы сооружения примыкания батопорта.

References

1. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E.** Experimentalnyye issledovaniya zhelezobetonnykh podpornykh sten // Prirodoobustroystvo. – 2020. – № 1. – S. 72-78. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-1-72-79
2. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A.** Rezultaty experimentalnykh issledovaniy zhelezobetonnykh podpornykh sten // Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzhenij. – 2020. – T. 16. № 2. – S. 152-160. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-2-152-160
3. **Migurenko V.R., Lisichkin S.E.** Hydrotechnical construction: Verification of design of turbine block with steel-reinforced-concrete spiral casing in the powerhouse at the rogun HPP // Power Technology and Engineering. – 2012. – Vol. 46. – No 4. – P. 253-261. – DOI: 10.1007/s10749-012-0342-9
4. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A.** Razrabotka metodiki rascheta napryazhennogo sostoyaniya v gorizontalnykh secheniyah gidrotehnicheskikh podpornykh sten ugolkovogo tipa // Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzhenij. – 2019. – T. 15. № 5. – S. 339-344. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-5-339-344
5. **Bellendir E.N., Rubin O.D., Lisichkin S.E.** Provedenie obsledovaniy fundamentnoy plity vodopriemnika v protochnoy chasti vodovodov № 5 i № 6 ekspluatiruemoj Zagorskoj GAES // Prirodoobustroystvo. – 2019. – № 4. – S. 61-68. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-61-69
6. **Rubin O.D.** Instrumentalnye i raschetnye issledovaniya nizovykh podpornykh sten Zagorskoj GAES / Baklykov I.V., Antonov A.S., Lisichkin S.E., Frolov K.E. // Prirodoobustroystvo. – 2019. – № 2. – S. 80-87. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-80-88
7. **Rubin O.D.** Osobennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sten kamer shlyuzov / Lisichkin S.E., Nikolaev V.B., Bashkirov D.S. // Vestnik MGSU. – 2019. – T. 14. № 4(127). – S. 473-483. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.473-483
8. **Nikolaev V.B., Lisichkin S.E., Lisichkin A.S., Rubin O.D.** Steel-reinforced concrete penstock experiments // Power Technology and Engineering. – 2017. – Vol. 50. – No 5. – P. 466-472. – DOI: 10.1007/s10749-017-0734-y
9. **Rubin O.D., Shestopalov P.V.** Osobennosti matematicheskogo konechno-elementnogomodelirovaniya system «stroyashcheesya betonnoe sooruzhenie – naskalnoe osnovanie» // Stroitel'naya mehanika

основание» // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2016. – № 2. – С. 63-67.

10. **Баклыков И.В.** Учет наполнения водохранилища при расчете напряженно-деформированного состояния бетонной плотины // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2018. – Т. 14, № 5. – С. 390-395. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-390-395.

11. **Баклыков И.В.** Влияние омоноличивания межстолбчатых швов на напряженно-деформированное состояние бетонной плотины Богучанской ГЭС при наполнении водохранилища // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 9 (120). – С. 1133-1142. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1133-1142.

Критерии авторства

Баклыков И.В. выполнил натурные и теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись, имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 17.08.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

inzhenernyh konstruksij i sooruzhenij. – 2016. – № 2. – С. 63-67.

10. **Baklykov I.V.** Uchet napolneniya vodohranilishcha pri raschete napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya betonnoj plotiny // Stroitel'naya mehanika inzhenernyh konstruksij i sooruzhenij. – 2018. – Т. 14, № 5. – С. 390-395. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-390-395

11. **Baklykov I.V.** Vliyanie omonolichivaniya mezhstolobchatyh shvov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betonnoj plotiny Boguchanskoj GES pri napolnenii vodohranilishcha // Vestnik MGSU. – 2018. – Т. 13, № 9(120). – С. 1133-1142. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1133-1142

Criteria of Authorship

Baklykov I.V. performed theoretical and experimental research, on the basis of which he conducted a generalization and wrote the manuscript. Baklykov I.V. has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

The article was submitted to the editorial office 17.08.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:532.54:621.644

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-68-73

ОЦЕНКА ПРОПУСКА МИНИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ СООРУЖЕНИЯМИ ДЮКЕРНОГО ТИПА МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ

ЧЕРНЫХ ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА^{1✉}, канд. техн. наук, профессор
gtsmgup@mail.ru

БУРЛАЧЕНКО АЛЁНА ВЛАДИМИРОВНА², канд. техн. наук, доцент
chtara@mail.ru

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

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64, Россия

Рассматриваются вопросы, связанные с проектированием и гидравлическим расчетом транзитной части закрытого трубчатого водопроводящего сооружения дюкерного типа. Оцениваются условия работы дюкера с прямоугольными трубами в переходном режиме, при котором входной участок труб водопропускного сооружения испытывает повышенные гидродинамические нагрузки, приводящие зачастую к тем или иным разрушениям. Моделировалась конструкция дюкера с двумя изломами по длине с плавным входным оголовком и без оголовка. При проведении экспериментов отмечено отсутствие влияния входного оголовка трубчатого ГТС на длину безнапорного участка. Установлено, что условия формирования и особенности гидравлической работы дюкера в переходном режиме во многом определяются его конструктивными особенностями. С затоплением входного оголовка затрудняется поступление воздуха в трубу и формируется переходный режим второго типа при незначительном колебании уровня воды в верхнем бьефе. Выявлена зависимость местоположения точки отрыва потока при снижении пропускаемого расхода воды от его величины, что позволило получить график зависимости относительной длины безнапорного конечного участка от корня квадратного из числа Фруда. Произведено сопоставление с результатами исследований других авторов, которое показало увеличение относительной длины в трубчатых ГТС дюкерного типа на участках с обратными уклонами при одинаковых числах Фруда. Даны рекомендации по методологии проведения гидравлического расчета трубчатых сооружений дюкерного типа при минимальных пропускаемых расходах.

Ключевые слова: закрытое водопропускное сооружение дюкерного типа, переходный режим, трубчатый переход, расход, входной участок

Формат цитирования: Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Оценка пропуска минимальных расходов воды сооружениями дюкерного типа мелиоративных систем // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 68-73. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-68-73.

© Черных О.Н., Бурлаченко А.В., 2022

Original article

ASSESSMENT OF MINIMUM WATER FLOW BY SIPHON TYPE STRUCTURES OF RECLAMATION SYSTEMS

CHERNIKH OLGA NIKOLAEVNA^{1✉}, candidate of technical sciences, professor
htsmgup@mail.ru

BURLACHENKO ALYONA VLADIMIROVNA², candidate of technical sciences, associate professor
chtara@mail.ru

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49, Russia

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); 125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64, Russia

Issues related to the design and hydraulic calculation of the transit part of a closed tubular water supply structure of the siphon type is considered. The operating conditions of the siphon

with rectangular pipes in the transition mode are evaluated, in which the entrance section of the pipes of the culvert structure experiences increased hydrodynamic loads, often leading to certain destructions. The siphon design was modeled with two breaks along the length with a smooth inlet head and without a head. During the experiments, the absence of influence of the inlet head of the tubular HTS on the length of the free-flow section was noted. It has been established that the conditions of formation and features of the hydraulic operation of the siphon in the transient mode are largely determined by its design features. With the flooding of the inlet head, the flow of air into the pipe is hindered and a transition mode of the second type is formed with a slight fluctuation of the water level in the upper pool. The dependence of the location of the point of separation of the flow with a decrease in the passing water flow rate on its value is revealed, which made it possible to obtain a graph of the dependence of the relative length of the non-pressure end section on the square root of the Froude number. A comparison was made with the results of studies by other authors, which showed an increase in the relative length in tubular HTS of the siphon type in sections with reverse slopes at the same Froude numbers. Recommendations are given on the methodology for carrying out hydraulic calculation of tubular structures of the siphon type with minimal flow rates.

Keywords: closed culvert of the siphon type, transition mode, tubular transition, flow rate, inlet section

Format of citation: Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Assessment of the minimum water flow by syphon type structures of reclamation systems // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 5. – P. 68-73. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-68-73.

Введение. Основой различных водных систем являются естественные либо искусственные водные объекты и их гидротехнические сооружения (ГТС). В местах пересечения каналов водных систем с водотоками (ручьями, реками, балками, оврагами и т.п.) или искусственными преградами (дороги, насыпи, каналы, коммуникации и пр.), помимо таких водопроводящих ГТС, как лотки, акведуки, ливнеспуски, каналы на косогорных участках и в глубоких выемках, селепроводы и др., часто устраиваются закрытые ГТС дюкерного типа: дюкеры, туннели, трубы/трубчатые переходы и различные водоотводящие устройства при строительстве основных инженерных сооружений.

Дюкеры широко используются в системах орошения, водопровода, канализации, в гидроэнергетических конструкциях, магистральных нефтепроводах, автодорожных переходах и т.п. Особенностью дюкеров является то, что их трубопроводы располагаются ниже дна каналов, вследствие чего поток воды в них преимущественно имеет напорный режим течения. Водопропускные сооружения должны обеспечивать не только пропуск воды без нарушения безопасности и непрерывности работы, но и быть удобными для движения автотранспорта. Вне зависимости от материала водопропускной трубы ее основными характеристиками являются форма и размеры отверстия (ширина, высота, диаметр), которые в основном и определяют пропускную способность всего ГТС. Если форму, очертание отверстия трубы и ее входных оголовков принимают по конструктивным соображениям, то размеры отверстий труб обосновывают

гидрологическими и гидравлическими расчетами, связанными с определением расчетных расходов и объемов стока.

При расчетном расходе ГТС дюкерного типа независимо от области его использования обычно всегда работает напорно. При расчете труб дюкера применяется уравнение Бернулли. При этом за плоскость сравнения принимается уровень дна отводящего русла и учитываются все потери энергии для напорного движения потока в трубчатом водопропускном ГТС [1-4]. При проектировании такого ГТС в условиях обеспечения его надежной и безопасной работы на мелиоративной сети должна быть обязательно проведена проверка на пропуск минимального расхода [5-7]. Эта особенность гидравлического расчета связана с возможностью образования гидравлического прыжка в трубе, сопровождающегося гидродинамическими воздействиями на элементы транзитного тракта и повышающего вероятность аварийного состояния ГТС (рис. 1) [4, 8-10].

Дорожные трубы в отличие от ГТС природоохранного назначения обычно проектируются нерегулируемыми. Пропускную способность малых труб определяют гидравлическим расчетом отверстий с учетом аккумуляции части объема стока перед водопропускным сооружением (или без учета аккумуляции). Исходными материалами для гидравлического расчета являются расчетный расход и расчетный уровень воды, режим работы трубы, уклон лотка сооружения, характеристики русла. Расчет производится по гидрографам и графикам расчетных паводков. Переходный режим течения, проявляющийся в периодической смене режимов (безнапорного

напорным, и наоборот) и проникновением воздуха в ГТС, сопровождается интенсивной пульсацией гидродинамического давления, опасной в отношении надежности (рис. 2) ГТС [1-11]. Интенсивность пульсации давления в трубчатом ГТС при переходном режиме обуславливается его видом. При переходном режиме первого

типа, когда в трубе перемещаются воздушные пузыри, интенсивность пульсации существенно выше, чем при переходном режиме второго типа, при котором в трубе формируется напорный гидравлический прыжок. При пропуске минимального расхода движение потока необязательно будет напорным по всей длине дюкера.

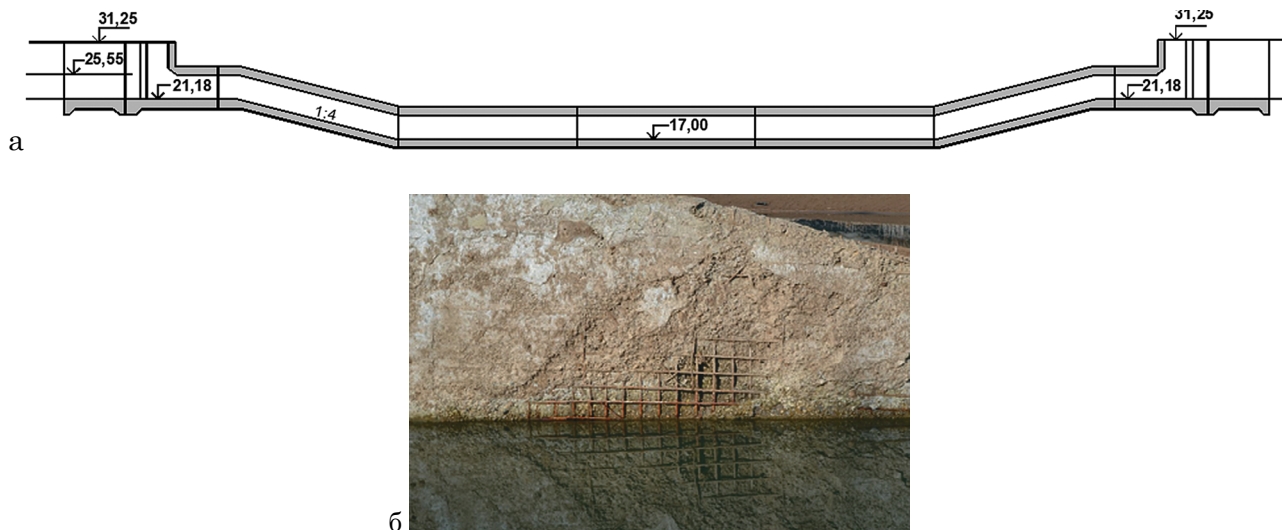


Рис. 1. Схема дюкера (а) и дефекты бетона на боковой стенке дюкера Донского магистрального канала через р. Сал, РФ [4]

Fig. 1. Scheme of the siphon (a) and defects on the siphon side wall of the Don main canal over the river Sal, RF [4]

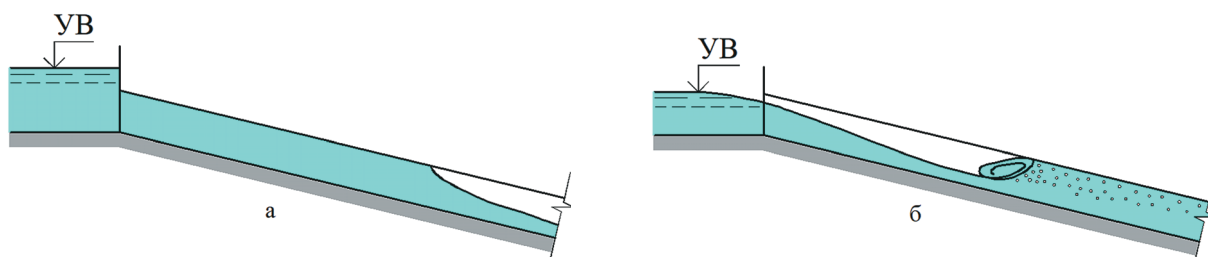


Рис. 2. Возможные переходные режимы протекания потока на начальном участке транзитного тракта трубчатого ГТС [12, 13]:

а – первый переходный режим;

б – второй переходный режим при несамозаряжающемся входном порталном оголовке

Fig. 2. Possible transition modes of the flow at the initial section of the transition tract of the tubular HTS [12, 13]:

a – the first transition mode; b – second transition mode with non-self-charging inlet portal head

Таким образом, на входном наклонном участке может быть безнапорное движение, и если имеется свободный выход потока в нижний бьеф, на части выходного участка дюкера с обратным уклоном движение потока также может оказаться безнапорным. При этом в горизонтальной средней части дюкера напорное движение сохраняется.

Поверочный расчет по определению гидравлического прыжка в трубе водопроводящего ГТС традиционно связан с определением высотного положения пьезометрической линии. Для этого прежде всего следует знать, откуда,

от какой точки выходного участка трубы с обратным уклоном нужно начинать вести пьезометрическую линию. Ответ на этот вопрос может дать зависимость длины безнапорного участка с отрицательным уклоном на выходе из трубы от некоторых гидравлических параметров.

Материалы и методы исследований. Положение точки отрыва потока от шелыги на концевом участке горизонтальной трубы и в трубах с положительным уклоном изучено целым рядом исследователей: В.И. Алтуниным, Н.П. Розановым, Ш.А. Бабуковым, В.А. Ширченко, А.М. Шванштейном, В.К. Шутько и др. [1, 2,

5-15]. Так, Ш.А. Бабуков установил [1], что местоположение точки отрыва, то есть относительной длины безнапорного выходного участка, зависит от уклона. Он проводил исследования на трубчатом ГТС с нулевым уклоном дна и с положительным уклоном, равным 0,0033. При этом для относительных длин 22; 30,8; 52, равных отношению длины трубы водопропускного ГТС к ее высоте при одном и том же уклоне дна трубопровода, местоположение точки отрыва потока от потолка определялось практически одной и той же зависимостью.

В.И. Алтуниным были получены экспериментальные данные сначала с гладкими прямоугольными и круглыми, а потом – уже не с гладкими, а с гофрированными круглыми трубами [2, 7, 8], которые показали отсутствие влияния шероховатости на длину безнапорного выходного участка.

При движении потока на участке трубчатого ГТС с обратным уклоном, характерным для сооружений дюкерного типа, подробные исследования для труб с разной формой поперечного сечения проведены не были. Поэтому в гидравлической лаборатории МАДИ были организованы исследования по определению длины безнапорного участка с отрицательным уклоном на модели трубчатого ГТС дюкерного типа (рис. 3). Лабораторная установка была выполнена из оргстекла. Модель трубы дюкера имела квадратное поперечное сечение высотой $a = 10$ см, уклон входного участка равнялся 0,32. Общая длина модели составляла около 4 м. Перед входом в трубу устанавливался успокоитель, состоящий из горизонтальных трубок диаметром 2 см. Расход воды Q замерялся треугольным водосливом, отметки уровня – мерными иглами, длина безнапорного участка L_0 – линейкой. Моделировалось трубчатое ГТС с входным оголовком плавного очертания и без входного оголовка. Предварительные эксперименты указали на отсутствие влияния входного оголовка трубчатого ГТС на длину безнапорного участка.

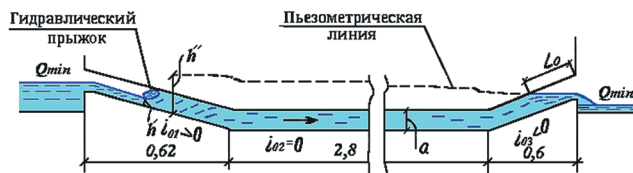


Рис. 3. Схема для оценочного гидравлического расчета ГТС дюкерного типа при минимальном расходе воды

Fig. 3. Scheme for estimated hydraulic calculation of the HTS of the siphon type with minimal water consumption

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных экспериментальных исследований была выявлена зависимость местоположения точки отрыва потока от расхода воды, что позволило получить график зависимости относительной длины безнапорного конечного участка от корня квадратного из числа Фруда (рис. 4). Число Фруда Fr вычислялось для напорного участка потока по зависимости:

$$Fr = V^2 / ga = Q^2 / ga^5,$$

где V – средняя скорость потока, м/с; $g = 9,81$ м/с²; a – высота прямоугольной трубы, м.

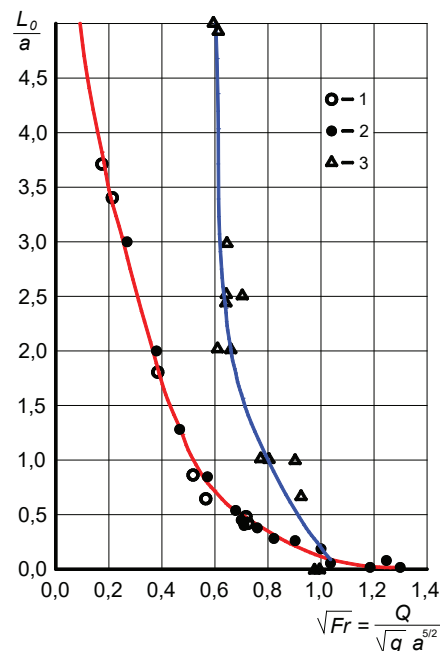


Рис. 4. График зависимости относительной длины безнапорного участка на выходе из ГТС дюкерного типа (L_0/a) от параметра $\sqrt{Fr} = (Q/\sqrt{g a^5/2})$:

- 1 – при $i = -0,32$ для дюкера с оголовком;
- 2 – при $i = -0,32$ для дюкера без оголовка;
- 3 – при $i = 0$ (по данным Ш.А. Бабукова [1])

Fig. 4. Graph of the dependence of the relative length of the non-pressure section at the outlet of the HTS of the siphon type (L_0/a) on the parameter $\sqrt{Fr} = (Q/\sqrt{g a^5/2})$:

- 1 – at $i = -0.32$ for the siphon with a head;
- 2 – at $i = -0.32$ for the siphon without a head;
- 3 – at $i = 0$ according to Sh.A. Babukov [1]

Полученная графическая зависимость, представленная на рисунке 4, справедлива для гладких труб с отрицательным уклоном, равным 0,32. Для сравнения на графике нанесены экспериментальные данные Ш.А. Бабукова, относящиеся к трубчатому сооружению с нулевым уклоном и гладкими трубами. Сопоставление полученных данных с данными Ш.А. Бабукова показывает увеличение относительной длины в трубчатых ГТС с обратными уклонами при одинаковых

числах Фруда. По-видимому, на выходных участках труб с обратным уклоном действие силы тяжести при малых числах Фруда, то есть при сравнительно малых инерционных силах потока, сказывается в большей степени, чем в трубах ГТС с горизонтальным входным участком.

Таким образом, можно в зависимости от параметра $(Q / \sqrt{ga^{5/2}})$ определить с помощью графика (рис. 4) относительную длину отрыва потока от шельги (потолка) L_0/a , а затем общеизвестными методами рассчитать положение пьезометрической линии [15]. Гидравлический прыжок будет находиться там, где пьезометрическую линию пересечет линия вторых сопряженных глубин, вычисленная для глубин безнапорного потока на входном участке, которые будут являться по существу первыми сопряженными глубинами.

Выводы

Следует избегать появления гидравлического прыжка на входном участке дюкера.

Библиографический список

1. Бабуков Ш.А. Переходные режимы течения потока в нерегулируемых закрытых водосбросах: Дис. ... канд. техн. наук – М.: МГМИ, 1985. – 24 с.
2. Алтуни В.И., Черных О.Н. Особенности работы нерегулируемых трубчатых сооружений дюкерного типа в переходных режимах // Труды Научно-технической конференции. – М.: МГУП, 2001. – С. 48-51.
3. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Эксплуатация и проектирование дюкеров на водных объектах: учебное пособие. – М.: РГАУ-МСХА, 2021. – 151 с. – URL: <http://elib.timacad.ru/dl/local/06122021.pdf/info>.
4. Косиченко Ю.М. Современное состояние водопропускных гидротехнических сооружений Донского магистрального канала / Ю.М. Косиченко, Г.Л. Лобанов, О.А. Баев, А.Ю. Гарбуз. – Новочеркасск: ФГБНУ «РосНИИПМ», 2014. – 49 с.
5. Burlachenko A.V., Chernykh O.N., Khanov N.V. Hydrodynamic Investigations of Inverted Syphon's Fragment // Larhyss Journal. – 2022. – № 49. – Mars. – Pp. 123-137.
6. Шванштейн А.М. Строительные туннели. Гидравлические условия работы. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 123 с.
7. Алтуни В.И. Пульсация давления в трубчатом сооружении при переходном режиме // Гидравлика транспортных средств и дорожных сооружений: Труды МАДИ. – М.: МАДИ, 1988. – С. 67-71.
8. Алтуни В.И., Черных О.Н. Влияние конструкции входного оголовка на пульсацию давления в трубчатом сооружении при переходном режиме // Расчеты элементов гидравлических систем машин и механизмов: Труды МАДИ. – М.: МАДИ, 1990. – С. 73-79.
9. Шванштейн А.М. Гидравлические условия работы трубчатых и туннельных водосбросов // Известия ВНИИГ. – 1997. – № 230. – С. 287-313.
10. Черных О.Н., Ханов Н.В., Бурлаченко А.В. Оценка влияния входных устройств на гидравлические условия работы различных модификаций

Возникающие в гидравлическом прыжке пульсации давления при перемещении прыжка в трубе неблагоприятно отражаются на работе любого ГТС дюкерного типа. При этом возможны расстройство швов и возникновение прочих локальных дефектов в транзитной части.

Если в трубе водопропускного ГТС при заданных геометрических размерах гидравлический прыжок образуется, то можно уменьшить его сечение. При этом возрастет число Фруда, уменьшится длина отрыва потока, поднимется пьезометрическая линия и входной участок сможет занаториться, то есть гидравлический прыжок исчезнет. Однако если при этом возникнет вероятность значительного уменьшения пропускной способности ГТС, что недопустимо для надежно работающей мелиоративной системы, то необходимо провести расчет входного участка уже с учетом пульсационной нагрузки от гидравлического прыжка.

References

1. Babukov Sh.A. Perehodnye rezhimy techeniya potoka v nereguliruyemyh zakrytyh vodosbrosah: dis. cand. tehn. nauk. – M.: MGMI, 1985. – 24 s.
2. Altunin V.I., Chernykh O.N. Osobennosti raboty nereguliruyemyh trubchatykh sooruzhenij dyukernogo tipa v perehodnyh rezhimakh // Trudy Nauchno-tehnicheskoy konferentsii. – M.: MGUP, 2001. – S. 48-51.
3. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Eksploatatsiya i proektirovanie dyukerov na vodnykh objektah [Elektronnyy resurs]: Rossijsky gosudarstvennyy agrarny universitet – MSHA imeni K.A. Timiryazev (Moskva). – Electron. Textovye dan. – Moskva, 2021. – 151 s. <http://elib.timacad.ru/dl/local/06122021.pdf/info>.
4. Kosichenko Yu.M. Sovremennoe sostoyanie vodopropusknykh gidrotehnicheskikh sooruzhenij Donskogo magistralnogo kanala / Yu.M. Kosichenko, G.L. Lobanov O.A., Baev A.Yu. Garbuz. – Novocherkassk: FGBNU «RosNIIPM», 2014. – 49 s.
5. Burlachenko A.V., Chernykh O.N., Khanov N.V. Hydrodynamic Investigations of Inverted Siphon, s Fragment // Larhyss Journal, ISSN1112-3680, n°49, Mars 2022, pp. 123-137 © 2022 All rights reserved, Legal Deposit 1266-2002.
6. Shvanshtein A.M. Stroitelnye tunneli. Gidravlicheskie usloviya raboty. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 123 s.
7. Altunin V.I. Pulsatsiya davleniya v trubchatom sooruzhenii pri perehodnom rezhime // Gidravlika transportnykh sredstv i dorozhnykh sooruzhenij. Trudy MAD. – M.: MADI, 1988. – S. 67-71.
8. Altunin V.I., Chernykh O.N. Vliyanie konstruktssii vkhodnogo ogolovka na pulsatsiyu davleniya v trubchatom sooruzhenii pri perehodnom rezhime // Raschety elementov gidravlicheskikh sistem mashin i mehanizmov. Trudy MADI. – M.: MADI, 1990. – S. 73-79.
9. Shvanshtein A.M. Gidravlicheskie usloviya raboty trubchatykh i tunnelnykh vodosbrosov. // Izvesiya VNIIG. – 1997. – No. 230. – S. 287-313.
10. Chernykh O.N., Khanov N.V., Burlachenko A.V. Otsenka vliyaniya vkhodnykh ustroystv

дорожных трубчатых переходов из гофрированного металла // Доклады ТСХА. – 2019. – Вып. 291. Ч. III. – С. 74-78.

11. **Altunin V.I.** Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance / V.I. Altunin, O.N. Chernyh, A.V. Burlachenko // Power Technology and engineering. – 2016. – November. – Vol. 50. – Iss. 4. – Pp. 385-390.

12. **Suetina T.A.** Hydraulic calculation features of helically corrugated steel culverts / T.A. Suetina, O.N. Chernykh and A.V. Burlachenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering, 1-8 July 2018, Novosibirsk, Russian Federation. – 2018. – December. – Vol. 456. – Section 4. 31. – P. 5.

13. **Черных О.Н., Алтунин В.И., Бурлаченко А.В.** Экспериментальные исследования металлической гофрированной водопропускной трубы при частично-напорном режиме // Приволжский научный журнал. – 2015. – № 1. – С. 28-36.

14. **Suetina T.A., Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Koroteev D.D.** Hydraulic parameters of culverts from pipes with normal and spiral form of corrugation // International Conference on Engineering Systems 2020: Journal of Physics. Conference Series 1687. – 2020. – 012037.

15. **Черных О.Н., Суэтина Т.А., Бурлаченко А.В.** Научные основы совершенствования методов гидравлического расчета дорожных гофрированных труб из металла. – М.: МАДИ, 2020. – 234 с.

Критерии авторства

Черных О.Н., Бурлаченко А.В. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 23.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

na gidravlicheskie usloviya raboty razlichnyh modifikatsij dorozhnyh trubchatyh perehodov iz gofirovannogo metalla // Doklady TSHA. – 2019, vyp. 291, ch. III, 59 pp., – S. 74-78.

11. **Altunin V.I.** Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance / V.I. Altunin, O.N. Chernyh, A.V. Burlachenko // Power Technology and engineering. November 2016, Volume 50, Issue 4. – P. 385-390.

12. **Suetina T.A.,** Hydraulic calculation features of helically corrugated steel culverts / T.A. Suetina, O.N. Chernykh and A.V. Burlachenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering 1-8 July 2018, Novosibirsk, Russian Federation. Volume 456, Section 4. 31 December 2018. – 5 p.

13. **Chernykh O.N., Altunin V.I., Burlachenko A.V.** Experimentalnye issledovaniya metallicheskoj gofirovannoj vodopropuskoj trubki pri chstichno-napornom rezhime // Privolzhsky nauchny zhurnal. – 2015. – No. 1. – S. 28-36.

14. **Suetina T.A., Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Koroteev D.D.** Hydraulic parameters of culverts from pipes with normal and spiral form of corrugation // International Conference on Engineering Systems 2020. Journal of Physics: Conference Series 1687 (2020) 012037.

15. **Chernykh O.N., Suetina T.A., Burlachenko A.V.** Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya metodov gidravlicheskoogo rascheta dorozhnyh gofirovannyh trub is metalla. – M.: MADI, 2020. – 234 sp.

Criteria of Authorship

Chernyh O.N., Burlachenko A.V. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Chernyh O.N., Burlachenko A.V. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 23.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

2.1.6. Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

УДК 502/504:551.585

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-74-82

ОБОСНОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

ИСМАЙЫЛОВА ИРИНА ГАБИЛОВНА, заведующий лабораторией
igism37@mail.ru

ИСМАЙЫЛОВ ГАБИЛ ХУДУШ ОГЛЫ[✉], д-р техн. наук, профессор
gabil-1937@mail.ru

МУРАЩЕНКОВА НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА, канд. техн. наук, доцент
splain75@mail.ru

ПЕРМИНОВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент
alexperminov@gmail.com

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, корп. 28, Россия

Разработана методика вероятностной оценки (прогноза) гидрологической характеристики годового притока воды $W(t)$ бассейна р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда. Предложенная методика позволяет построить прогнозную функцию обеспеченности, характеризующую изменения будущего режима речного стока в заданном створе реки. Прогноз речных вод с заданной обеспеченностью позволяет эффективно варьировать режимы работы водохозяйственных систем речного бассейна в зависимости от ожидаемой водности. Для изучения развития гидрологических процессов в речном бассейне рекомендуется использовать динамико-стохастическую концепцию, исходящую из условия того, что колебаниям речного стока наряду со стохастической составляющей свойственна и детерминированная составляющая, проявляющаяся в виде монотонно направленных или периодических трендов. Как показал проведенный анализ, многолетние изменения водности р. Волги у г. Волгограда не вполне отвечают законам колебаний случайных величин. Отдельные параметры этого процесса (среднемноголетние значения) довольно существенно меняются во времени, другие характеристики (дисперсия, асимметричность распределения членов), наоборот, весьма мало изменяются с течением времени и могут считаться практически постоянными. Для построения прогнозных кривых обеспеченности решаются две взаимосвязанные задачи. Во-первых, это построение функциональных уравнений среднемноголетней величины (нормы) притока во времени, и на основе полученных зависимостей осуществляется экстраполяция нормы притока за первую половину XXI в. Во-вторых, с использованием трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, при известных прогнозных нормах, полученных в соответствующих выборках и соотношениях $C_s = 2C_v$, построены ансамбли прогнозных кривых обеспеченностей притока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда.

Ключевые слова: динамико-стохастическая концепция, прогнозные функции обеспеченности, приток речных вод, маловодные годы, прогнозирование, функциональные уравнения, тренды

Формат цитирования: Исмайылова И.Г., Исмайылов Г.Х., Муращенко Н.В., Перминов А.В. Анализ и прогноз речных вод в зоне формирования стока реки Волги методом тенденций // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 74-82. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-74-82.

© Исмайылова И.Г., Исмайылов Г.Х., Муращенко Н.В., Перминов А.В., 2022

Original article

SUBSTANTIATION OF THE DEVELOPMENT OF HYDROLOGICAL PROCESSES USING THE DYNAMIC-STOCHASTIC APPROACH

ISMAIYLOVA IRINA GABILOVNA, head of the laboratory

igism37@mail.ru

ISMAIYLOV GABIL KHUDUSH OGLY[✉], doctor of technical sciences, professor

gabil-1937@mail.ru

MURASHCHENKOVA NATALIA VLADIMIROVNA, candidate of technical sciences, associate professor

splain75@mail.ru

PERMINOV ALEXEY VASILYEVICH, candidate of technical sciences, associate professor

alexperminov@gmail.com

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 125434, Moscow, Pryanishnikova 19, bldg. 28. Russia

A technique has been developed for the probabilistic assessment (forecast) of the hydrological characteristic of the annual water inflow $W(t)$ of the river basin Volga in the formation zone near the city of Volgograd. The proposed method makes it possible to build a predictive supply function that characterizes changes in the future regime of river flow in a given river section. The forecast of river water with a given availability makes it possible to effectively vary the operating modes of the water management systems of the river basin depending on the expected water content. To study the development of hydrological processes in a river basin, it is recommended to use the dynamic-stochastic concept, based on the condition that, along with the stochastic component, river runoff fluctuations also have a deterministic component, which manifests itself in the form of monotonically directed or periodic trends. As the analysis showed, long-term changes in the water content of the Volga River near the city of Volgograd do not fully comply with the laws of fluctuations of random variables. Some parameters of this process (average long-term values) change quite significantly over time, other characteristics (dispersion, asymmetric distribution of members), on the contrary, change very little over time and can practically be considered constant. To construct predictive supply curves, two interrelated tasks are solved, including, firstly, the construction of functional equations of the average annual value (norm) of inflow over time and, based on the obtained dependencies, extrapolations of the inflow rate for the first half of the 21st century are carried out and, secondly, using three-parameter gamma distribution of S.N. Kritsky and M.F. Menkel and with known predictive norms obtained in the corresponding samples and ratios $C_s = 2C_v$, ensembles of predictive probability curves for the Volga River tributary in the formation zone near the city of Volgograd are constructed.

Keywords: dynamic-stochastic concept, predictive functions of availability, inflow of river water, dry years, forecasting, functional equations, trends

Format of citation: Ismajylova I.G., Ismajylov G.Kh., Murashchenkova N.V., Perminov A.V. Substantiation of the development of hydrological processes using the dynamic-stochastic approach // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – No. 5. – S. 74-82. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-74-82.

Введение. Эффективность функционирования современных водохозяйственных систем (ВХС), включающих в себя каскад водохранилищ, во многом определяется развитием гидрологических процессов в речных бассейнах. Это объясняется тем, что в многоводные годы решаются задачи рационального использования избыточного стока воды, которые могут быть приняты участниками ВХС, а в маловодные годы решаются задачи обеспечения гарантированного уровня водопотребления, жизненно важных функций рассматриваемой ВХС. Прогноз межгодовой и сезонной изменчивости притока речных вод с заданной обеспеченностью позволяет эффективно варьировать режимы

работы ВХС в зависимости от ожидаемой водности и тем самым повысить эффективность его функционирования в целом за многолетний период. Выявленные закономерности в сезонном и многолетнем колебании речного стока создают хорошие предпосылки для вероятностного предвидения предстоящего его режима по водности. Зная наперед степень повышения стока, мы располагаем информацией, необходимой, чтобы разрабатывать рациональные режимы функционирования современных сложных ВХС страны. Служба предсказаний предстоящей водности реки дает возможность правильно построить режимы функционирования ВХС, принять заблаговременно меры против угрожающих

наводнений и т.п. Так, предвидя объем половодий, можно построить эффективный план наполнения водохранилищ в весенний период, позволяющий избежать чрезмерных холостых сбросов в многоводные годы и не допустить риска ненаполнения водохранилищ в маловодные годы. Аналогично заблаговременное предсказание водности реки в меженном периоде создаст возможность составить рациональный план сработки водохранилища в рассматриваемом периоде. Этим и определяется актуальность вероятностного прогноза водности речного стока при развитии гидрологических процессов.

Материалы и методы исследований. Результаты исследований в XX веке [1-5] в области гидрологии со всей очевидностью показывают, что преобладающим направлением в развитии гидрологических процессов является стохастическая концепция. Вместе с тем, анализ развития гидрологических процессов в речных бассейнах свидетельствует о том, что немаловажная роль принадлежит генетическим концепциям – наличию детерминированной составляющей в развитии гидрологических процессов [3, 4, 7].

В гидрологии в 30-е гг. прошлого века интенсивно развивались эмпирические методы и, хотя весьма приближенно, отвечали требованиям практики. Эмпирические построения, даже самые простые, оценивались тогда специалистами как значительные достижения и быстро внедрялись в практику. После 1930 г. в исследовании стока получили широкое применение методы математической статистики [1, 5, 8-11]. Большую роль в развитии гидрологических процессов играли генетический подход к построению эмпирических формул и обобщение теоретических исследований.

Необходимо отметить, что основным методом познания развития гидрологических процессов является физический анализ гидрологических явлений, который позволяет глубже проникнуть во внутреннюю структуру и установить их закономерности. В связи с этим, в настоящее время для изучения развития гидрологических процессов доминирует динамико-стохастическая концепция для оценки (прогноза) межгодовой и сезонной изменчивости в многолетнем колебании речного стока [4, 5, 12].

В рамках динамико-стохастической концепции изменение любой гидрологической характеристики речного стока в различных створах по длине реки является случайным процессом, непрерывно изменяющимся во времени [2, 5, 11]. При этом, случайные колебания речного стока сочетаются с детерминированным изменением. Детерминированные изменения в режиме речного стока проявляются по двум

причинам: во-первых, в форме функциональных связей водности рек с координатой времени, которые проявляются в виде монотонно направленных или периодических трендов [3, 7]; во-вторых, в форме зависимостей стока от гидрологической и метеорологической обстановки периода, предшествующего исследуемому периоду [9, 13]. Соответственно, динамико-стохастическая природа колебаний речного стока предопределяет форму его прогнозирования на несколько лет вперед.

Таким образом, предвидение предстоящего значения речного стока включает в себя как бы две составляющие. Первая из них отражает однозначно детерминированные, регулярно наблюдавшиеся явления. Вторая составляющая выражает распределение вероятностей колебаний стока, рассматриваемых как случайные отклонения от средних величин, которые изменяются во времени. Как инструмент для предвидения будущего режима развития речного стока, выступает описание детерминистической закономерности, выражающейся в форме зависимостей стока от времени. Прежде всего имеются ввиду обнаружение длительной тенденции повышения или понижения водности речных бассейнов и многолетние периодические ее изменения.

Необходимо отметить, что в наблюдаемых рядах годового стока прослеживается определенная цикличность, выражающаяся в наличии группировок многоводных и маловодных лет. Чередование этих группировок на разных реках протекает различным образом. Цикличность процесса речного стока объясняется тем, что при больших обильных атмосферных осадках часть воды аккумулируется в грунте, в понижениях поверхности рельефа, в последующие годы поступая обратно в русло реки. С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель процесс цикличности в колебаниях речного стока интерпретировали как цепи Маркова с корреляционной связью между значениями стока смежных лет [5]. По мере увеличения промежутка между годами связь обычно ослабляет и в конце концов затухает. В качестве эффективного аппарата исследования цикличности выступают разностные интегральные кривые годового стока и спектральные преобразования Фурье от автокорреляционной функции [8, 3].

Если бы такие изменения предвиделись в календарной последовательности, то такая форма предвидения для водохозяйственной практики была бы наилучшей формой прогнозирования развития гидрологических процессов в речном бассейне. Однако, в реальных условиях важную роль играют вероятностные закономерности, выражающие случайные колебания речного стока [1, 4, 9]. Исходя из вышесказанного

определение соотношения между детерминированной и случайной составляющими колебаний речного стока и их изменений во времени зависит от длительности времени. Нас интересуют колебания речного стока, соизмеримые с периодом функционирования водохозяйственных систем, то есть период времени порядка 50-100 лет.

В настоящей работе ставится и решается задача определения вероятностной формы предвидения изменения многолетних колебаний гидрологических характеристик годового и сезонного расхода воды $Q(t)$ или объема воды $W(t)$ речного бассейна за вторую половину XXI в.

Объект исследований – бассейн реки Волги в зоне ее формирования до г. Волгограда. В качестве гидрологической характеристики годового и сезонного объема воды $W(t)$ были использованы два временных гидрологических ряда разной длительности, представленные на портале Мирового центра данных и АО «Института Гидропроект», – в частности, многолетние среднегодовые и средне-сезонные (половодье и межень) притоки воды $W(t)$ бассейна р. Волга в зоне формирования у г. Волгоград за период 1881/1882-2020/2021 гг. ($n = 140$ лет) и 1914/1915-2020/2021 гг. ($n = 107$ лет).

Для оценки (прогноза) развития гидрологических процессов в речном бассейне необходимо построить целый набор функций, важнейшими из которых являются функция математического ожидания (норма речного стока) $m(t) = M[W(t)]$, функция дисперсии $D(t) = D[W(t)]$, функции средне-квадратического отклонения $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$, безусловная функция распределения вероятностей $F(x, t) < P[W(t) < x]$, или функция обеспеченности $P[W(t) > x] = 1 - F(x, t) = 1 - P[W(t) < x]$, автокорреляционная функция $R(t, \tau) = \text{corr}[W(t), W(t + \tau)]$, условная функция распределения вероятностей $F(x, t; y, \tau) = P[W(t) < x / y = W(t + \tau)]$ и т.д.

Процесс многолетнего колебания гидрологической характеристики $W(t)$ может быть представлен в виде аддитивной функции:

$$W(t) = m(t) + u(t), \quad (1)$$

где $m(t)$ – детерминированная функция; $u(t)$ – случайная часть.

Годовой объем притока речных вод W_{i+1} при заданном W_i определяется с помощью регрессионных уравнений [9, 14]:

$$W_{i+1}(W_i) = \overline{W_{i+1}} + r \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} \left(W_i - \overline{W_i} \right) + \Phi_{i+1} \sigma_{i+1} \sqrt{1-r^2}, \quad (2)$$

где $W_{i+1}(W_i)$ – объем годового стока W_{i+1} при заданном W_i ; σ_i и σ_{i+1} – среднеквадратические отклонения годовых объемов стока; $\overline{W_i}$ и $\overline{W_{i+1}}$ – безусловные математические ожидания

годовых объемов стока; Φ_{i+1} – относительное отклонение ординаты кривой обеспеченности годовых величин стока от среднего значения (математическое ожидание). Величина Φ_{i+1} определяется по таблице Фостера-Рыбкина в зависимости от условного коэффициента асимметрии [13]; r – коэффициент корреляции между стоком смежных лет.

Если переходить от годовых объемов стока на модульные коэффициенты стока, тогда уравнение (2) примет вид:

$$K_{i+1}(K_i) = \overline{K_{i+1}} + r \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} (K_i - \overline{K_i}) + \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}. \quad (3)$$

Поскольку рассматривается корреляция между стоками смежных лет, то есть исследуются связи членов некоторого ряда с членами того же ряда, смещенного на один год, то очевидно, что $\sigma_{i+1} = \sigma_i$, $\overline{K_{i+1}} = \overline{K_i} = 1$. Тогда уравнение (3) примет вид:

$$K_{i+1}(K_i) = 1 + r(K_i - 1) + \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}. \quad (4)$$

Вводится гипотеза, согласно которой отклонения $\frac{K_{i+1}(K_i)}{1 + r(K_i - 1)}$ распределены по кривой Пирсона III типа с условным коэффициентом вариации

$$C_{V_{\text{усл}}} = \frac{C_V \sqrt{1-r^2}}{1 + r(K_i - 1)}, \quad (5)$$

где C_V – безусловный коэффициент вариации.

Условный коэффициент асимметрии –

$$C_{s, \text{усл}} = n \cdot C_{V_{\text{усл}}} = \frac{n C_V \sqrt{1-r^2}}{1 + r(K_i - 1)}. \quad (6)$$

При использовании трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля n может приниматься как 1; 1,5; 2; 2,5; 3,0 до 6 [12].

Тогда нетрудно показать, что случайную величину K_{i+1} при известном и коррелятивно с ней связанном значении K_i можно определить с помощью уравнения в виде:

$$K_{i+1} = 1 + r(K_i - 1) + \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}. \quad (7)$$

Сравнивая уравнение (7) с уравнением (1), можно заключить, что

$$m(t) = 1 + r(K_i - 1), \quad u(t) = \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}. \quad (8)$$

Следовательно, регрессионную модель (7) в первом приближении можно рассматривать как удовлетворительную для прогнозирования многолетних колебаний гидрологической характеристики $W(t)$ в вероятностной форме, которое включает в себя две составляющие. Первая корреляционная – связанная $m(t) = 1 + r(K_i - 1)$; случайная – $u(t) = \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}$.

Таким образом, развитие гидрологической характеристики $W(t)$ рассматривается как стохастический процесс и обладает признаками нестационарности. В то же время необходимо ввести некоторую систематизацию процесса многолетнего колебания гидрологической характеристики $W(t)$, чтобы найти соответствующие способы ее анализа и прогноза. Если в основу систематизации положить характер изменения основных статистических параметров, какими являются математическое ожидание $m(t)$ и дисперсия $D(t) = D[W(t)]$, или среднеквадратическое отклонение $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$, то можно различить следующие два простейших типа нестационарных процессов, которые наблюдаются при развитии гидрологических процессов в речном бассейне [1]. Во-первых, математическое ожидание (норма стока) $m(t)$ во времени является переменным (нестационарность первого порядка); во-вторых, математическое ожидание (норма стока) $m(t)$ и дисперсия, или среднеквадратическое отклонение $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$ во времени, являются переменными (нестационарность второго порядка). Очевидно, необходимо прогнозировать как математическое ожидание $m(t)$ и $\sigma(t)$ или $C_v(t) = \sigma(t)/m(t)$. Для прогнозирования $m(t)$ и $C_v(t)$ при наличии временных рядов годовых и сезонных объемов речного стока $W(t)$ можно использовать наиболее широко распространенные методы, критерий наименьших квадратов и его разновидности: в частности, метод наименьших квадратов (МНК), метод скользящего среднего, экспоненциального сглаживания и т.п.

Исходя из вышеизложенного методического подхода, вероятностный прогноз гидрологической характеристики годовых и сезонных объемов притока речных вод $W_p(t)$ в характерных створах речных систем реализуется в такой последовательности:

1. Задан временной ряд, организованный из годовых объемов притока речных вод $W_1, W_2, \dots, W_p, \dots, W_N$, где N – количество расчетных временных отрезков в данном ряду (годы).

2. Используя один из упомянутых методов (например, метод наименьших квадратов) и заданный исходный временной ряд $W_i(t)$ определяется функциональное уравнение среднемноголетней величины годового притока (математическое ожидание) речных вод в заданном створе реки $m(t)$;

3. Используя функциональное уравнение $m(t)$ осуществляется экстраполирование (прогноз) среднемноголетней величины (нормы) годового притока в момент $t + \Delta t$, то есть за благовременности Δt .

4. Определяется коэффициент изменчивости C_v по уравнению (5). Принимается гипотеза о том, что коэффициент изменчивости C_v не меняется во времени (нестационарность первого порядка).

5. Применяя трехпараметрическое гамма-распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля и найденные значения $m(t + \Delta t)$ и C_v строятся прогнозные кривые обеспеченности $W_p(t)$. При этом $C_s = nC_v$ (n определяется методом подбора).

Результаты и их обсуждение. Очевидно, что современное развитие науки учения вод суши не располагает возможностью календарного предвидения изменения речного стока на ближайшие годы и на десятки лет вперед. Соответственно, динамико-стохастический анализ данных наблюдений за формированием речного стока является одним из основных направлений предвидения будущего режима этого процесса в вероятностной форме.

При анализе временных рядов, организованных из притоков воды $W(t)$ бассейна р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда за период 1881/1882-2020/2021 гг. ($n = 140$ лет) и 1914/1915-2020/2021 гг. ($n = 107$ лет), выявлено следующее. Первому базовому (расчетному) периоду свойственны три периода: относительно многоводный 1881/1882-1929/1930 гг.; сравнительно маловодный 1930/1931-1975/1976 гг. и повышенный многоводный 1976/1977-2020/2021 гг. Второму периоду свойственны два периода: относительно маловодный 1914/1915-1975/1976 гг. и сравнительно многоводный 1976/1977-2020/2021 гг.

Статистические параметры годового и сезонного стока р. Волги у г. Волгограда для этих периодов различаются [7]. Гипотеза однородности выборочных дисперсий в этих выборках не отвергается. Проверка однородности средних по критерию Стьюдента выявила обратную картину. Данная оценка показала, что при 1%-ных и менее высоких уровнях значимости материалы наблюдений по стоку р. Волги за сравниваемые периоды не могут причисляться к разряду однородных. Поскольку критерий Стьюдента является более информативным, то в целом сравниваемые ряды как первого базового периода (1881/1882-2020/2021 гг.), так и второго базового периода (1914/1915-2020/2021 гг.) следует считать статистически неоднородными. В результате нами получена N -кратная (в данном случае 7-кратная) выборка гидрологической характеристики $\{W(t): t \in T\}$ в реальных условиях развития гидрологических процессов в бассейне р. Волги в течение n -летнего периода времени (табл. 1). Каждая такая выборка создает предпосылки для оценки не только статистических параметров

кривых обеспеченностей выявленных базовых периодов, но и для прогноза параметров этих кривых на предстоящие периоды и построения самих прогнозных кривых обеспеченности гидрологической характеристики $\{W(t): t \in T\}$.

Используя, имеющиеся в нашем распоряжении 7-кратные выборки (временные ряды) организованных гидрологических характеристик $W(t)$ и метод наименьших квадратов, получили линейные функциональные уравнения выявлен-

ных трендов [7]. С использованием этих функциональных уравнений был осуществлен прогноз изменения среднесуточной нормы притока р. Волга в створе Волгоградского гидроузла на уровне 2030 и 2050 гг. (табл. 1). В таблице 1 приведены статистические параметры годового стока р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда для расчетных (базовых) периодов и прогнозы среднесуточных объемов (нормы) рассматриваемых периодов для уровней 2030 и 2050 гг.

Таблица 1

Статистические параметры годового стока р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда и прогнозные значения среднесуточного годового объема (нормы) стока, полученные по линейным функциональным уравнениям [7]

Table 1

Statistical parameters of the annual runoff of the Volga River in the zone of formation near the city of Volgograd and forecast values of the average long-term annual volume (norms) of runoff obtained from linear functional equations [7]

№ выборки Sample №	Периоды Periods	Базовый период (период наблюдений) Base period (observation period)			W _{сп.} период прогноза, км ³ /год W _{av.} period of forecasting km ³ /year	
		W _{сп.} , км ³ /год	C _V	C _S = 2C _V	2030 г.	2050 г.
1	1881/1882-2020/2021, n = 140 лет	257	0,17	0,34	269	272
2	1881/1882-1929/1930, n = 49 лет	259	0,17	0,34	281	295
3	1930/1931-1975/1976, n = 46 лет	242	0,16	0,32	266	281
4	1976/1977-2020/2021, n = 45 лет	272	0,14	0,28	250	237
5	1914/1915-2020/2021, n = 107 лет	248	0,18	0,36	272	280
6	1914/1915-1975/1976, n = 62 лет	233	0,19	0,38	218	211
7	1976/1977-2020/2021, n = 45 лет	269	0,14	0,28	257	250

Для построения базовых и прогнозных кривых обеспеченности наряду с нормой также необходимо из уравнений $C_S = n \cdot C_V$ определить параметр n . При известных значениях коэффициента изменчивости C_V параметр n определен методом подбора, включающим в себя сопоставление эмпирических и теоретических кривых обеспеченности базовых периодов в различных соотношениях C_S и C_V . Коэффициент изменчивости C_V для рассматриваемых базовых периодов определен методом моментов. В результате сопоставления для годового объема притока $W(t)$ р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда наилучший результат получен при $C_S = 2C_V$. Кроме того, поскольку на первом этапе рассматривается гипотеза развития гидрологических процессов в бассейне р. Волга как нестационарный процесс первого порядка, полученное соотношение $C_S = 2C_V$ принимается постоянным во времени и используется для построения прогнозных кривых обеспеченностей рассматриваемых периодов.

Таким образом, используя таблицы трехпараметрического гамма распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [1, 13] при $C_S = 2C_V$ построили кривые обеспеченностей базового (современный период наблюдения) и прогнозных периодов.

Ординаты этих кривых обеспеченностей приведены в таблице 2, кривые обеспеченности базового периода наблюдения – на рисунке 1, а прогнозные кривые обеспеченности – на рисунках 2 и 3.

Как следует из таблицы 2 и рисунков 1-3, каждый выборочный временной ряд, полученный для годового стока р. Волга у г. Волгограда, отличается от соседнего временного ряда, что свидетельствует об изменении условий при формировании речного стока в этом бассейне за рассматриваемый более столетний период наблюдений.

Все выявленные выборочные временные ряды $\{W(t): t \in T\}$ образуют ансамбль развития гидрологического процесса в бассейне р. Волга за период 1881/1882-2020/2021 гг. и 1914/1915-2020/2021 гг. При принятии гипотезы нестационарности первого порядка нами были получены ансамбли вероятностных прогнозов (прогнозные кривые обеспеченностей) на уровне 2030 и 2050 гг. гидрологической характеристики $\{W(t): t \in T\}$ бассейна р. Волга у г. Волгограда. Как следует из рисунка 1 (базисный период), данные кривых существенно различаются. Расхождение в оценках по ним особенно в зоне больших обеспеченностей достигает 20-30% (32 и 46 км³/год соответственно при обеспеченности $P = 97\%$).

Таблица 2

**Объем годового стока р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда
при различной обеспеченности, км³/год**

Table 2

**The volume of annual runoff of the Volga River in the zone of formation
near the city of Volgograd with different availability, km³ / year**

№ выборки Sample №	Периоды Periods	Обеспеченности, в%-ах Availability, in%										
		0,1	1,0	5,0	25	50	75	80	85	90	95	97
	Базовый (расчетный) период / Basic (calculated) period											
1												
1.1	1881/1882-2020/2021	415	370	333	285	254	226	220	212	203	190	182
1.2	1881/1882-1929/1930	418	373	336	287	256	228	222	214	205	192	183
1.3	1930/1931-1975/1976	381	342	309	266	240	215	209	202	194	182	175
1.4	1976/1977-2020/2021	407	369	338	296	270	245	240	233	225	213	206
1.5	1914/1915-2020/2021	410	364	326	276	245	217	210	202	193	180	172
1.6	1914/1915-1975/1976	394	348	310	261	230	202	195	188	178	166	158
1.7	1976/1977-2020/2021	402	365	334	293	267	243	237	231	222	211	204
	Прогноз на уровне 2030 г. / Forecast on the level of the 2030 year											
2												
2.1	1881/1882-2020/2021	434	387	349	298	266	237	230	222	213	199	190
2.2	1881/1882-1929/1930	454	405	364	311	278	247	241	232	222	208	199
2.3	1930/1931-1975/1976	419	376	340	293	263	236	230	222	213	201	193
2.4	1976/1977-2020/2021	374	339	311	272	248	226	220	214	207	196	189
2.5	1914/1915-2020/2021	450	399	357	303	269	237	230	222	212	197	188
2.6	1914/1915-1975/1976	369	326	290	244	215	189	183	176	167	155	147
2.7	1976/1977-2020/2021	384	349	319	280	255	232	226	220	212	201	195
	Прогноз на уровне 2050 г. / Forecast on the level of the 2050 year											
3												
3.1	1881/1882-2020/2021	439	392	353	301	269	239	233	225	215	201	193
3.2	1881/1882-1929/1930	476	425	382	327	292	260	253	244	233	218	209
3.3	1930/1931-1975/1976	442	397	359	309	278	249	243	235	225	212	203
3.4	1976/1977-2020/2021	355	322	294	258	235	214	209	203	196	186	179
3.5	1914/1915-2020/2021	463	411	368	312	277	444	237	228	218	203	194
3.6	1914/1915-1975/1976	357	315	281	236	208	183	177	170	162	150	143
3.7	1976/1977-2020/2021	374	339	311	272	248	226	220	214	207	196	189

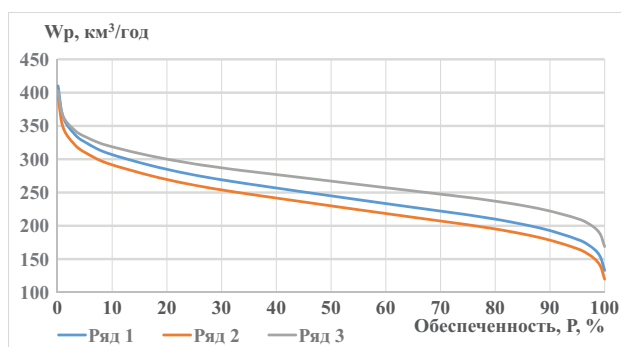


Рис. 1. Кривые обеспеченности ($W = f(P)$) базового периода (1914/1915-2020/2021 гг.):

Ряд 1 – 1914/1915-2020/2021 гг.;
Ряд 2 – 1914/1915-1975/1976 гг.;
Ряд 3 – 1976/1977-2020/2021 гг.

Fig.1. Availability curves ($W = f(P)$) of the base period (1914/1915-2020/2021):

Series 1 – 1914/1915-2020/2021;
Series 2 – 1914/1915-1975/1976;
Series 3 – 1976/1977-2020/2021

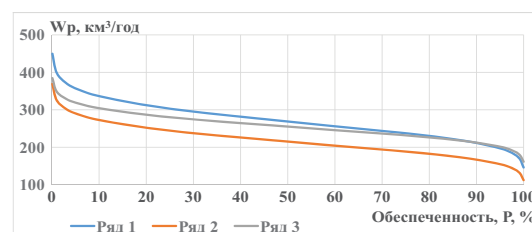


Рис. 2. Прогнозные кривые обеспеченности ($W = f(P)$) на уровне 2030 г. (1914/1915-2020/2021 гг.):

Ряд 1 – 1914/1915-2020/2021 гг.; Ряд 2 – 1914/1915-1975/1976 гг.;
Ряд 3 – 1976/1977-2020/2021 гг.

Fig.2. Forecast availability curves ($W = f(P)$) at the level of 2030 (1914/1915-2020/2021):

Series 1 – 1914/1915-2020/2021;
Series 2 – 1914/1915-1975/1976;
Series 3 – 1976/1977-2020/2021

Таким образом, при анализе данных наблюдений базисных периодов 1881/1882-2020/2021 гг.

и 1914/1915-2020/2021 гг. установлено, что начиная с 1976/1977 г. имели место в среднем не только повышение водности стока р. Волги, но и увеличение ординаты кривой обеспеченности периода 1976/1977-2020/2021 гг. по сравнению с кривой обеспеченности за весь период наблюдения 1914/1915-2020/2021 гг. При этом, период наблюдения 1914/1915-1975/1976 гг. как по среднемуголетним значениям годового стока (нормам), так и по ординатам кривых обеспеченности выступает как маловодный период по водности в бассейне р. Волги (табл. 1, 2). Аналогичной является картина при исследовании данных наблюдений за период 1881/1882-2020/2021 гг. (табл. 1, 2).

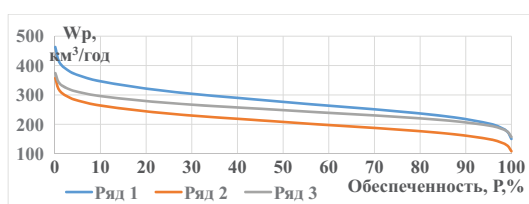


Рис. 3. Прогнозные кривые обеспеченности ($W = f(P)$) на уровне 2050 г. (1914/1915-2020/2021 гг.):

Ряд 1 – 1914/1915-2020/2021 гг.;

Ряд 2 – 1914/1915-1975/1976 гг.;

Ряд 3 – 1976/1977-2020/2021 гг.

Fig.3. Forecast availability curves ($W = f(P)$) at the level of 2050 (1914/1915-2020/2021):

Series 1 – 1914/1915-2020/2021;

Series 2 – 1914/1915-1975/1976;

Series 3 – 1976/1977-2020/2021

Анализ ансамбля прогнозов показывает, что за первую половину XXI в. в водности р. Волга может наблюдаться пестрая картина, что отражено в таблицах 1, 2 и на рисунке 1. Наряду с относительным увеличением среднесуточных величин притока р. Волга у г. Волгограда не исключено уменьшение его за первую половину XXI в. Так, по прогнозу (по выборкам 4) (табл. 1) среднесуточный приток р. Волга у г. Волгограда в первой половине XXI в. составит 250 км³/год на уровне 2030 г. и 237 км³/год на уровне 2050 г. и соответственно может уменьшаться на 22 км³/год (8%) и 35 км³/год (13%) по сравнению с базисным периодом 1976/1977-2020/2021 гг. Если анализировать базовые и прогнозные кривые обеспеченности рассматриваемых периодов, то и здесь также наблюдается пестрая картина. Таким образом, анализ водности р. Волги по полученным выборкам со всей очевидностью показывает, что в рассматриваемом более столетнем периоде наблюдений в бассейне р. Волга наряду с повышенной водностью р. Волга, начиная с конца XX и в начале XXI в., наблюдаются

свойственные ему циклические колебания: чередование многоводных и маловодных лет разной интенсивности. Прогноз по ансамблю показывает, что в первой половине XXI в. приток р. Волга может уменьшиться примерно на 10-15% по сравнению с водностью базового периода 1976/1977-2020/2021 гг. В целом, в связи с наблюдающимся изменением глобального и соответственно регионального климата в северном полушарии Земли [15, 16] ординаты кривых обеспеченности годового стока р. Волга в зоне формирования могут перестраиваться в сторону уменьшения водности в зоне больших обеспеченностей и в сторону увеличения в зоне малых обеспеченностей, что создаст определенные трудности в водопользовании.

Выводы

1. Установлено, что развитие гидрологических процессов в бассейне р. Волги обуславливается динамико-стохастическим характером формирования его стока. Динамический характер формируется в результате воздействия геофизических и гелиофизических причин. Стохастическая же составляющая формируется под воздействием большого количества разносторонне направленных факторов и выражается в форме получения функции распределения гидрологических характеристик и корреляционных связей между исследуемыми величинами. Для отображения динамического характера развития предлагается использовать метод экстраполяции статистических закономерностей, проявившихся в сезонном и многолетнем колебаниях стока р. Волги в прошлом.

2. Вероятностная оценка (прогноз) рассматриваемой характеристики сводится к решению двух задач: 1) определению условий изменения во времени детерминированной составляющей, то есть изменения среднесуточной (нормы) величины гидрологической характеристики во времени и ее экстраполяции на период прогноза; 2) установлению характера колебаний стохастической составляющей, то есть построению прогнозной кривой обеспеченности гидрологической характеристики. Для решения первой задачи, предлагаются функциональные уравнения, характеризующие зависимость нормы притока р. Волга у г. Волгограда от времени. Далее, на основе полученных зависимостей, осуществлены экстраполяции нормы притока за первую половину XXI в., то есть на уровне 2030 и 2050 гг. Для решения второй задачи, построили ансамбли прогнозных кривых обеспеченностей притока р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда.

Библиографический список

1. **Блохинов Е.Г.** Распределение вероятностей величин речного стока. – М.: Наука, 1974. – 169 с.
2. **Естигнеев В.М.** Речной сток и гидрологические расчеты. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.
3. **Закономерности гидрологических процессов.** / Под редакцией Н.И. Алексеевского. – М.: ГЕОС, 2012. – 736 с.
4. **Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.** Гидрологические основы управления речным стоком. – М.: Изд-во Наука, 1981. – 255 с.
5. **Раткович Д.Я., Болгов М.В.** Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна. – М.: Наука, 1997. – 262 с.
6. **Христофоров А.В.** Теория случайных процессов в гидрологии. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 139 с.
7. **Исмайлова И.Г.** Анализ и прогноз речных вод в зоне формирования бассейна р. Волги (до г. Волгограда) методом тенденции / Исмайлов Г.Х., Раткович Л.Д. и др. // Природообустройство. – 2022. – № 2. – С. 69-78.
8. **Добровольский С.Г.** Климатические изменения в системе «Гидросфере-Атмосфере». – М.: ГЕОС, 2002. – 232 с.
9. **Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-европейской равнины в условиях потепления XXI века** / Кислов А.В., Естигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. – М.: Макс Пресс, 2008. – 292 с.
10. **Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я.** Стохастические модели в инженерной гидрологии. – М.: Наука, 1982. – 184 с.
11. **Кучмент Л.С. Гельфан, А.Н.** Динамика-стохастические модели формирования речного стока. – М.: Наука, 1993. – 103 с.
12. **Христофоров А.В.** Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 166 с.
13. **Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик.** – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 447 с.
14. **Кислов А.В.** Климат в прошлом, настоящем и будущем. – М.: МАИК «Наука / Интерпериодика», 2001. – 351 с.
15. **Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века** / А.В. Кислов, В.М. Естигнеев, С.М. Малхазова и др. – М.: Макс Пресс, 2008. – 292 с.
16. **Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю.** Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. – СПб: Наука, 2007. – С. 20-23.

Критерии авторства

Исмайлов Г.Х., Исмайлова И.Г., Мурашченкова Н.В., Перминов 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

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 22.07.2022

Одобрена после рецензирования 12.09.2022

Принята к публикации 19.09.2022

References

1. **Blokhinov E.G.** Raspredelenie veroyatnostej velikich rechnogo stoka. – M.: Nauka, 1974. – 169 s.
2. **Estigneev V.M.** Rechnoj stok i gidrologicheskie raschety. – M.: Izd-vo MGU, 1990. – 304 s.
3. **Zakonomernosti gidrologicheskikh protsessov.** / Pod redaktsiej N.I. Alexeevskogo. – M.: GEOS, 2012. – 736 s.
4. **Kritskij S.N., Menkel M.F.** Gidrologicheskie osnovy upravleniya rechnym stokom. – M.: Izd-vo Nauka, 1981. – 255 s.
5. **Ratkovich D.Ya., Bolgov M.V.** Stohasticheskie modeli kolebanij sostavlyayushchih vodnogo balansa rechnogo bassejna. – M.: Nauka, 1997. – 262 s.
6. **Khristoforov A.V.** Teoriya sluchajnyh protsessov v gidrologii. – M.: Izd-vo MGU, 1994. – 139 s.
7. **Ismajlova I.G.** Analizil prognoz rechnyh vod v zone formiorvaniya bassejna r. Volgi (do g. Volgograda) matodom tendentsii / Ismajlov G.Kh., Ratkovich L.D. i dr. // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 2. – S. 69-78.
8. **Dobrovolsky S.G.** Klimaticheskie izmeneniya v sisteme «Gidrosfere-Atmosfera». – M.: GEOS, 2002. – 232 s.
9. **Prognoz klimaticheskoy resursoobespechenosti Vostochnoevropejskoj ravniny v usloviyah potopleniya XXI veka** / Kislov A.V., Estigneev V.M., Malkhazova S.M. i dr. – M.: Maks Press, 2008. – 292 s.
10. **Muzylev S.V., Privalskij V.E., Ratkovich D.Ya.** Stohasticheskie modeli v inzhenernoj gidrologii. – M.: Nauka, 1982. – 184 s.
11. **Kuchment L.S., Gel'fan A.N.** Dinamika-stohasticheskie modeli formirovaniya rechnogo stoka. – M.: Nauka, 1993. – 103 s.
12. **Khristoforov A.V.** Nadezhnost raschetov rechnogo stoka. – M.: Izd-vo MGU, 1993. – 166 s.
13. **Posobie po opredeleniyu raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik.** – L.: Gidrometeoizdat, 1984. – 447 s.
14. **Kislov A.V.** Klimat v proshlom, nastoyashchem i budushchem. – M.: MAIK «Nauka / Interperiodika», 2001. – 351 s.
15. **Forecast of climatic resource availability of the East European Plain in the conditions of flooding of the XXI century** / A.V. Kislov, V.M. Estigneev, S.M. Malkhazova et al. – M.: Max Press, 2008. – 292 p.
16. **Shiklomanov I.A., Georgievsky V.Yu.** Sovremennye i perspektivnye izmeneniya stoka rek Rossii pod vliyaniem klimaticheskikh faktorov / Vodnye resursy sushi v usloviyah izmenyayushchegosya klimata. – SPb: Nauka, 2007. – S. 20-23.

Criteria of authorship

Ismajlova I.G., Ismajlov G.H., Murashchenkova N.V., Perminov A.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Ismajlov G.H., Ismajlova I.G., Murashchenkova N.V., Perminov A.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 22.07.2022

Approved after reviewing 12.09.2022

Accepted for publication 19.09.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504: 556.18:627.8

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-83-92

ОЦЕНКА ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО И ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕКИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО БАЛАНСА

РАТКОВИЧ ЛЕВ ДАНИЛОВИЧ✉, д-р техн. наук, профессор

levkivr@mail.ru

ИСМАЙЛОВА ИРИНА ГАБИЛОВНА, заведующий лабораторией

igism37@mail.ru

БОВИНА ЮЛИЯ АНАТОЛЬЕВНА, канд. техн. наук, доцент

r.yu.a@yandex.ru

ЩЁГОЛЕВА СОФЬЯ НИКОЛАЕВНА, студент магистратуры

sonya_fob@mail.ru

МАНХАЛЬ МУАЛЛА, аспирант, Сирия

manhal.moualla@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 19, Россия

Статья посвящена вопросам обоснования проектных решений в области водного хозяйства и гидротехнического строительства с использованием имитационных водохозяйственных моделей. Затрагиваются проблемы создания баз данных с применением различных моделей природных процессов включая системы прогнозирования климата и модель динамики атмосферы. Рассматривается перечень задач, которые решаются с применением моделей класса MIKE, способных, с одной стороны, решать задачи моделирования природных процессов, с другой – осуществлять имитационное моделирование природно-технических систем, в том числе водохозяйственных. Программные пакеты могут использоваться для разработки правил управления отдельными водохранилищами и их каскадами. Отмечается, что при создании водохозяйственных систем, определении их параметров и режима функционирования целесообразно разрабатывать имитационные модели для экспертного водохозяйственного анализа. Это позволяет оценить функциональные возможности систем и избежать значительных ошибок на более детальных стадиях проектирования и эксплуатации. В качестве примера приводится водохозяйственная система Западного Маныча, притока Дона. Сформулированы проблемы объекта и круг задач, подлежащих исследованию. Система функционирует благодаря регулярной водоподаче в нее части стока рек Дон и Кубань. Ресурсы переброски расходуются на орошение, гидроэнергетику и деминерализацию озера Маныч-Гудило, представляющего собой водно-болотные угодья Ростовской области, имеющие международное значение. В работе система схематизирована, проведен гидролого-водохозяйственный анализ развития орошаемых земель и гидроэнергетического потенциала с использованием имитационного моделирования водохозяйственного баланса с элементами оптимизации. Сформулированы направления дальнейших исследований по системе водообеспечения бассейна реки Западный Маныч.

Ключевые слова: имитационное моделирование, водохозяйственные балансы, гидроэнергетический потенциал, комбинированная переброска стока, система Западного Маныча

Формат цитирования: Раткович Л.Д., Исмайлова И.Г., Бовина Ю.А., Щёголева С.Н., Манхаль М. Оценка водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала реки на основе имитационного моделирования водохозяйственного баланса // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 83-92. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-83-92.

© Раткович Л.Д., Исмайлова И.Г., Бовина Ю.А.,
Щёголева С.Н., Манхаль М., 2022

Original article

ASSESSMENT OF WATER MANAGEMENT AND HYDROPOWER POTENTIAL OF THE RIVER BASED ON SIMULATION MODELING OF WATER MANAGEMENT BALANCE

RATKOVICH LEV DANILOVICH[✉], *doctor of technical sciences, professor*

levkivr@mail.ru

ISMAJYLOVA IRINA GABILOVNA, *head of the laboratory*

igism37@mail.ru

BOVINA YULIYA ANATOLJEVNA, *candidate of technical sciences, docent*

r.yu.a@yandex.ru

SHCHEGOLEVA SOFYA NIKOLAEVNA, *student of the MA course*

sonya_fob@mail.ru

MANHAL MOUALLA, *post graduate student, Syria*

manhal.moualla@mail.ru

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

The article is devoted to the issues of substantiation of design solutions in the field of water management and hydraulic engineering construction using simulated water management models. The problems of creating databases using various models of natural processes, including climate forecasting systems and a model of atmospheric dynamics, are touched upon. The list of tasks that are solved with the use of MIKE class models, capable on the one hand to solve the problems of modeling natural processes, on the other – to carry out simulation modeling of natural technical systems, including water management, is considered. Software packages can be used to develop rules for managing individual reservoirs and their cascades. It is noted that when creating water management systems, determining their parameters and mode of operation, it is advisable to develop simulation models for expert water management analysis. This allows you to evaluate the functionality of the systems and avoid significant errors at more detailed stages of design and operation. As an example, the water management system of the Zapadny Manych, a tributary of the Don, is given. The problems of the object and the range of tasks to be investigated are formulated. The system functions due to the regular water supply of part of the Don and Kuban rivers flow to it. The transfer resources are spent on irrigation, hydropower and demineralization of Lake Manych Gudilo, which is a wetland of the Rostov region of international importance. In the work, the system is schematized and a hydrological and water management analysis of the development of irrigated lands and hydropower potential is carried out using simulation modeling of the water balance with optimization elements. The directions of further research on the water supply system of the Zapadny Manych River basin are formulated.

Keywords: *simulation modeling, water management balances, hydropower potential, combined flow transfer, Zapadny Manych system*

Format of citation: Ratkovich L.D., Ismajylova I.G., Bovina Yu.A., Shchegoleva S.N., Manhal M. Assessment of water management and hydropower potential of the river based on simulation modeling of water management balance // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 5. – P. 83-92. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-83-92.

Введение. Состав и параметры сооружений должны не только обеспечивать намеченные показатели, обусловленные водохозяйственными планами, но и гарантировать оптимальную реализацию начального замысла. Подобный подход стал возможен благодаря активному применению всевозможных имитационных математических моделей, достоверно отражающих физическую сущность процессов наряду с элементами управления водохозяйственными системами – в частности, водохранилищами. Созданы мощные компьютерные пакеты – такие,

например, как набор MIKE (3, 11, MIKE21, MIKEDHE, basin, flood...), решающий многофакторные научные и проектные задачи водного профиля.

Моделирование природных процессов получает все большие возможности международного использования благодаря системе прогнозирования климата CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), базирующейся на ретроспективном анализе данных наблюдений в сочетании с математическим моделированием динамики атмосферы [1]. Повышается значение подразделений

согласования и надзора вопросов безопасности в нашей стране и за рубежом – DSRO (division of safety review and oversight), действующих на основе прогноза и моделирования.

Наличие средств прогноза и моделирования является фундаментальной основой водохозяйственной, социально-экономической и природоохранной деятельности. Эта основа позволяет сформировать максимально надежную информационную базу для проектов и научных исследований. Важно отделять информационную составляющую, безусловно, исключительно важную, от моделей антропогенного внедрения в виде природно-технических систем.

Глобальные модели класса MIKE [2, 3] направлены, с одной стороны, на моделирование естественных процессов, с другой стороны – на решение инженерных задач включая разработку правил управления водными ресурсами водохранилищ комплексного назначения и их каскадов с учетом схем водоотведения и переброски стока.

Использование указанных моделей связано с детализацией проектных решений и с масштабными научными исследованиями, что существенно осложнено недостаточно надежной информацией, главным образом – гидрометеорологической, гидрологической и гидрогеологической – в условиях вероятных климатических трендов.

Экспертный анализ водообеспеченности, экологической и противопаводковой безопасности требует дополнительного моделирования на тех или иных допущениях. К примеру, детерминированная модель стока на предварительной стадии оценки показателей водохозяйственной системы обычно малоэффективна. Более приемлемым является стохастическое моделирование с использованием обобщенных параметров стока и водопотребления [4, 5]. Что касается максимального стока, то здесь необходимо моделирование вероятных форм максимального гидрографа, разной повторяемости, с использованием подходов, изложенных в работе [6] и действующих согласно СП 33-101-2003 (взамен СНиП 2.01.14-83).

Оценка водообеспеченности базируется на сопоставлении расчетного стока с объемами перспективного водопотребления. В то же время при разработке схем комплексного использования и охраны водных ресурсов требуется определение водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала рек. В качестве инструмента для таких оценок могут применяться не сложные имитационные водно-балансовые модели, отражающие принципиальную структуру водохозяйственного комплекса, проблематику

речного бассейна или региона и рациональную схему управления водными ресурсами.

Режим регулирования стока является неотъемлемой частью функционирования водохозяйственных систем [7, 8]. В статье рассмотрены особенности имитационного моделирования системы с оценкой водохозяйственных и водно-энергетических показателей, с учетом присущих объекту эколого-водохозяйственных проблем.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследований рассмотрена система комбинированной переброски части стока Дона и Кубани в Западный Маныч [9, 10]. Весьма важно вычленив реальные проблемы объекта и провести экспертный анализ функционирования системы в планируемой перспективе, используя соответствующие имитационные модели водохозяйственного баланса. Выбор объекта обусловлен, с одной стороны, актуальностью проблем и характерными схемами управления водными ресурсами. С другой стороны, на данном примере можно наглядно показать вариантность анализа, связанного с регулированием и территориальным перераспределением стока.

При проведении исследований использовались программные модули, работающие в среде Excel в режиме компенсированного регулирования стока, с учетом особенностей водохозяйственных комплексов. Расчеты базируются на методике анализа по обобщенным параметрам стока и водопотребления, а также на имитационном моделировании водохозяйственного баланса лет расчетной обеспеченности.

Комбинированная переброска стока в бассейн реки Западный Маныч. Западный Маныч, левый приток Дона, протекает по территории Европейской части России, Калмыкии, Ростовской области и Ставрополья. Несколько тысячелетий назад пролив между Азовским морем и Каспием образовал реку Маныч с площадью бассейна 35,4 тыс. кв. км и соленые озера с самым крупным озером Маныч-Гудило (рис. 1).

В настоящее время Маныч является практически не естественным водотоком, а каскадом водохранилищ. Идея создания судоходного тракта от Дона до Каспия осуществлялась путем строительства Усть-Манычского, Веселовского и Пролетарского водохранилищ (рис. 2). Однако после Великой Отечественной войны 1941-1945 гг. от основной идеи отошли и перебрасываемые воды направили на орошение. С 1970-х гг. водохранилища подверглись сильной минерализации. Кроме того, добавилась общая проблема маловодья всего бассейна Дона.



Рис. 1. Маныч-Керченский пролив 17 тыс. лет назад и современная схема бассейна
<https://dzen.ru/media/id/5b575c2b055c9d00a952e94f/cto-bylo-vmesto-velikogo-oledeneniia-5b916f9eafa75b00a992c963>

Fig. 1. The Manych-Kerch Strait 17 thousand years ago and the modern scheme of the basin
<https://dzen.ru/media/id/5b575c2b055c9d00a952e94f/cto-bylo-vmesto-velikogo-oledeneniia-5b916f9eafa75b00a992c963>

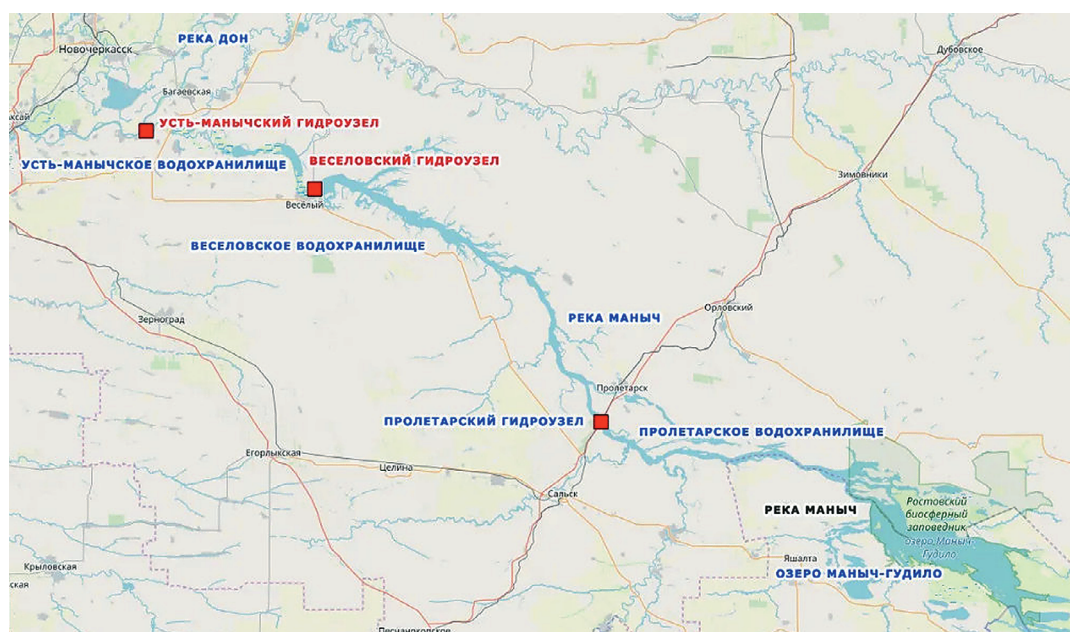


Рис. 2. Схема расположения водохранилищ на реке Маныч
<https://kazakoved.ru/opisanie-reki-manych/>

Fig. 2. Scheme of the location of reservoirs on the Manych River
<https://kazakoved.ru/opisanie-reki-manych/>

В течение почти 15 лет река Дон и его притоки, в том числе Маныч, страдают от маловодья. Значительная часть стока Дона не доходит до Ростовской области, поскольку используется для водопотребления в областях выше створа Цимлянского гидроузла (Липецкая, Волгоградская, Воронежская области).

Следует отметить, что при условии реализации национального проекта «Экология» данные проблемы можно «смягчить», для чего потребуются расчистка русел, родников и малых рек. Устаревшая поливная сеть характеризуется большими потерями. Кроме того, необходим весь комплекс водосберегающих мероприятий, связанных, главным образом, с оптимизацией режимов орошения и комплексными

мелиоративными мероприятиями. На данном этапе, кроме экономии водных ресурсов, другого пути практически нет.

Задачи перспективного анализа ситуации формулируются следующим образом:

- ♦ оценка возможного объема изъятия стока из реки Дон при соблюдении требований к ресурсам Цимлянского водохранилища;
- ♦ прогноз отраслевого водопотребления в системе на планируемую перспективу;
- ♦ водохозяйственный баланс объединенного водохранилища с учетом работы ГЭС;
- ♦ оценка водно-энергетического потенциала объединенного водохранилища с максимальной среднемесячной мощностью и выбор варианта перспективного баланса.

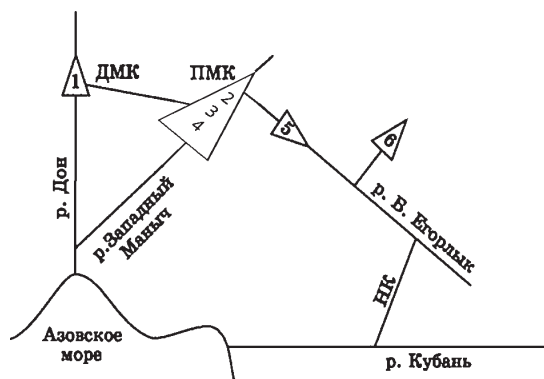


Рис. 3. Схема водохозяйственной системы Западного Маныча:

ДМК – Донской магистральный канал;
 НК – Невинномысский канал;
 ПМК – Пролетарский магистральный канал;
 1 – Цимлянское; 2-4 каскад Пролетарского, Веселовского, Усть-Манычского водохранилищ;
 5 – Новотроицкое; 6 – Сengiлеевское

Fig. 3. Scheme of the water management system of the Zapadny Manych:

DMC – Donskoj main canal; NC – Nevinnomyssky canal;
 PMC – Proletarsky main canal;
 1 – Tsimlyanskoe; 2-4 cascade of Proletarsky, Veselovsky, Ust-Manych reservoirs;
 5 – Novotroitskoe; 6 – Sengileyevskoye

Задачей отдельного рассмотрения является водно-солевой баланс озера Маныч-Гудило.

Оценка возможного объема изъятия стока из реки Дон при соблюдении требований к ресурсам Цимлянского водохранилища. Водообеспечение системы Западного Маныча всецело зависит от внешней дотации водных ресурсов из рек Дона и Кубани. Кубань не рассматривается в настоящих исследованиях, поскольку этот непростой бассейн также требует отдельного изучения. Определяется максимально возможный отбор из Дона в Донской магистральный канал (ДМК). Имитационная модель водохозяйственного баланса в створе Цимлянского гидроузла строится на традиционном алгоритме в соответствии с расчетной схемой рисунка 3.

На основании прогноза комплексного водопотребления сформирована структура водохозяйственного баланса, из которого устанавливается максимальный объем отбора в ДМК. В свою очередь, максимальный объем определяется ресурсами расчетного года с учетом регулирования стока и многолетней сработки, которая определена заранее по номограммам обобщенного метода (2,94 км³). Процедура максимизации ДМК основана на совместном решении балансовых уравнений и неравенств. Уравнение водохозяйственного баланса в данной

ситуации имеет вид: располагаемые водные ресурсы в i -том интервале времени внутри года

$$R_{av,i} = S_{ест,i} \pm R_i + W_{вв,i} \quad (1)$$

где i -тый интервал времени внутри года; $S_{ест,i}$ – естественный приток; $\pm R_i$ – регулирование притока; $W_{вв,i}$ – возвратные воды от потребителей; $R_{av,i}$ – располагаемые водные ресурсы.

Суммарные требования к водным ресурсам – это:

$$WR_i = W_{всн,i} + W_{ор,i} + W_{рх,i} + L_{пот,i} + W_{вдск,i} + U_{пзв,i} + W_{кп,i} + W_{дмк,i} + L_{исп-лед,i}, \quad (2)$$

где $W_{всн,i}$ – промышленно-коммунальное водоснабжение; $W_{ор,i}$ – оросительные системы; $W_{рх,i}$ – рыбное хозяйство; $L_{пот,i}$ – потери на шлюзование и фильтрацию; $W_{вдск,i}$ – отбор в Волго-Донской канал; $U_{пзв,i}$ – ущерб речному стоку вследствие подземного водозабора; $W_{кп,i}$ – комплексный попуск; $W_{дмк,i}$ – водозабор в ДМК; $L_{исп-лед,i}$ – потери на шлюзование и фильтрацию.

Следует учесть такие условия:

если $R_{av,i} \geq WR_i$,

то $D_i = 0$ (дефицит)

и $Res_i = R_{av,i} - WR_i$ (резерв);

если $R_{av,i} < WR_i$,

тогда $D_i = (WR_i - R_{av,i})$ (дефицит)

и $Res_i = 0$ (резерв).

Целевая функция модели в данном случае формулируется как суммарный годовой объем изъятия стока в ДМК:

$$\sum_{i=1}^{i=12} W_{дмк,i} \rightarrow \max. \quad (3)$$

Располагая информацией об объеме и режиме водоподдачи из Цимлянского водохранилища, получаем возможность оценки многоцелевой водоотдачи при известном объеме объединенного водохранилища, а также в случае увеличения полезного объема. Методика имитационного моделирования аналогична описанной, но целевые показатели другие. Решение одно- и многокритериальной оптимизации связано с параллельным развитием орошения и гидроэнергетического потенциала с учетом прогнозируемых темпов развития отрасли:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{i=12} W_{ор,i} \rightarrow \max \\ N_{гир} \rightarrow \max \\ V_{об} \rightarrow \min. \end{cases} \quad (4)$$

Результаты и их обсуждение. Раскладка объема переборки из Цимлянского

водохранилища, соответствующая действующим правилам управления, представлена в таблице 1.

Решение уравнения (3) иллюстрируется развернутым водохозяйственным балансом (табл. 2). Основным результат здесь – это

объем дотации в размере 1615 млн м³. Баланс системы Пролетарского, Веселовского водохранилищ и Усть-Маньчского водохранилища, реализующий решение системы (4), представлен в таблице 3. Оценка гидроэнергетического потенциала приведена в таблице 4.

Таблица 1

Распределение дотации по трассе переброски, млн м³

Table 1

Distribution of subsidies along the transfer route, mln. m³

1	Орошение рисовых севооборотов / Irrigation of rice crop rotations	553,20
2	Орошение не рисовых севооборотов / Irrigation of non-rice crop rotation	475,80
3	Сельскохозяйственное водоснабжение / Agricultural water supply	6,70
4	Коммунально – бытовое и промышленное водоснабжение Public and industrial water supply	2,90
5	Рыбное хозяйство / Fishery	20,50
6	Рыбозаградитель ДМК / Fish barrier DMC	80,10
7	Обводнение малых рек / Flooding of small rivers	12,20
8	Санитарный попуск в р. Сал / Sanitary release in the Sal river	82,10
9	Водоподача в Западный Маньч в т.ч. Water supply to the Zapadny Manych including	261,40
9.1	Оросительные системы / Irrigation systems	134,40
9.2	Опреснительный транзит (для Маньч-Гудило) Desalination transit (for Manych-Gudilo)	127,00
10	Потери в канале / Losses in the canal	117,60
	ИТОГО / TOTAL	1612

В числе переменных – оптимизации $V_{\text{мо}}$, $V_{\text{плз}}$, $N_{\text{гпр}}$, $\pm \Delta V$ (режим регулирования стока). Как показывают исследования, минимальная требуемая емкость объединенного водохранилища для достижения максимального эффекта с точки зрения площадей орошения и гарантированной среднемесячной мощности составляет 1406 млн м³. Мертвый объем при этом составляет 1260 млн м³ и обеспечивает оптимальный напорный режим. Минимальная гарантированная мощность при 90%-ной обеспеченности оценивается примерно в 300 кВт с ежегодной выработкой 7625 мВт/ч. Снижение расчетной обеспеченности до 80% увеличивает мощность примерно до 410 кВт. При суточном регулировании мощности обеспечивается режим малой ГЭС с гарантированной мощностью ~5 МВт. Дальнейшее увеличение параметров водохранилища не улучшает показатели, поскольку ограничено водными ресурсами.

На рисунке 4 представлена расчетная зависимость достигаемой среднемесячной мощности от объема водохранилища.

При создании природно-технических систем, в том числе водохозяйственных, проектировщики и научные работники сталкиваются с фактором недостаточно надежной многофакторной исходной информации. В этой

ситуации необходимо провести предварительный гидролого-водохозяйственный анализ, то есть выполнить корректную экспертную оценку параметров и режима функционирования системы, используя осмысленно-минимальный объем исходных данных. В водохозяйственных системах речь идет о геофизической и гидрофизической информации, которая подверглась существенной трансформации под влиянием изменения климата и антропогенной деятельности. Определение климатических трендов исследуемого региона [11] в настоящее время основано на неподтвержденной динамике. В любом случае следует использовать имеющиеся модели для прогноза и моделирования природных процессов, причем, на наш взгляд, следует отдать предпочтение стохастическим моделям, во всяком случае – на уровне экспертного анализа. В настоящей работе акцентируется внимание на необходимости создания мобильных имитационных моделей по типу рассмотренных выше, а также модуля «REACHABLE WATER» [5]. Здесь анализируются главным образом вопросы водообеспечения, однако подход касается и пропуска максимального стока через гидроузлы с оценкой противопаводковой емкости водохранилищ [6].

Таблица 2

Водохозяйственный баланс (модель изъятия из Цимлянского водохранилища) водоподачи в бассейн Маныча

Table 2

Water management balance (model of withdrawal from the Tsimlyanskoe reservoir) of water supply in the Manych basin

Месяцы Months	ПРИХОДНАЯ ЧАСТЬ ВХБ INCOMING PART OF THE WMB					РАСХОДНАЯ ЧАСТЬ ВХБ OUTCOMING PART OF THE WMB										РЕЗУЛЬТАТЫ RESULTS WMB			
	Естественный приток Natural inflow	Регулирование стока Flow regulation	Наполнение на конец интервала Filling at the end of the interval	ВВ / WW	Располагаемые водные ресурсы ЦВ Available water resources of the Ts.R	ПКБ +XII / ПКВ +XII	Орошение / Irrigation	Рыбхоз / Fish farm	Потери-пруды-вдхр Losses-ponds-reservoir	Отбор в Волго-Донской канал, ВДСК Withdrawal into the Volgo-Donской canal, VDSC	Сокращение речного стока в результате отбора подземных вод Reduction of river runoff as a result of ground water withdrawal	Комплексный попуск Complex discharge	Потери на дополнительное испарение и льдообразование Losses on additional evaporation and ice formation	Донской магистральный канал ДМК, м³/с The Donской main canal DMC, m³/s	Донской магистральный канал ДМК, млн³ The Donской main canal DMC, mln³	Суммарные требования к водным ресурсам Total requirements to water resources	Дефицит / Deficit	Резерв / Reserv	Транзит в нижний бьеф Transit downstream
Март / March	1248,5	-541,18	15156	85,29	792,2	135,8	22,96		29,00	25,80	38,33	446,76	-70,34	44,52	119,30	792,16	0,00	0,00	446,76
Апрель / April	5185,4	-2589,9	17746	90,01	2685	135,8	70,21	70,00	29,00	25,80	38,33	1933,9	188,51	53,99	139,84	2685,5	0,00	0,00	1933,95
Май / May	4620,8	-1114,8	18861	92,49	3598	135,8	95,02		29,00	25,80	38,33	2680,0	270,10	88,13	236,19	3598,4	0,00	0,00	2680,00
Июнь / June	995,47	920,28	17941	93,29	2009	135,8	102,9		29,00	25,80	38,33	984,20	270,10	117,78	305,06	2009,0	0,00	0,00	984,20
Июль / July	744,37	1153,8	16787	88,43	1987	135,8	54,37		29,00	25,80	38,33	1018,4	270,10	112,70	302,04	1986,6	0,00	0,00	1018,40
Август / August	534,88	1267,7	15519	86,48	1889	135,8	34,84		29,00	25,80	38,33	1018,4	270,10	91,51	245,25	1889,1	0,00	0,00	1018,40
Сентябрь / September	356,59	1302,4	14217	88,96	1748	135,8	59,65		29,00	25,80	38,33	984,20	253,22	61,81	160,08	1747,9	0,00	0,00	984,20
Октябрь / October	324,11	987,90	13229	82,99	1395	135,8	0,00		29,00	25,80	38,33	1018,4	0,00	40,12	107,52	1395,0	0,00	0,00	1018,40
Ноябрь / November	296,13	318,28	12911	82,99	697,4	135,8	0,00		29,00	25,80	38,33	440,30	28,14	0,00	0,00	697,40	0,00	0,00	440,30
Декабрь / December	216,85	378,95	12532	82,99	678,8	135,8	0,00		29,00	25,80	38,33	402,00	47,83	0,00	0,00	678,79	0,00	0,00	402,00
Январь / January	183,62	431,87	12100	82,99	698,5	135,8	0,00		29,00	25,80	38,33	402,00	67,53	0,00	0,00	698,49	0,00	0,00	402,00
Февраль / February	153,89	419,78	11680	82,99	656,7	135,9	0,00		29,00	25,80	38,33	363,00	64,71	0,00	0,00	656,67	0,00	0,00	363,00
ГОД / YEAR	14860	2935	11680	1040	18835	1630	440,0	70,00	348,0	309,6	460,0	11692	1660	50,88	1615	18835	0,00	0,00	11692

Таблица 3

Table 3

Водохозяйственный баланс реки Маныч в створе объединенного гидроузла

Water management balance of the Manych river in the site of the combined hydraulic unit

Месaны Months	ПРИХОДНАЯ ЧАСТЬ ВХБ INCOMING PART OF WMB								РАСХОДНАЯ ЧАСТЬ ВХБ OUTCOMING PART OF WMB							РЕЗУЛЬТА- ТЫ ВХБ RESULTS OF WMB		
	Естественный приток к створу Natural inflow	Регулирование стока Flow regulation	Наполнение на конец интервала Filling at the end of the interval	Водоподача из ДМК Water supply from DMC	Поступление по Кубанскому тракту Inflow on the Kuban tract	Возвратные воды Садковской ОС Return water of the Sadkovskoy IS	Возврат с Пролетарской ОС Return from the Proletarskoy IS	Располагаемые водные ресурсы ЦВ Available water resource of TsR	Водопотребление Азовской и Веселовской ОС Water consumption of the Azovskoy and Veselovskoy IS	Потери из Пролетарского в-ща Losses from the Proletarskogo WR	Потери из Веселовского в-ща Losses from the Veselovskogo WR	Энергетические попуски Power releases	Попуски на шлюзование и фильтрацию Releases on locking and filtration	Комп-Санитарно-экологический Comp-sanitary-ecological	Суммар-ные требоваия к водным ресурсам Total requirements to water resources	Дефицит / Deficit	Резерв / Reserve	Транзит в нижний бьеф Transit downstream
Ноябрь / November	1,71	-74,42	1326,9	30,81	53,87	0,00	0,49	12,47	0,00	0,75	-3,60	10,26	4,56	0,50	12,47	0,00	0,00	15,32
Декабрь / December	1,17	-79,83	1406,8	21,39	60,30	0,00	0,51	3,54	0,00	-3,10	-3,97	10,26	0,00	0,34	3,54	0,00	0,00	10,60
Январь / January	0,82	0,00	1406,8	0,00	60,30	0,00	0,21	61,33	0,00	1,54	-3,43	10,26	0,00	0,24	8,61	0,00	52,72	63,22
Февраль / February	3,87	0,00	1406,8	0,00	52,03	0,00	0,17	56,07	0,00	0,00	-3,17	10,26	0,00	1,13	8,22	0,00	47,85	59,24
Март / March	73,90	0,00	1406,8	0,00	60,57	0,00	0,21	134,68	0,00	17,02	13,99	10,26	59,84	21,64	122,8	0,00	11,94	103,68
Апрель / April	10,38	0,00	1406,8	0,00	51,80	1,06	0,10	63,34	5,97	21,11	18,21	10,26	4,56	3,04	63,14	0,00	0,19	18,05
Май / May	4,76	0,00	1406,8	44,39	61,64	5,41	9,49	125,70	25,89	39,66	36,93	10,26	6,70	1,39	120,8	0,00	4,86	23,21
Июнь / June	1,29	34,15	1372,6	38,35	59,57	8,60	10,31	152,26	39,22	51,54	44,39	10,26	6,48	0,38	152,3	0,00	0,00	17,11
Июль / July	0,41	52,65	1320	31,88	61,64	8,36	13,40	168,34	30,18	63,52	57,57	10,26	6,70	0,12	168,3	0,00	0,00	17,08
Август / August	0,30	40,86	1279,1	31,88	61,64	6,22	8,60	149,50	17,62	59,50	55,34	10,26	6,70	0,09	149,5	0,00	0,00	17,04
Сентябрь / September	0,17	19,10	1260,0	30,81	59,57	2,41	0,70	112,76	11,83	44,94	39,21	10,26	6,48	0,05	112,8	0,00	0,00	16,78
Октябрь / October	0,40	7,50	1252,5	31,88	64,32	0,28	0,59	104,97	4,29	17,42	3,99	10,26	6,70	0,12	42,78	0,00	62,19	79,27
ГОД / YEAR	99,18	0,00	1252,5	261,40	707,25	32,34	44,79	1145,0	135,00	313,90	255,47	123,08	108,71	29,04	965,2	0,00	179,75	440,6

Таблица 4

Водно-энергетическая оценка мощности и выработки гидроэлектростанции

Table 4

Water and energy assessment of hydroelectric power plant capacity and generation

ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ / WATER-ENERGY CALCULATIONS								
$Q_{гэс}, \text{ м}^3/\text{с}$ $Q_{GES}, \text{ m}^3/\text{s}$	Отметка в НБ, м Mark in NB, m	ВБ, м начало интервала WB, m Start of interval	ВБ, м конец интервала WB, m end of interval	Среднее наполнение, м Average filling, m	Отметка ВБ, м Elevation WB, m	Напор, м Head, m	Среднемесячная мощность, кВт Average monthly power, kW	Выработка электроэнергии, МВт*час Power generation, MWT*h
5,91	1,35	1252,50	1326,92	1289,71	9,03	7,68	410,09	295,26
3,96	1,14	1326,92	1406,75	1366,84	9,30	8,17	291,50	209,88
23,59	2,42	1406,75	1406,75	1406,75	9,44	7,02	1495,27	1076,60
24,48	2,45	1406,75	1406,75	1406,75	9,44	6,99	1543,23	1111,12
38,69	2,98	1406,75	1406,75	1406,75	9,44	6,46	2256,11	1624,40
6,97	1,44	1406,75	1406,75	1406,75	9,44	8,00	502,80	362,02
8,66	1,58	1406,75	1406,75	1406,75	9,44	7,86	614,12	442,17
6,61	1,41	1406,75	1372,61	1389,68	9,38	7,97	475,11	342,08
6,37	1,39	1372,61	1319,96	1346,28	9,23	7,84	450,85	324,61
6,36	1,39	1319,96	1279,10	1299,53	9,07	7,68	440,60	317,23
6,48	1,40	1279,10	1260,00	1269,55	8,96	7,56	442,01	318,25
29,58	2,66	1260,00	1252,50	1256,25	8,91	6,25	1668,83	1201,56
13,97	1,80	1354,30	1354,30	1354,30	9,26	7,46	882,54	7625,17

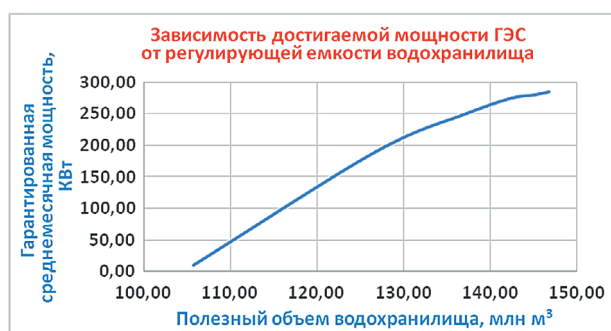


Рис. 4. Водохозяйственный баланс реки Маныч в створе объединенного гидроузла в сочетании с водно-энергетической оценкой мощности и выработки потенциальной гидроэлектростанции

Fig. 4. Water management balance of the Mаныч River in the site of the combined hydroelectric complex in combination with water and energy assessment of the capacity and generation of a potential hydroelectric power plant

Выводы

Выполненные разработки ВКР показали, что максимальный водозабор из Цимлянского водохранилища на реке Дон для обводнения малых рек и развития орошения в бассейне Западного Маныча составляет 1615 млн м³, что

соответствует правилам управления водными ресурсами реки Дон.

Водоподача в бассейн Маныча 254 млн м³ в год включает в себя 134 млн м³ для орошения 36,7 тыс. га и опреснительный транзит 127 млн м³, нуждаясь в дальнейшем обосновании. Водно-энергетический потенциал объединенных водохранилищ оценивается в 440 кВт и 7,78 ГВт/ч ежегодной выработки. При точном регулировании гарантированная мощность достигает 3-5 МВт, что соответствует уровню малых ГЭС.

Водохозяйственная система является перспективной для многих направлений исследований. Действующая система переброски стока функционирует в течение продолжительного времени. Немалый опыт эксплуатации водохозяйственной системы Маныча дает необходимую информацию для эффективного прогнозирования и оценки потенциала данного объекта при условии научной поддержки проблемы.

Детальное обоснование режима и параметров ВХС Западного Маныча требует большого цикла научных исследований включая лимиты водозабора из Цимлянского водохранилища, динамику солености озера Маныч-Гудило и др.

Библиографический список

1. Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological

References

1. Kalnay E., et al. (1996) The NCEP/NCAR40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological

Society. – 1996. – Т. 77. № 3. – Рр. 437-471. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437)

2. Раткович Л.Д. Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты / В.Н. Маркин, И.В. Глазунова, С.А. Соколова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 3. – С. 64.

3. Бубер А.Л., Раткович Л.Д., Рябинов А.И. Имитационное моделирование водохозяйственных систем в режиме оптимизации диспетчерских правил управления на примере уникального природно-технического комплекса «Озеро Байкал – Иркутское водохранилище» // Природообустройство. – 2018. – № 3. – С. 31-39.

4. Раткович Л.Д. Зависимость комплексной гарантированной водоотдачи от регулирующего объема водохранилища / А.А. Иванов, И.Г. Исмайлова, Е.Л. Раткович // Природообустройство. – 2022. – № 1. – С. 54-62.

5. Ratkovich L.D., Bakshtanin A.M., Glazunova I.V., Plokhikh N.E. Aspectsof Multi-Year Flow Control In Relation To Transboundary Rivers // International Journal of Advanced Science and Technology. – Australia, 2020. – Рр. 2418-2439. – URL: <http://serc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/20761>.

6. Алексеев Г.А. Перспективы и резервы усовершенствования гидрологических расчетов и прогнозов для водохозяйственного проектирования // Тр. V ВГС. Т. 6. Теория и методы гидрологических расчетов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – С. 15-21.

7. Ван Бик И., Лаукс П. Планирование и управление водохозяйственными системами. Введение в методы, модели и приложения: Монография / И. Ван Бик П. Лаукс / Под ред. М.В. Селиверстовой; Пер. с англ. А.В. Степанова и др. – М.: Юстицинформ, 2009. – 660 с.

8. Раткович Л.Д. Аспекты управления водными ресурсами в условиях комплексного водопользования // Евразийский союз ученых. – 2016. – № 3(24). – С. 52-56.

9. Угроватова Е.Г. Обоснование комбинированных типов переброски стока на примере реки западный Маныч // Природообустройство. – 2013. – № 4. – С. 70-75.

10. Штанько А.С., Аюбян А.С., Сафарова Н.И. Обобщение и анализ нормативных документов, определяющих режим использования водных ресурсов Пролетарского, Веселовского и Усть-Маньчского водохранилищ // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2012. – № 1 (05). – С. 180-189.

11. Сазонов А.Д., Решетников О.С., Закруткин В.Е. Изменчивость гидрохимических характеристик рек Сали, Западный Маныч в условиях современного антропогенного воздействия и климатических изменений (в пределах Ростовской области) // Наука Юга России. – 2021. – № 1. – С. 24-25.

Критерии авторства

Раткович Л.Д., Исмайлова И.Г., Бовина Ю.А., Щёголева С.Н., Манхаль М. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.10.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

Society, 77, 437-471. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437)

2. Ratkovich L.D., Markin V.N., Glazunova I.V., Sokolova S.A. Faktory vliyaniya diffuznogo zagryazneniya navodnye objekty / Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitelstvo. – 2016. – № 3. – С. 64.

3. Buber A.L., Ratkovich L.D., Ryabikov A.I. Imitacionnoe modelirovanie vodohozyajstvennyh sistem v rezhime optimizatsii dispetcherskih pravil upravleniya na primere unikalnogo prirodno-tekhnicheskogo kompleksa «Ozero Bajkal – Irkutskoe vodohranilishche» // Prirodoobustrojstvo. – 2018. – № 3. – С. 31-39.

4. Ratkovich L.D. Zavisimost kompleksnoj garantirovannoj vodootdachi ot reguliruyushchego objema vodohranilishcha. / Ivanov A.A., Ismajylova I.G., Ratkovich E.L. // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 1. – С. 54-62.

5. Lev D. Ratkovich, Alexander M. Bakshtanin, Irina V. Glazunova, Natalya E. Plokhikh. Aspects of Multi-Year Flow Control In Relation To Transboundary Rivers 2418-2439 2020-06-05. International Journal of Advanced Science and Technology. Australia. <http://serc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/20761>

6. Alekseev G.A. Perspektivy i rezervy usovershenstvovaniya gidrologicheskikh raschetov i prognozov dlya vodohozyajstvennogo proektirovaniya. Tr. V VGS, t. 6, teoriya i metody gidrologicheskikh raschetov. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – С. 15-21.

7., I. Van Bik P. Lauks. Planirovanie i upravlenie vodohozyajstvennymi sistemami. Vvedenie v metody, modeli i prilozheniya: monografiya / I. Van Bik P. Lauks; pod red. M.V. Seliverstovoj; Federalnoe agentstvo vodnyh resursov; per. s angl. A.V. Stepanova [i dr.]. – М.: Yustitsinform, 2009. – 660 s.

8. Ratkovich L.D. Aspekty upravleniya vodnymi resursami v usloviyah kompleksnogo vodopolzovaniya // Evrazijskij soyuz uchenyh. – 2016. – № 3 (24). – С. 52-56.

9. Ugrovatova E.G. Obosnovanie kombinirovannyh tipov perebroski stoka na primere reki zapadnyj Manych // Prirodoobustrojstvo. – 2013. – № 4. – С. 70-75.

10. Shtanko A.S., Akopyan A.S., Safarova N.I. Obobshchenie i analiz normativnyh dokumentov, opredelyavshih rezhim ispolzovaniya vodnyh resursov Proletarskogo, Veselovskogo i Ust-Manychskogo vodohranilishch. Generalization and analysis of regulatory documents for usage mode of water resources of Proletarskoye, Veselovskoye and Ust-Manychskoye reservoirs // Nauchny zhurnal Rossijskogo NII problem melioratsii. – 2012. – № 1(05). – С. 180-189.

11. Sazonov A.D., Reshetin O.S., Zakrutkin V.E. Izmenchivost gidrohimicheskikh harakteristik rek Sal i Zapadnyj Manych v usloviyah sovremennogo antropogennogo vozdeystviya i klimaticheskikh izmenenij (v predelakh Rostovskoj oblasti) // Nauka Yuga Rossii. – 2021. – № 1. – С. 24-25

Criteria of authorship

Ratkovich L.D., Ismajylova I.G., Bovina Yu.A., Shchegoleva S.N., Mankhal M. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Ratkovich L.D., Ismajylova I.G., Bovina Yu.A., Shchegoleva S.N., Mankhal M. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 03.10.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:627.5:504.3.054

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-93-99

РАЗРАБОТКА РЕГИОНАЛЬНЫХ ПДК ДЛЯ ВОДОТОКОВ: ЕРИК БЕШЕННЫЙ, РЕКА СОЛЁНАЯ БАСЕЙНА НИЖНЕГО ДОНА

ДРОВОВОЗОВА ТАТЬЯНА ИЛЬИНИЧНА [✉], д-р техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой экологических технологий природопользования
tid70.drovovozova@yandex.ru

МАРЫГИН ВАДИМ ОЛЕГОВИЧ, аспирант
ecotechngma@mail.ru

Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, 111, Россия

Цель исследований – статистический анализ многолетних гидрохимических данных качества воды в малой реке Солёная, ее притоке ерик Бешенный бассейна Нижнего Дона и разработка региональных предельно допустимых концентраций (ПДК_{рег}) солеобразующих ионов. Актуальность исследований обусловлена противоречиями в действующем экологическом законодательстве. Объектом исследований стали малые реки – приемники дренажно-сбросных вод (ДСВ) с мелиорируемых земель Центрального орошаемого района Ростовской области: река Солёная и ее приток ерик Бешенный. Для расчета регионального ПДК использовали методику на основе оценок непараметрических статистических показателей, которая позволяет эффективно учитывать объем рассматриваемых статистических выборок и их изменчивость. Проведен статистический анализ гидрохимических данных в фоновых створах за 2008-2020 гг. Установлено, что основной проблемой природного качества воды в рассматриваемых водных объектах являются высокое содержание солеобразующих ионов и показатель минерализации. Выявлено, что статистическое распределение рассматриваемых солеобразующих ионов и показателя минерализации существенно отличается от нормального. Показатель БПК_{полн} находится в пределах федерального норматива для водных объектов рыбохозяйственного назначения I категории. Рассчитаны региональные ПДК: для сульфатов – 552 и 647 мг/л, натрия – 309 и 210 мг/л для ер. Бешенный и р. Солёная соответственно. Остальные солеобразующие ионы имеют концентрации ниже допустимых федеральных ПДК. С целью минимизации нарушений водного законодательства управлению «Ростовмелиоводхоз», несмотря на отнесение его к объектам III категории, рекомендуется рассчитывать нормативы допустимого сброса (НДС) для солеобразующих ионов с учетом фоновых концентраций, в том числе для двух вышеуказанных показателей в рассматриваемых водных объектах – с учетом разработанных ПДК_{рег}.

Ключевые слова: региональные предельно допустимые концентрации, статистический анализ, гидрохимические показатели, солеобразующие ионы, дренажно-сбросные воды

Формат цитирования: Дрововозова Т.И., Марыгин В.О. Разработка региональных ПДК для водотоков: ерик Бешенный, река Солёная бассейна Нижнего Дона // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 93-99. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-93-99.

© Дрововозова Т.И., Марыгин В.О., 2022

Original article

DEVELOPMENT OF REGIONAL MPC FOR WATERCOURSES: ERIK BESHENNY, THE SOLENAYA RIVER OF THE LOWER DON BASIN

DROVOVOZOVA TATJANA ILJINICHNA [✉], doctor of technical sciences, associate professor,
head of the department of ecological technologies of environment management
tid70.drovovozova@yandex.ru

MARYGIN VADIM OLEGOVICH, post graduate student
ecotechngma@mail.ru

Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – a branch of the Don State Agrarian University; 346428, Rostov region, Novocherkassk, Pushkinskaya St., 111, Russia

The purpose of the work is to conduct a statistical analysis of long-term hydrochemical data on water quality in the small Solenaya River and its tributary Erik Beshenny of the Lower Don basin,

to develop regional maximum permissible concentrations (MPC_{reg}) of salt-forming ions. The relevance of the study is due to contradictions in the current environmental legislation. The objects of the study were small rivers – receivers of drainage and waste water (DWW) from reclaimed lands of the Central irrigated district of the Rostov region – the Solenaya River and its tributary Erik Beshenny. To calculate the regional MPC, we used a methodology based on estimates of nonparametric statistical indicators, which allows us to effectively take into account the volume of statistical samples under consideration and their variability. The paper presents a statistical analysis of hydro chemical data in the background for the period 2008-2020 years. It is established that the main problem of the natural water quality in the water bodies under consideration is the high content of salt-forming ions and the mineralization index. It is shown that the statistical distribution of the salt-forming ions under consideration and the mineralization index significantly differs from the normal one. The biological oxygen consumption (BOC_{total}) indicator is within the limits of the federal standard for fishery water bodies of category I. Regional MPCs were calculated for sulfates 552 and 647 mg/l and sodium – 309 and 210 mg/l for Er. Beshenny and R. Solenaya, respectively. The remaining salt-forming ions have concentrations below the permissible federal MPC. In order to minimize violations of the water legislation, the Management «Rostovmeliovodhoz» (land reclamation and agricultural water supply in the Rostov region), despite being classified as objects of Category III, is recommended to calculate the normatively permissible discharge (NPD) for salt-forming ions, taking into account background concentrations, including for the two above-mentioned indicators in the water bodies under consideration – taking into account the developed MPC_{regs} .

Keywords: regional maximum permissible concentrations, statistical analysis, hydrochemical indicators, salt-forming ions, drainage and waste water

Format of citation: Drovovozova T.I., Marygin V.O. Development of regional MPCs for watercourses: Erik Beshenny, Solenaya river of the lower Don basin // Prirodoobustroystvo. – 2022. – № 5. – P. 93-99. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-93-99.

Введение. Малые реки бассейновой гео-системы Нижнего Дона существенно отличаются по гидрохимическому режиму от реки Дон. По данным Ежегодного экологического вестника, в реке Дон отмечается регулярное превышение фактических концентраций сульфатов над предельно допустимой для водных объектов рыбохозяйственного назначения ($ПДК_{px}$) [1]. Малые водные объекты бассейна Нижнего Дона характеризуются высокими значениями минерализации, и соответственно – концентраций солеобразующих ионов, особенно в Центральном орошаемом районе.

Источники поступления солеобразующих ионов имеют как природный, так и антропогенный характер [2-4]. Они поступают, с одной стороны, за счет процессов вымывания легкорастворимых солей из почв на водосборной территории под воздействием различных факторов, с минерализованным подземным стоком, при разложении веществ растительного и животного происхождения, а с другой стороны – со сточными водами от точечных и диффузных источников загрязнения [2-7]. Содержание ионов в воде регламентируется нормативами ПДК без учета региональных почвенно-геохимических особенностей, естественных природных особенностей грунтовых вод. Особенно много вопросов вызывает жесткий норматив $ПДК_{px}$ сульфатов, равный

100 мг/л, что недостижимо для многих водных объектов [8].

Актуальность исследований обусловлена тем, что управления мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения, деятельность которых связана с отведением дренажно-сбросных вод (ДСВ) с орошаемых земель, постановлением Правительства РФ № 2398 от 31 декабря 2020 г. отнесены к объектам III категории, и в соответствии с этим документом для них отменены требования установления нормативов допустимого сброса (НДС) [9-10]. Плата за негативное воздействие на окружающую среду осуществляется за фактический сброс, но качество отводимых ДСВ оценивается федеральными нормативами ПДК [11, 12]. Природные фоновые концентрации некоторых солеобразующих ионов в водных объектах в течение многих лет превышают ПДК. Вследствие этого в процессе разбавления в контрольном створе ПДК также не достигается, и тогда управлениям вменяется нарушение водного законодательства.

С одной стороны, в п. 15 постановления Правительства РФ от 13 февраля 2019 г. № 149 установлено, что «В случаях, если природные фоновые концентрации химических веществ в водах поверхностных водных объектов, сформировавшиеся под влиянием природных факторов и характерные для конкретного речного

бассейна или его части, водного объекта или его части, превышают значения гигиенических или рыбохозяйственных нормативов, нормативы качества разрабатываются и устанавливаются на уровне значений (в интервале допустимого отклонения от значений) показателей природных фоновых концентраций химических веществ в этом речном бассейне или его части, водном объекте или его части» [13]. С другой стороны, в п. 8 приказа МПРиЭ РФ от 29 декабря 2020 г. № 1118 по-прежнему указывается, что если фоновая концентрация химического вещества в воде водного объекта не позволяет обеспечить норматив качества воды в контрольном створе, то НДС по этим показателям разрабатываются исходя из соблюдения в сточных водах нормативов качества воды водного объекта, то есть ПДК_{рх}. Следовательно, назрела необходимость разработки региональных ПДК для отдельных водных объектов.

В связи с вышеизложенным, целью исследований явились статистический анализ многолетних гидрохимических данных качества воды фоновых створов в малой реке Солёная, ее притоке ерике Бешеный бассейна Нижнего Дона и разработка региональных ПДК солеобразующих ионов.

Материалы и методы исследований. Объектом исследования стали малые реки – приемники дренажно-сбросных вод (ДСВ) с мелиорируемых земель Центрального орошаемого района: река Солёная и ее приток ерик Бешеный. В качестве исследуемых приняты фоновые створы выше выпуска ДСВ из коллекторов Нижне-Донской оросительной системы: створ 502 6-1500 м выше впадения канала К-3 (1,8 км от устья притока ер. Бешеный); створ 512 с-1500 выше впадения канала ЛС-2 (4,1 км от устья р. Солёная) (рис.).



Рис. Карта водных объектов:

1 – река Солёная; 2 – ерик Бешеный

Fig. Map of water objects:

1 – The Solonaya River, 2 – erik Beshennyi

Данные измерений гидрохимических показателей в указанных водных объектах предоставлены испытательной лабораторией Ростовской гидрогеолого-мелиоративной партией: филиал ФГБУ, Управление «Ростовмелиоводхоз», – за период 2008-2020 гг.

В исследуемых створах за рассматриваемый период значения концентраций биогенных элементов, пестицидов, тяжелых металлов, нефтепродуктов не превышали ПДК_{рх} [14]. Следовательно, в рассматриваемых фоновых створах гидрохимический режим определяется преимущественно природными факторами.

На основании обработки выборочной совокупности данных гидрохимических показателей в фоновых створах водотоков притока ер. Бешеный и р. Солёная в программе MathCAD рассчитаны основные статистические показатели, результаты которых представлены в таблице 1. Достоверность статистических показателей оценивали на уровне значимости α , равном 0,05. Число степеней свободы k определили по приближенной формуле Стерджесса при объеме выборки $n = 50$, которое составило 7. Критический уровень согласия $\chi^2_{кр}$ при заданных α и k составил 9,5 [15-16].

Проверка гипотезы о нормальном распределении генеральной совокупности гидрохимических показателей по критерию Пирсона показала, что $\chi^2_{факт} \gg \chi^2_{кр}$, то есть совокупность гидрохимических показателей качества воды в фоновом створе нормальному распределению не подчиняется. Следовательно, для их обработки использование параметрических методов является некорректным.

Для расчета регионального ПДК (ПДК_{рег}) использовали методику [17, 18] на основе оценок непараметрических статистических показателей, которая в отличие от других методических подходов позволяет эффективно учитывать объем рассматриваемых статистических выборок и их изменчивость. Методика [19] в качестве нормативной оценки предлагает верхний доверительный интервал среднего значения. В этом случае чем меньше объем выборки, тем более завышенными получаются значения ПДК_{рег}. Рекомендуется [17] использовать средневыборочную концентрацию квантиля порядка 0,75, при которой значения ПДК_{рег} снижаются и представляются методически более обоснованными. Расчет ПДК_{рег} производили по формуле:

$$\text{ПДК}_{\text{рег}} = C_{0,75} - \frac{2,15 \cdot \sigma}{\sqrt{n}},$$

где $C_{0,75}$ – средневывборочная концентрация квантиля порядка 0,75, мг/л; ПДК_{рег} – региональное ПДК, мг/л; σ – среднеквадратичное отклонение; n – объем выборки.

Таблица 1

Основные статистические показатели гидрохимических данных за период 2008-2020 гг.

Table 1

The main statistical indicators of hydro chemical data for the period 2008-2020

Гидрохимический показатель <i>Hydro chemical indicator</i>	Статистические показатели / <i>Statistical indicators</i>						
	Cmin мг/л mg/l	Cmax мг/л mg/l	Среднее выборочное, мг/л <i>Sam- pleaver- age, mg / l</i>	Среднеквад- ратичное — отклонение σ <i>Root mean square devia- tion σ</i>	Коэффици- ент вариации, V, % <i>Coefficient of varia- tion, V, %</i>	Критерий Пирсона $\chi^2_{\text{факт}}$ <i>Pearson's crite- rion $\chi^2_{\text{факт}}$</i>	Доверительный ин- тервал среднеквад- ратичной совокупности <i>Confidence interval of the root mean square totality</i>
ерик Бешенный <i>erik Beshenny</i>							
БПК полн, мгО/л <i>BOCfull mgO / l</i>	1,2	6,34	2,9	1,14	39,45	33,28	2,58< $\bar{C}$ <3,23
Минерализация <i>Mineralization</i>	540	3982	1513,6	1009,4	66,69	63,3	1226,8< $\bar{C}$ <1800,4
Сульфаты / <i>Sulfates</i>	144	1929,6	567	419,8	73,98	60,3	448,2< $\bar{C}$ <686,7
Хлориды / <i>Chlorides</i>	85,1	928,8	239,4	156,5	63,4	239,6	194,9< $\bar{C}$ <283,8
Кальций / <i>Calcium</i>	56,1	308,6	141,95	68,99	48,61	37,8	122,3< $\bar{C}$ <161,5
Магний / <i>Magnesium</i>	21,9	166,2	53,15	26,9	50,6	31,7	45,5< $\bar{C}$ <60,8
Натрий / <i>Sodium</i>	92	966	349,2	247,4	70,8	48,9	278,93< $\bar{C}$ <419,5
река Солёная / <i>river Solenaya</i>							
БПКполн, мгО/л <i>BOCfull mgO / l</i>	1,64	6,56	2,82	1,03	36,5	78,8	2,53< $\bar{C}$ <3,11
Минерализация <i>Mineralization</i>	554	3128	1164,4	605,2	51,9	56,1	992,5< $\bar{C}$ <1336,3
Сульфаты / <i>Sulfates</i>	134	2332,8	724,5	478,6	66,1	70,7	558,5< $\bar{C}$ <860,5
Хлориды / <i>Chlorides</i>	75,1	411,2	175,9	82,9	47,1	29,4	152,4< $\bar{C}$ <199,5
Кальций / <i>Calcium</i>	52,1	312,6	107,9	55,7	51,7	101,5	92,1< $\bar{C}$ <123,7
Магний / <i>Magnesium</i>	21,9	158	48,4	26,1	53,9	436,4	40,9< $\bar{C}$ <55,8
Натрий / <i>Sodium</i>	92	621	229,5	120,6	52,6	66,9	195,3< $\bar{C}$ <263,8

Результаты и их обсуждение. В результате многолетних наблюдений установлено, что основной проблемой качества воды является превышение фактических концентраций солеобразующих ионов над их ПДК_{рх}. Может быть несколько причин такого явления, а именно: химический состав почв на площади водосбора; гидрохимический состав грунтовых вод, подпитывающих малые водотоки; антропогенная деятельность, связанная с эксплуатацией гидромелиоративных систем.

Исследование гидрохимических показателей в дренажно-сбросных водах, отводимых в данные водотоки, в динамике показало, что применение пресной донской оросительной воды, наоборот, способствует процессам рассоления почв. Кроме того, ДСВ содержат сбросные оросительные воды, что также способствует разбавлению дренажных вод, отводимых с мелиорируемых земель [14]. Грунтовые воды территории бассейнов данных малых водотоков

характеризуются как сульфатные в анионной части и как кальциево-натриевые в катионной части [20, 21]. Следовательно, на гидрохимический режим рассматриваемых водных объектов в большей степени влияют природные факторы.

Выборочная средняя БПК_{полн} в ерике Бешенный составляет 2,9 мгО/л, в реке Солёная – 2,82 мгО/л, а генеральная средняя БПК_{полн} лежит в интервале: для ерика Бешенный – от 2,58 до 3,23; для реки Солёная – от 2,53 до 3,11. Это находится в пределах норматива для водных объектов рыбохозяйственного назначения 1 и 2 категорий, то есть разработка регионального норматива не требуется.

Коэффициент вариации V выборочной совокупности во всех случаях больше 30%, что свидетельствует о значительной изменчивости значений гидрохимических показателей в фоновом створе за 12-летний период.

Значительная изменчивость гидрохимических показателей вызывает необходимость

расчета региональных ПДК. На основе методики [17] рассчитаны ПДК_{рег} для основных

солеобразующих ионов малых водотоков ер. Бешеный и р. Солёная бассейна Нижнего Дона (табл. 2).

Таблица 2

**Расчетные значения региональных ПДК солеобразующих ионов
в ерике Бешеный и реке Солёная бассейна Нижнего Дона**

Table 2

**Calculated values of regional MPC of salt-forming ions in the erik Beshenny
and the Solenaya River of the Lower Don basin**

Гидрохимический показатель <i>Hydro chemical indicator</i>	Ерик Бешенный / <i>Erik Beshenny</i>		Река Солёная / <i>The Solenaya River</i>		ПДК _{рх} мг/л <i>MPC_{rh} Mg / l</i>	ПДК _{хп} мг/л <i>MPC_{hp}</i>
	C _{0,75}	ПДК _{рег} / <i>MPC_{reg}</i>	C _{0,75}	ПДК _{рег} / <i>MPC_{reg}</i>		
Сульфаты / <i>Sulfates</i>	627	552	792,5	647	100	500
Хлориды / <i>Chlorides</i>	262	214	188	162,5	300	350
Кальций / <i>Calcium</i>	151,7	131	116	99	180	-
Магний / <i>Magnesium</i>	57	49	52	44	40	50
Натрий / <i>Sodium</i>	384	309	247	210	120	200
Минерализация <i>Mineralization</i>	1657	1350	1220	1036	-	1000

Расчеты региональных ПДК показали, что для трех показателей: сульфаты, магний и натрия (суммарно) – в фоновых створах наблюдалось естественное превышение над нормативами для водных объектов рыбохозяйственного назначения [8], причем рассчитанные концентрации сульфатов и натрия превышают и гигиенические нормативы [22]. Остальные солеобразующие ионы имеют концентрации ниже допустимых федеральных ПДК. Следовательно, для ерика Бешеный и реки Солёная требуется введение региональных ПДК по двум показателям: для сульфатов – 552 и 647 мг/л, для натрия – 309 и 210 мг/л соответственно.

Для показателей, которые не являются природными загрязнителями (биогенные элементы, пестициды, тяжелые металлы), региональные ПДК не вводятся. Их содержание регламентируется федеральными ПДК.

Выводы

Установлено, что основной проблемой природного качества воды в ерике Бешеный и реке Солёная является высокое содержание солеобразующих ионов и показателя минерализации. В результате статистического анализа

данных гидрохимических показателей в фоновых створах за период 2008-2020 гг. выявлено, что статистическое распределение солеобразующих ионов и показателя минерализации существенно отличается от нормального.

Показатель БПК_{полн} находится в пределах федерального норматива для водных объектов рыбохозяйственного назначения I категории.

Результаты расчетов убедительно доказывают необходимость утверждения региональных нормативов качества воды (ПДК_{рег}) для сульфатов и натрия в ер. Бешеный и р. Солёная.

Несмотря на то, что управлениям мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения не требуется разработка НДС, причем критерием качества отводимых дренажно-сбросных вод по-прежнему остаются нормативы ПДК, для объективной оценки качества ДСВ рекомендуется рассчитывать НДС с учетом природных фоновых концентраций. Управлению «Ростовмелиоводхоз» относительно реки Солёная и ерика Бешеный для сульфатов и натрия рекомендуется рассчитывать НДС с учетом разработанных региональных ПДК. Такой подход позволит минимизировать нарушение водного законодательства.

Библиографический список

1. О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2012-2019 году: Экологический вестник Дона / Правительство Ростовской области, Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области. – Ростов-на-Дону, 2013-2020. – URL: <http://минприродыро.рф/state-of-the-environment/ekologicheskij-vestnik>.

2. Демин А.П., Зайцева А.В. Сточные воды и загрязнение водных объектов в бассейне реки Дон (1995-2018 гг.) // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VIII Всероссийской

References

1. Ekologicheskyy vestnik Dona «O sostoyanii okruzhayushchej sredy i prirodnih resursov Rostovskoy oblasti v 2012-2019 godu» [Elektronnyy resurs] / Pravitelstvo Rost. obl., Min-vo prirodnih resursov i ekologii Rost. obl. Rna/Donu, – 2013-2020. – URL: <http://minprirodyro.rf/state-of-the-environment/ekologicheskij-vestnik/>

2. Demin A.P., Zaitseva A.V. Stochnye vody i zagryazneniye vodnyh objektov v bassejne reki Don (1995-2018 gg.). // Sovremennyye problemy vodohranishch i ih vodosborov: tr. VIII Vseros. nauch.-prakt. konf.

научно-практической конференции с международным участием, г. Пермь, 27-30 мая 2021 г. – Пермь: ПГНИУ, 2021. – С. 74-270.

3. Домашенко Ю.Е., Васильев С.М. Моделирование и оценка поступления загрязняющих веществ в коллекторно-дренажный сток // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2016. – № 2(22). – С. 112-127.

4. Косолапов А.Е., Пурас А.Г. Водные ресурсы Нижнего Дона: состояние и проблемы использования // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Проблемы геологии, полезных ископаемых и рационального недропользования». – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. – С. 23-32.

5. Geochemical Specifics and Patterns of the Distribution of Heavy Metals in the Opuksky Sanctuary, Republic of Crimea / P. Zelenkovskiy et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 666(5). – 052019.

6. Insights into the use of phytoremediation processes for the removal of organic micropollutants from water and wastewater; a review / W. Polińska, U. Kotowska, D. Kiejza, J. Karpińska // Water (Switzerland). – 2021. – № 13(15). – 2065.

7. Mathematical model of the effective use of reclaimed lands in the South of Russia / A.K. Apazhev, Y.A. Shekikhachev, L.M. Hazhmetov, L.Z. Shekikhacheva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1889(3). – 032033.

8. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ от 13 декабря 2016 г. № 552, с изм. на 10 марта 2020 г. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_211155/.

9. Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий: постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 2398; в ред. постановления Правительства РФ от 7 октября 2021 г. № 1703. – URL: <https://www.zakonrf.info/postanovlenie-pravительство-rf-2398-31122020/>.

10. Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10 февраля 2001 г. № 7-ФЗ; принят ГД РФ 20 декабря 2001 г. – URL: <https://rulaws.ru/laws/Federalnyy-zakon-ot-10.01.2002-N-7-FZ/>.

11. Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду: постановление Правительства РФ от 3 марта 2017 г. № 255, с изм. на 17 августа 2020 г. – URL: <https://rulaws.ru/laws/Federalnyy-zakon-ot-10.01.2002-N-7-FZ/>.

12. Об утверждении Порядка представления декларации о плате за негативное воздействие на окружающую среду и ее формы: приказ Минприроды от 10 декабря 2020 г. № 1043. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373329/.

13. О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий: постановление Правительства РФ от 13 февраля 2019 г. № 149. – URL: <https://rulaws.ru/government/Postanovlenie-Pravitelstva-RF-ot-13.02.2019-N-149/>.

14. Разработка технологии и технических решений по очистке коллекторно-дренажного и поверхностного

s mezhdunar. uchastiem, Perm, 27-30 maya 2021 goda. – Perm: PGNIU, 2021. – S. 270-74.

3. Domashenko Yu.E., Vasiljev S.M. Modelirovanie i otsenka postupleniya zagryaznyayushchih veshchestv v kollektorno-drenazhny stok // Nauchny zhurnal Rossijskogo NII problem melioratsii. – 2016. – № 2(22). – S. 112-127.

4. Kosolapov A.E., Puras A.G. Vodnye resursy Nizhnego Dona: sostoyanie i problem ispolzovaniya // Sb. trudov mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Problemy geologii, poleznyh iskopaemyh i ratsionalno nedropolzovaniya». – Novocherkassk: YURGTU, 2004. – S. 23-32

5. Geochemical Specifics and Patterns of the Distribution of Heavy Metals in the Opuksky Sanctuary, Republic of Crimea / P. Zelenkovskiy [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 666(5). – 052019.

6. Insights into the use of phytoremediation processes for the removal of organic micropollutants from water and wastewater; a review / W. Polińska, U. Kotowska, D. Kiejza, J. Karpińska // Water (Switzerland). – 2021. – № 13(15). – 2065.

7. Mathematical model of the effective use of reclaimed lands in the South of Russia / A.K. Apazhev, Y.A. Shekikhachev, L.M. Hazhmetov, L.Z. Shekikhacheva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1889(3). – 032033.

8. Prikaz № 552 ot 13 dekabrya goda «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnyh objektov rybohozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predelno dopustimyh kontsentratsij vrednyh veshchestv v vodah vodnyh objektov rybohozyaystvennogo znacheniya» (s izm. na 10.03.2020). https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_211155/

9. Postanovlenie Pravitelstva RF № 2398 ot 31.12.2020 «Ob utverzhdenii kriteriev otneseniya objektov, okazyvayushchih negativnoe vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu, k objektam I, II, III i IV kategorij» (v red. Postanovleniya Pravitelstva RF ot 07.10.2021 № 1703) <https://www.zakonrf.info/postanovlenie-pravительство-rf-2398-31122020/>

10. Federalny zakon «Ob ohrane okruzhayushchej sredy» ot 10.02.2001 № 7-FZ: prinyat GD RF 20.12.2001 (poslednyaya redaktsiya). <https://rulaws.ru/laws/Federalnyy-zakon-ot-10.01.2002-N-7-FZ/>

11. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 03.03.2017 № 255 «Ob ischislenii i vzimanii platy za negativnoe vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu» (s izm. na 17.08.2020). <https://rulaws.ru/laws/Federalnyy-zakon-ot-10.01.2002-N-7-FZ/>

12. Prikaz Minprirody 10.12.2020 № 1043 «Ob utverzhdenii Poryadka predstavleniya deklaratsii o plate za negativnoe vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu i ee formy ». https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373329/

13. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 13.02.2019 № 149 «O razrabotke, ustanovlenii i peresmotre normativov kachestva okruzhayushchej sredy dlya himicheskikh i fizicheskikh pokazatelej sostoyaniya okruzhayushchej sredy, a takzhe ob utverzhdenii normativnyh dokumentov v oblasti ohrany okruzhayushchej sredy, ustanavlivayushchih tehnologicheskie pokazateli naluchshih dostupnyh tehnologij» <https://rulaws.ru/government/Postanovlenie-Pravitelstva-RF-ot-13.02.2019-N-149/>

14 Razrabotka tehnologij i tehnicheskikh reshenij po ochistke kollektorno-drenazhnogo i poverhnostnogo

стока с орошаемых площадей для обеспечения экологически безопасной эксплуатации мелиоративных систем: Отчет о НИР / Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова, ФГБОУ ВО Донской ГАУ; рук. Т.И. Дрововозова. – Новочеркасск, 2019. – 179 с.

15. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. – 7-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2001. – 479 с.

16. **Ивановский Р.** Компьютерные технологии в науке. Практика применения систем Mathcad Pro. – М.: Высшая школа, 2003.

17. **Возняк А.А., Лепихин А.П.** Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример // Географический вестник – Geographical bulletin. – 2018. – № 2(45). – С. 103-115. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-2-103-115.

18. **Лепихин А.П., Возняк А.А.** Статистические функции распределения гидрохимических показателей качества воды // Водное хозяйство России. – 2012. – № 4. – С. 21-32.

19. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты. – М., 2008.

20. **Никаноров А.М.** Масштабы подтопления, режим и качество грунтовых вод застроенных территорий юга Ростовской области / А.М. Никаноров, О.Б. Барцев, Д.Н. Гарькуша, Е.А. Зубков // Вестник Южного научного центра РАН. – 2015. – Т. 11, № 3. – С. 66-80.

21. **Зубков Е.А.** Грунтовые воды юга Ростовской области и их влияние на подтопление территорий населенных пунктов: Дис. ... канд. геогр. наук. – Ростов-на-Дону, 2017. – 185 с.

22. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий»: постановление главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 3. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400189764/>.

Критерии авторства

Дрововозова Т.И., Марыгин В.О. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

стока s oroshaemyh ploshchadej dlya obespecheniya ekologicheskoy bezopasnoj expluatatsii meliorativnyh system: otchet o NIR / Novocherk. inzh. – melior. in-t im. A.K. Kortunava FGBOU VO Donskoj GAU; ruk. T.I. Drovovozova. – Novocherkassk, 2019. – 179 s.

15. **Gmurman V.E.** Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika: ucheb. Posobie dlya vuzov. 7-e izd., ster. – M.: Vyssh. shk., 2001. – 479 s.

16. **Ivanovsky R.** Kompyuternye tehnologii v nauke. Praktika primeneniya sistem Mathcad Pro. – M.: Vyssh. shk. 2003.

17. **Voznyak A.A., Lepihin A.P.** Razrabotka regionalnyh PDK: neobhodimost, metodika, primer // Geografichesky vestnik = Geographical bulletin. – 2018. – № 2(45). – S. 103-115. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-2-103-115

18. **Lepihin A.P., Voznyak A.A.** Statisticheskie funktsii raspredeleniya gidrohimicheskikh pokazatelej kachestva vody // Vodnoe hozyajstvo Rossii. – 2012. – № 4. – S. 21-32.

19. Metodicheskie ukazaniya po razrabotke normativov dopustimogo vozdejstviya na vodnye objekty. – M., 2008.

20. **Nikanorov A.M.** Masshtabnye podgotovleniya, rezhim i kachestvo gruntovyh vod zastroennyh territorij yuga Rostovskoj oblasti / O.B. Bartsev, D.N. Garjkusha, E.A. Zubkov // Vestnik Yuzhngo nauchnogo tsentra RAN. – 2015. – T. 11, № 3. – S. 66-80.

21. **Zubkov E.A.** Gruntovye vody yuga Rostovskoj oblasti i ih vliyanie na podtoplenie territorij naselennyh punktov: Dis... kand. geogr. nauk. – Rostov-na-Donu, 2017. – 185 s.

22. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021 № 3 «Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 2.1.3684-21 «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k soderzhaniyu territorij gorodskih i selskih poselenij, k vodnym objektam, pitjevoj vode i pitjevomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozduhu, pochvam, zhilym pomescheniyam, expluatatsii proizvodstvennyh, obshchestvennyh pomeschenij, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatij». <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400189764/>

Criteria of authorship

Drovovozova T.I., Marygin V.O. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript.

Criteria of authorship

Drovovozova T.I., Marygin V.O. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 06.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:532.5:631.6

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-100-104

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ДИСКРЕТНЫМ ОТБОРОМ ЖИДКОСТИ

ЖУРАВЛЕВА ЛАРИСА АНАТОЛЬЕВНА^{1✉}, д-р техн. наук, доцент
dfz@yandex.ru

ПОПКОВ ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ², канд. экон. наук, проректор по внедрению
инновационных технологий
ipopkov@mail.ru

АЛДИАБ АНАС¹, аспирант
anasaldiab123@gmail.com

ХЕИРБЕИК БАССЕЛ¹, аспирант
bassel.bek@yandex.ru

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

² ООО Русхимбио; 121170, г. Москва, ул. Генерала Ермолова, 10/6, Россия

Цель работы – исследование характеристик потока в напорных трубопроводах оросительных систем с дискретным отбором жидкости. Проведенные исследования подтвердили некоторое увеличение напора вдоль перфорированного трубопровода при отборе жидкости, что объясняется переходом кинетической энергии в потенциальную. Теоретические исследования движения жидкости переменным по длине трубопровода расходом позволили получить зависимости, описывающие характеристики потока при наличии как равномерной, так и неравномерной установки водоотводов вдоль трубопровода и потерь напора с учетом параметра дискретности, учитывающего количество отводов на единицу длины, то есть частоты установки. Для уточнения коэффициента отсоединения потока проведены исследования, результаты которых показали независимость соотношения скоростей основного потока и скорости вытекания струи от диаметра отверстий отводов. Коэффициент отсоединения потока находится в границах значений от 0,66 до 0,87. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что параметр дискретности расхода уменьшается с увеличением количества водоотводов. Значение величины потерь напора при дискретном отборе было определено через величину потерь напора при равномерном отборе потока жидкости с учетом параметра дискретности. Полученные расчетные значения подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: транзитный и путевой расход, водоотвод, скорость, диаметр, давление

Формат цитирования: Журавлева Л.А., Попков И.А., Алдиаб Анас, Хеирбеик Бассел. Исследования характеристик потока в напорных трубопроводах оросительных систем с дискретным отбором жидкости // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 100-104. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-100-104.

© Журавлева Л.А., Попков И.А., Алдиаб Анас, Хеирбеик Бассел, 2022

Original article

STUDIES OF FLOW CHARACTERISTICS IN PRESSURE PIPELINES OF IRRIGATION SYSTEMS WITH DISCRETE FLUID SAMPLING

ZHURAVLEVA LARISA ANATOLJEVNA^{1✉}, doctor of technical sciences, associate professor
dfz@yandex.ru

POPKOV IGOR ANATOLJEVICH², candidate of economic sciences, Vice-rector for the introduction
of innovative Technologies
ipopkov@mail.ru

ALDIAB ANAS¹, post graduate student

anasaldiab123@gmail.com

HEIRBEIK BASSEEL¹, post graduate student

bassel.bek@yandex.ru

¹ Russian State Agrarian University – Moscow MAA named after C.A. Timiryazev, 127434, Moscow, Timiryazevskaya St., 49, Russia

² LLC Ruskhimbio; 121170, Moscow, General Yermolov str., 10/6, Russia

The purpose of the experiments is to study the characteristics of the flow in the pressure pipelines of irrigation systems with discrete liquid selection. The investigations have confirmed a slight increase in the head along the perforated pipeline during withdrawal of the fluid, which is explained by the transition of kinetic energy to potential energy. Theoretical studies of the fluid flow with a flow rate variable along the length of the pipeline made it possible to obtain dependences that describe the characteristics of the flow in the presence of both uniform and non-uniform installation of drains along the pipeline and pressure losses, taking into account the discreteness parameter, which takes into account the number of outlets per a unit of the length, i.e. frequency of setting. To clarify the coefficient of the flow disconnection, the studies were carried out, the results of which showed the independence of the ratio of the speeds of the main flow and the flow rate of the jet from the diameter of the outlet holes. The coefficient of disconnection of the flow is in the range of values from 0.66 to 0.87. The results of experimental studies allow us to conclude that the parameter of flow discreteness decreases with an increase in the number of drains. The value of the value of head losses in discrete withdrawal was determined by the value of head losses with uniform withdrawal of the fluid flow, taking into account the discreteness parameter. The obtained calculated values are well confirmed by the results of experimental studies.

Keywords: transit and travel flow, drainage, speed, diameter, pressure

Format of citation: Zhuravleva L.A., Popkov I.A., Aldiab Anas, Kheirbeik Bassel. Studies of flow characteristics in pressure pipelines of irrigation systems with discrete fluid sampling // Prirodobustroystvo. – 2022. – № 5. – P. 100-104. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-100-104.

Введение. Высокие технико-экономические показатели, уменьшение стоимости при сохранении эксплуатационных характеристик – это задачи, которые решаются при проектировании оросительных систем нового поколения. Совершенствование оросительных систем связано в первую очередь с оптимизацией параметров водопроводящих трубопроводов и режимов их работы. Правильно подобранные характеристики позволяют значительно уменьшить материалоемкость, стоимость, повысить КПД. Совершенствованию методов расчета оросительных систем и различного типа и назначения трубопроводов посвящены работы многих ученых исследователей [1-14]. При этом, несмотря на значительное конструктивное разнообразие используемых материалов, назначения, режимов работы, общим принципом с точки зрения гидравлики является непрерывная раздача расхода по длине трубопроводов.

Целью работы являются исследования характеристик потока в напорных трубопроводах оросительных систем с дискретным отбором жидкости.

Для достижения цели были поставлены задачи:

1. Проанализировать существующие исследования характеристик потока оросительных систем.

2. Провести теоретические исследования движения жидкости с переменным по длине трубопровода расходом при наличии как равномерной, так и неравномерной установки водоотводов.

3. Уточнить значения коэффициента отсоединения потока.

4. Экспериментально подтвердить теоретические исследования.

Материалы и методы исследований. И.М. Коновалов в своих исследованиях представил уравнение, учитывающее параметры движения потока жидкости с учетом коэффициентов присоединения и отсоединения масс [11]:

$$\frac{1}{g} \int \frac{(1-a_1)V}{\omega} dQ_1 - \frac{1}{g} \int \frac{(1-a_2)V}{\omega} dQ_2 + \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + z + h_f = c, \quad (1)$$

где a_1 и a_2 – соответственно коэффициенты присоединения и отсоединения массы жидкости; V_1 и V_2 – проекции скорости присоединения и отсоединения потоков жидкости на ось движения; Q_1 и Q_2 – расход присоединения и отсоединения соответственно, м³/с; V – средняя скорость, м/с; S – площадь живого сечения потока жидкости, м²; P – гидродинамическое давление потока, м; Z – удельная потенциальная энергия положения; Γ – удельный вес жидкости, Н/м³; h_f – потери на трение между рассматриваемыми сечениями; g – ускорение, м/с².

Коэффициент присоединения определяется как $a_1 = V_1/V$.

Коэффициент $a_2 = V_2/V$, причем $0 < a_2 < 1$ [12, 14].

Продифференцировав уравнение, после математического преобразования получили:

$$\frac{\alpha_0(1-\alpha_1)Q}{gs^2} \frac{dQ_1}{dx} - \frac{\alpha_0(1-\alpha_2)Q}{gs^2} \frac{dQ_2}{dx} + \frac{\alpha_0 Q}{gs} \frac{d}{dx} \left(\frac{Q}{s} \right) + \frac{d}{dx} \left(\frac{P}{\gamma} + z \right) + \frac{d}{dx} (h_f) = 0. \quad (2)$$

Коэффициент α_0 в практических расчетах не учитываем – он представляет собой отношение действительного количества движения массы воды к количеству по среднему значению скорости и практически равен единице.

Трубопровод постоянного диаметра с перфорацией – это и оросительные системы поверхностного полива, капельный полив и трубопровод широкозахватной дождевальная машины. Принцип расчета является неизменным.

При $s = \text{const}$:

$$\frac{\alpha_0(a_2-2)Q}{gs^2} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial H} \frac{dH}{dx} + \frac{\partial Q_2}{\partial s_0''} \frac{ds_0''}{dx} \right) + \frac{dH}{dx} - i + \frac{Q^2}{K^2} = 0, \quad (3)$$

где K – расходная характеристика, л/с.

Решив полученное уравнение относительно dH/dx

$$\frac{dH}{dx} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2} - \frac{\alpha_0(a_2-2)Q}{gs^2} \frac{ds_0''}{dx} \frac{\partial Q_2}{\partial s_0''}}{1 + \frac{\alpha_0(a_2-2)Q}{gs} \frac{\partial Q_2}{\partial H}}, \quad (4)$$

для последующего упрощения полученных выражений введем значение A :

$$A = \frac{\alpha_0(a_2-2)}{gs^2}. \quad (5)$$

Для равномерно расположенных вдоль водопроводящего трубопровода отводов, где $q_2 = \text{const}$, $s_0'' \neq \text{const}$, выражение будет иметь вид:

$$\frac{dH}{dx} = i - \frac{Q^2}{K^2} - A Q q. \quad (6)$$

Для неравномерно расположенных $q_2 \neq \text{const}$, $s_0'' \neq \text{const}$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2} - Q A \frac{ds_0''}{dx} \frac{\partial Q_2}{\partial s_0''}}{1 + Q A \frac{\partial Q_2}{\partial H}}. \quad (7)$$

Значения частных производных определяются из формулы истечения через отверстие:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial H} = \frac{\mu s_0'' \sqrt{2g}}{2\sqrt{H}}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент расхода.

Тогда выражение можно представить как

$$\frac{dH}{dx} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 + \frac{A Q \mu}{g \sqrt{2gH}} s_0''}. \quad (9)$$

Принципиальным условием для систем полива является получение одинаковых струй из всех отводов или капельниц, то есть обеспечение равномерности отбора расхода по длине трубопровода. Тогда для наклонного трубопровода и равномерного отсоединения расхода (при $i = \text{const}$) уравнение пьезометрической линии будет выглядеть как

$$\frac{P_x - P_1}{\gamma} = ix - \frac{\left(Q_0^2 - Q_0 qx + \frac{q^2 x^2}{3} \right) x}{K^2} - A \left(Q_0 qx - \frac{q^2 x^2}{2} \right), \quad (10)$$

где расход в начальном сечении $Q_0 = Q + qx = Q + Q_x$, в котором Q и Q_x – соответственно расход в произвольно выбранном сечении трубопровода и отсоединения по заданной длине x , м³/с; Q – удельный расход от соединения, м³/с.

После преобразований получим зависимость для определения пьезометрического напора в сечении x трубопровода:

$$H_p = H_1 + ix - \left(Q^2 + Q Q_x + \frac{Q_x^2}{3} \right) \frac{x}{K^2} - A \left(Q Q_x + \frac{Q_x^2}{2} \right), \quad (11)$$

где H_1 – пьезометрический напор в начале участка трубопровода.

Для конечного сечения участка трубопровода с отводами на всем его протяжении

$$x = \ell, \quad Q = Q_{\text{тр}} \quad \text{и} \quad Q_x = Q_n,$$

где $Q_{\text{тр}}$ и Q_n – соответственно транзитный и путевой расход, м³/с.

Уравнение примет вид:

$$H_p = H_1 + i\ell - \left(Q_{\text{тр}}^2 + Q_{\text{тр}} Q_n + \frac{Q_n^2}{3} \right) \frac{\ell}{K^2} - A \left(Q_{\text{тр}} Q_n + \frac{Q_n^2}{2} \right). \quad (12)$$

Можно заметить, что абсолютная величина восстановления пьезометрического напора жидкости определяется интенсивностью отсоединяемого расхода.

Увеличение напора вдоль перфорированного трубопровода при отборе жидкости подтверждается экспериментальными работами А.М. Курганова [10], Г.А. Петрова [12], А.А. Федорца [14] и др.

Физический смысл увеличения напора вдоль перфорированного трубопровода объясняется трансформацией кинетической энергии в потенциальную.

Рассмотрим исследования А.А. Федорца, где степень перфорации предлагается оценивать параметром дискретности:

$$\beta = 1/(n+1) \quad [14]$$

или

$$\ell = \ell_{\text{отв}}(n+1),$$

где n – количество отводов наводопроводящем трубопроводе; $\ell_{\text{отв}}$ – расстояние между отводами; ℓ – длина участка трубопровода, м.

Отбор жидкости по длине трубопровода происходит дискретно, то есть не через условное

щелевое отверстие вдоль трубопровода. Расположенные на некотором расстоянии друг от друга отверстия и величину потерь напора необходимо выразить через величину потерь напора при равномерном отборе $h_{\text{равн}}$ и параметр дискретности:

$$h_{\text{тр.дискр}} = \left(Q_{\text{тр}}^2 + Q_{\text{тр}} Q_n + \frac{Q_n^2}{3} \right) \frac{\ell}{K^2} \cdot \left(1 + 1,7 \left(\frac{\ell_{\text{отв}}}{\ell} \right)^{1,04} \right) + A \left(Q_{\text{тр}} Q_n + \frac{Q_n^2}{2} \right), \quad (13)$$

где $Q_{\text{тр}}$ и Q_n – соответственно транзитный расход на рассматриваемом участке водопроводящего трубопровода и путевой расход, м³/с; K – модуль расхода.

Полученное уравнение позволяет определять потери напора с учетом дискретности отбора жидкости, то есть из водопроводящих трубопроводов с отводами воды под водоотводы или капельницы с большей степенью точности.

Для подтверждения теоретических положений были проведены экспериментальные исследования (рис. 1, 2).

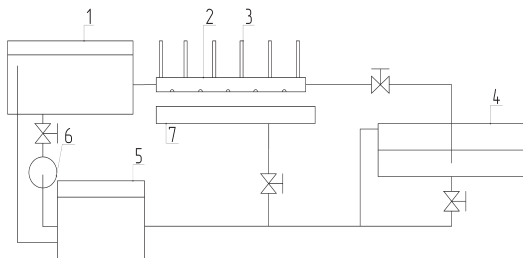


Рис. 1. Лабораторная установка для определения характеристик потока
Fig. 1. Laboratory installation for determining the characteristics of the flow



Рис. 2. Уточнения коэффициента отсоединения жидкости a_2
Fig. 2. Clarification of the coefficient of disconnection of the fluid a_2

Лабораторная установка включает в себя: 1 – напорный бак; 2 – сменные трубы с отверстиями разного диаметра и на разном расстоянии; 3 – пьезометры (больше 0,1 МПа – манометры); 4 – мерный бак; 5 – сливной бак; 6 – насос; 7 – желоб.

Давление в трубопроводе менялось от 0,06 до 0,35 МПа.

Расход определялся объемным способом. Путевой расход собирался при помощи желоба.

Величина угла отклонения струи замерялась с помощью градуированного шаблона.

Результаты и их обсуждение. Коэффициент гидравлического трения изменяется от 0,087 при Re 2100 до 0,03 при Re 44300. Отверстия – с обработанными кромками. Оценка ошибок измерений осуществлялась согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают теоретические заданные предпосылки. Значение коэффициента гидравлического трения несколько больше в трубопроводах с водоотводами, и с увеличением интенсивности отбора разность увеличивается. Параметр дискретности находится в границах 1,06-1,26 (табл.). Коэффициент отсоединения потока находится в границах $0,66 < a_2 < 0,87$.

Таблица
Данные для определения параметра дискретности

Table
Data for determining the discreteness parameter

$\ell_{\text{отв}}$	$Q_{\text{п/с}}$	Диаметр d , мм Diameter d , mm	Диаметр $d_{\text{отв}}$, мм Diameter $d_{\text{отв}}$, mm	$Q_{\text{тр}}$, л/с	Re	Параметр дискретности Discreteness parameter
0,25	7,8	48	10	39	14257	1,06
	31,6	60	20	151,6	17821	
	62	159	24	61,56	4770	
0,25	1,9	60	5	12,2	1852	1,06
	20	60	16	98	15621	
	5	60	8	40,3	22101	
0,5	3,9	48	10	17,2	13556	1,12
	15,6	60	20	62,4	14267	
	30	159	24	280	46225	
0,5	0,96	60	5	5,6	19885	1,12
	10	60	16	160,2	17523	
	2,4	60	8	12,6	18665	
1	1,9	48	5	9,5	13557	1,26
	7,8	60	20	31,2	16425	
	15,4	159	24	154	42556	
1	0,48	60	5	2,4	13823	1,26
	5	60	16	20,1	14558	
	1,2	60	8	27,2	17533	

Выводы

Теоретические исследования позволили получить зависимости, описывающие характеристики потока при наличии как равномерной,

так и неравномерной установки водоотводов, потерь напора с учетом параметра дискретности, учитывающего количество отводов на единицу длины.

Библиографический список

1. **Агроскин И.И.** Гидравлика: учебник. – Изд. 4-е, перераб. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 352 с.
2. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические потери на трение в трубопроводах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 256 с.
3. **Альтшуль А.Д.** Примеры расчетов по гидравлике. – М.: Стройиздат, 1977. – 254 с.
4. **Губер К.В.** Дождевальные машины и их применение. – М.: Россельхозиздат, 1975. – 70 с.
5. **Губер К.В.** Оросительные системы на основе минимизации материало- и энергоемкости // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1999. – № 4.
6. **Губер К.В.** Ресурсосберегающие технологии и конструкции оросительных систем при дождевании: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2000. – 518 с.
7. **Затинацкий С.В., Колганов Д.А.** Гидравлическая модель работы модифицированной ДМ «Фрегат» с возможностью движения без полива // Научное обозрение. – 2017. – № 6. – С. 20-27.
8. **Исаев А.П.** Гидравлика дождевальных машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 214 с.
9. **Колганов Д.А.** Дождевальная машина «Фрегат» с усовершенствованной системой водоподдачи для полива в низконапорном режиме: Дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2017. – 168 с.
10. **Курганов А.М., Федоров Н.Ф.** Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.
11. **Маккавеев В.М., Коновалов И.М.** Гидравлика. – М.-Л.: Речиздат, 1940. – 643 с.
12. **Петров Г.А.** Гидравлика переменной массы: Монография. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1964. – 224 с.
13. **Снипич Ю.Ф.** Интенсификация технологий и совершенствование технических средств орошения дождеванием: Дис. ... д-ра техн. наук. – Новочеркасск, 2011. – 340 с.
14. **Федорец А.А.** Теоретические основы и методика гидравлического расчета закрытой сети мелиоративных систем с переменным расходом жидкости: Дис. ... канд. техн. наук. – Коломна, 1993. – 305 с.
15. **Favre H.** Contribution à l'étude des courants liquids. – Zürich, 1933.

Критерии авторства

Журавлева Л.А., Попков И.А., Алдиаб Анас, Хеирбеик Бассел выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Статья поступила в редакцию 20.07.2022 г.

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

References

1. **Agroskin I.I.** Gidravlika: uchebnik. Izd. 4-e, pere-rab.. – M.-L.: Enegiya, 1964. – 352 s.
2. **Altshul A.D.** Gidravlicheskie poteri na trenie v truboprovodah. – M.-L.: Gosenergoizdat, 1963. – 256 s.
3. **Altshul A.D.** Primery raschetov po gidravlike. – M.: Strojizdat, 1977. – 254 s.
4. **Guber K.V.** Dozhdevalnye mashiny i ih primene-nie. – M.: Rosselhoz izdat, 1975. – 70 s.
5. **Guber K.V.** Orositelnye sistemy na osnove mini-mizatsii material- i energoemkosti // Traktory i selskoho-zyajstvennye mashiny. – 1999. – № 4.
6. **Guber K.V.** Resursosberegayushchie tehnolo-gii i konstruksii orositelnyh sistem pri dozhdeva-nii / K.V. Guber: Dis. d-ra tehn. nauk. – M., 2000. – 518 s.
7. **Zatinatskij S.V., Kolganov D.A.** Gidravliches-kaya model raboty modifitsirovannoj DM «Fregat» s voz-mozhnostyu dvizheniya bez poliva // Nauchnoe obozre-nie. – 2017. – № 6. – S. 20-27.
8. **Isaev A.P.** Gidravlika dozhdevalnyh mashin. – M.: Mashinostroenie, 1973. – 214 s.
9. **Kolganov D.A.** Dozhdevalnaya mashina «Fre-gat» s usovershenstvovannoj sistemoy vodopodachi dlya poliva v nizkonapornom rezhime: Dis. ...kand. tehn. nauk / D.A. Kolganov. – Saratov, 2017. – 168 s.
10. **Kurganov A.M., Fedorov N.F.** Gidravlicheskie raschety system vodosnabzheniya i vodootvedeniya. – L.: Strojizdat, 1986. – 440 s.
11. **Makkaveev V.M., Konovalov I.M.** Gidravli-ka. – M.-L.: Rechizdat, 1940. – 643 s.
12. **Petrov G.A.** Gidravlika peremennoj massy. Monografiya. – Kharkov: Izd-vo Kharkovskogo un-ta, 1964. – 224 s.
13. **Snipich Yu.F.** Intensifikatsiya tehnologij i so-vershenstvovanie tehicheskikh sredstv orosheniya doz-hdevaniem / Yu.F. Snipich: Dis. d-ra tehn. nauk. – No-vocherkassk, 2011. – 340 s.
14. **Fedorets A.A.** Teoreticheskie osnovy i metodi-ka gidravlicheskogo rascheta zakrytoj seti meliorativnyh system s peremennym rashodom zhidkosti: Dis. ...kand. tehn. nauk / A.A. Fedorets. – Kolomna, 1993. – 305 s.
15. **Favre H.** Contribution à l'étude des courants liquids / H. Favre. – Zürich. – 1933.

Criteria of Authorship

Zhuravleva L.A., Popkov I.A., Alduab Anas, Kheirobeik Bassel performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Zhuravleva L.A., Popkov I.A., Alduab Anas, Kheirobeik Bassel have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 20.07.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:551.583:631.1

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-105-113

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ В ЗОНАХ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ КАЗАХСТАНА

МУСТАФАЕВ ЖУМАХАН СУЛЕЙМЕНОВИЧ, д-р техн. наук, профессор

z-mustsfa@rambler.ru

АО «Институт географии и водной безопасности: г. Алматы, Медеуский р-н, ул. Пушкина, 99, Республика Казахстан

На основе многолетних информационно-аналитических материалов справочно-информационного портала «Погода и климат», Всемирной метеорологической организации (ВМО) и РГП «Казгидромет» за 1940-2020 гг. по 17 метеорологическим станциям Алматинской и Жетысуской области, расположенным на территории Балхаш-Алакольского водохозяйственного бассейна Республики Казахстан, построены графики изменения среднегодовой температуры воздуха, годовых атмосферных осадков и их линейные тренды с использованием программы Microsoft Excel. Получены системы линейных уравнений, позволяющих создать банк климатических изменений с целью выявления региональных особенностей и тенденции изменения климата, разработки программного обеспечения для оценки территориальных различий энергетических ресурсов и нормы водопотребности сельскохозяйственных угодий. Для решения проблемы водной безопасности в условиях дефицита водных ресурсов с глобальным изменением климата доказана необходимость разработки нормативных показателей в целях долгосрочного прогнозирования и планирования деятельности в сфере водопользования в рамках нормирования суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур и сельскохозяйственных угодий на основе современных мировоззренческих взглядов и естественнонаучного представления об эколого-экономических механизмах использования водных ресурсов.

Ключевые слова: изменение климата, температура воздуха, атмосферные осадки, анализ, оценка, энергетические ресурсы, теплообеспеченность, водообеспеченность, нормирование водопотребности

Формат цитирования: Мустафаев Ж.С. Влияние изменения климата водообеспеченности сельскохозяйственных угодий в зонах недостаточного увлажнения Казахстана // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 105-113. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-105-113.

© Мустафаев Ж.С., 2022

Original article

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WATER SUPPLY OF AGRICULTURAL LAND IN ZONES OF INSUFFICIENT MOISTURE IN KAZAKHSTAN

MUSTAFAEV ZHUMAKHAN SULEYMENOVICH, Doctor of Technical Sciences, Professor

z-mustsfa@rambler.ru

JSC "Institute of Geography and Water Safety: Almaty, Medeu district, Pushkin st., 99, Republic of Kazakhstan

Based on long-term information and analytical materials of the reference and information portal «Weather and Climate», the World Meteorological Organization (WMO) and RSE «Kazhydromet» for 1940-2020 for 17 meteorological stations of the Almatinsky and Zhetysussky regions located on the territory of the Balkhash-Alakol water management basin of the Republic of Kazakhstan graphs of changes in the average annual air temperature and annual precipitation and their linear trends were built using the Microsoft program Excel and received a system of linear equations, allowing the creation of a bank of climate changes in order to identify regional features and trends in climate change, develop software to assess territorial differences in energy resources and the norms of water demand for agricultural land. To solve the problem of water security in the context of water scarcity with

global climate change, the need to develop standard indicators for long-term forecasting and planning of activities in the field of water use within the framework of rationing the total water consumption of agricultural crops and agricultural land based on modern worldviews and the natural scientific understanding of the environmental economic mechanisms for the use of water resources.

Keywords: *climate change, air temperature, precipitation, analysis, assessment, energy resources, heat supply, water supply, water demand regulation*

Format of citation: *Mustafaev Zh.S. Impact of climate change on water supply of agricultural land in zones of insufficient moisture in Kazakhstan // Prirodoobustroystvo. – 2022. – No. 5. – P. 105-113. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-105-113.*

Введение. В настоящее время система природопользования в области сельского хозяйства перешла в активную стадию сукцессии в связи с глобальным изменением климата, так как последовательное закономерное повышение средней годовой температуры воздуха и снижение годовых атмосферных осадков стало не только научной гипотезой, но и аксиомой, ведущей к снижению водообеспеченности сельскохозяйственных угодий в зонах недостаточного увлажнения.

В условиях постоянного повышения температуры воздуха возрастает норма суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий, а снижение годовых атмосферных осадков приводит к увеличению дефицита нормы суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий. В результате их совместного воздействия уменьшается среднегодовой сток речных бассейнов, являющийся пространственным базисом народонаселения, промышленности и сельского хозяйства.

Для обеспечения водной безопасности сельскохозяйственных угодий в зонах недостаточного увлажнения и нивелирования отрицательного действия изменения климата возникает необходимость изучения их в пространственно-временном масштабе с целью выявления тенденции направленности и интенсивности изменения водообеспеченности сельскохозяйственных угодий в зонах недостаточного увлажнения.

Целью исследований явилось изучение климатических изменений в пространственно-временном масштабе в Балхаш-Алакольском водохозяйственном бассейне, охватывающем территории Алматинской и Жетысуской областей, и на их основе – прогноз суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий с целью создания банка данных для оценки водной безопасности с учетом территориальных различий по водообеспеченности.

Объектом исследований стала природная система Алматинской и Жетысуской областей, расположенных на территории Балхаш-Алакольского водохозяйственного бассейна и охватывающих 4 агроклиматические зоны

Республики Казахстан, то есть горную, предгорную, предгорно-полупустынную и южную пустыню, как модель природной системы для изучения современных тенденций изменения суммарной водопотребности сельскохозяйственных угодий под влиянием глобального изменения климата.

Материалы и методы исследований.

На сегодняшний день главной задачей климатического обслуживания агропромышленного комплекса в Республике Казахстан является создание научно обоснованной информационно-аналитической базы климатических показателей для обеспечения безопасности сельскохозяйственной деятельности. Для создания информационно-аналитической базы исследований с климатическими показателями использованы информационно-аналитические материалы справочно-информационного портала «Погода и климат», Всемирной метеорологической организации (ВМО) и РГП «Казгидромет», где основным критерием при выборе 29 метеорологических станций, расположенных на территории Алматинской и Жетысуской областей, является длительность ряда наблюдений за климатическими показателями. Эти наблюдения составляют более 80 лет и включают в себя годы с различной гидролого-климатической обстановкой [1-3].

Для определения закономерности изменения среднегодовой температуры воздуха и годовых атмосферных осадков во времени был использован метод линейного тренда, то есть метод статистической математики, широко применяемой для оценки тенденции роста, который записывается в виде уравнения линейной регрессии:

$$y(T) = a_0 + a_i \cdot T,$$

где $y(T)$ – расчетное значение показателя наблюдений; T – порядковый номер наблюдаемой величины; a_0 и a_i – регрессионные коэффициенты.

Результаты и их обсуждение. На основе многолетних информационно-аналитических материалов справочно-информационного портала «Погода и климат», Всемирной метеорологической организации (ВМО)

и РГП «Казгидромет» по 17 метеорологическим станциям, расположенным на территории Балхаш-Алакольского водохозяйственного бассейна Республики Казахстан, построены графики изменения среднегодовой температуры воздуха и годовых атмосферных осадков за 1940-2020 гг.

и их линейные тренды с использованием программы Microsoft Excel. Получены следующие системы линейных уравнений (табл. 1):

$$\bar{Q} = a_o + a_i \cdot t_i \quad \text{и} \quad O_{ci} = a_o + a_i \cdot t_i,$$

где t_i – среднегодовая температура воздуха, °C; O_{ci} – годовое количество атмосферных осадков, мм.

Таблица 1

Регрессионные метеорологические модели изменения климата в пространственно-временном масштабе Балхаш-Алакольского водохозяйственного бассейна Республики Казахстан

Table 1

Regression meteorological models of climate change in the spatio-temporal scale of the Balkhash-Alakol water management basin of the Republic of Kazakhstan

Административный район <i>Administrative region</i>	Метеостанция <i>Weather station</i>	Уравнение линейных трендов <i>Linear trend equation</i>	Изменение показателей <i>Change of indicators</i>
Алматинская область / <i>Almaty area</i>			
Балхашский <i>Balkhashsky</i>	Баканас <i>Bakanas</i>	$t_i = 0,0298 \cdot T_i + 7,3196$	2,44
		$O_{ci} = 0,2005 \cdot T_i + 176,81$	16,0
Енбекшиказахский <i>Enbekshikazakhsky</i>	Есик <i>Esik</i>	$t_i = 0,0166 \cdot T_i + 8,0447$	1,36
		$O_{ci} = -2,753 \cdot T_i + 699,41$	-221,0
Жамбылский <i>Zhambylsky</i>	Узынагаш <i>Uzynarash</i>	$t_i = 0,0211 \cdot T_i + 6,8127$	1,69
		$O_{ci} = 0,5289 \cdot T_i + 398,66$	42,0
Илийский <i>Ili</i>	Конаев <i>Konayev</i>	$t_i = 0,0192 \cdot T_i + 8,7318$	1,53
		$O_{ci} = 0,4477 \cdot T_i + 214,26$	36,0
Карасайский <i>Karaisai</i>	Алматы <i>Almaty</i>	$t_i = 0,0292 \cdot T_i + 8,3554$	2,3
		$O_{ci} = 1,1748 \cdot T_i + 598,30$	10,0
Кегенский <i>Kegensky</i>	Кеген <i>Kegen</i>	$t_i = 0,0338 \cdot T_i + 1,6564$	2,70
		$O_{ci} = 0,2071 \cdot T_i + 367,16$	17,0
Райымбекский <i>Rajymbeksky</i>	Нарынкол <i>Narynkol</i>	$t_i = 0,0252 \cdot T_i + 2,3308$	2,0
		$O_{ci} = 0,3147 \cdot T_i + 378,69$	25,0
Талгарский <i>Talgarsky</i>	Ассы <i>Assy</i>	$t_i = 0,0124 \cdot T_i - 0,1575$	0,70
		$O_{ci} = -1,0846 \cdot T_i + 456,8$	-86,7
Уйгурский <i>Uygursky</i>	Кыргызсай <i>Kyrgyzsan</i>	$t_i = 0,0157 \cdot T_i + 7,6525$	1,25
		$O_{ci} = 0,3336 \cdot T_i + 338,16$	27,0
Жетысуская область / <i>Zhetysusk area</i>			
Аксуский <i>Aksusky</i>	Матай <i>Mataj</i>	$t_i = 0,0274 \cdot T_i + 6,6063$	2,19
		$O_{ci} = 0,5524 \cdot T_i + 218,28$	44,0
Алакольский <i>Alakolsky</i>	Учарал <i>Ucharal</i>	$t_i = 0,0241 \cdot T_i + 6,1982$	1,93
		$O_{ci} = -0,2528 \cdot T_i + 315,4$	-20,0
Ескельдинский <i>Eskeldinsky</i>	Текели <i>Takeli</i>	$t_i = 0,0349 \cdot T_i + 4,4685$	2,79
		$O_{ci} = -0,6196 \cdot T_i + 791,1$	-16,0
Каратальский <i>Karatalsky</i>	Уштобе <i>Ushtobe</i>	$t_i = 0,0247 \cdot T_i + 6,4193$	1,98
		$O_{ci} = -0,0088 \cdot T_i + 263,1$	-0,71
Кербулакский <i>Kerbulaksky</i>	Сарыозек <i>Saryozek</i>	$t_i = -0,0060 \cdot T_i + 8,0193$	0,49
		$O_{ci} = 0,2390 \cdot T_i + 299,18$	19,0
Коксуский <i>Koksusky</i>	Талдыкурган <i>Taldykurgan</i>	$t_i = 0,0316 \cdot T_i + 9,9489$	2,53
		$O_{ci} = 0,7014 \cdot T_i + 350,96$	57,0
Панфиловский <i>Panfilovsky</i>	Жаркент <i>Zharkent</i>	$t_i = 0,0138 \cdot T_i + 8,4313$	2,4
		$O_{ci} = 0,5818 \cdot T_i + 167,34$	47,0
Саркандский <i>Sarkandeksky</i>	Сарканд <i>Sarkand</i>	$t_i = 0,0064 \cdot T_i + 7,6045$	0,51
		$O_{ci} = -0,1037 \cdot T_i + 480,5$	-8,0

Оценка изменения климатических показателей Алматинской и Жетысуской областей в рамках природно-климатических зон проводилась по многолетним данным 17 метеорологических станций (табл. 1). В соответствии с этими данными изменение среднемноголетнего значения годовой температуры воздуха за рассматриваемый период 1940-2020 гг., то есть за 81 год, составляет $0,49-2,79^{\circ}\text{C}$, а изменения среднемноголетнего значения годовых атмосферных осадков – от $-221,0$ до $47,0$ мм.

Таким образом, наблюдаемая положительная тенденция изменения температуры воздуха и незначительная отрицательная тенденция изменения годовых атмосферных осадков в отдельных метеорологических станциях, по всей вероятности, будут оказывать влияние на природно-ресурсный потенциал Алматинской и Жетысуской областей в ближайшей перспективе.

Для оценки природно-ресурсного потенциала Алматинской и Жетысуской областей использованы сумма биологически активных температур воздуха ($\sum t, ^{\circ}\text{C}$), фотосинтетически активная радиация (R_i), испаряемость (E_{oi}) и сумма атмосферных осадков (O_{ci}).

Географическая особенность радиационного баланса (R_i) деятельной поверхности приземного слоя воздуха и почвы характеризуется суммой активных температур воздуха ($\sum t > 10^{\circ}\text{C}$). Для их определения использована формула Ю.Н. Никольского и В.В. Шабанова [4]:

$$R_i = 13.39 + 0.0079 \cdot \sum t > 10^{\circ}\text{C}.$$

Испаряемость с водной поверхности является функцией средней месячной температуры воздуха ($t, ^{\circ}\text{C}$) и относительной влажности воздуха (α), %. Для определения их месячного значения используется формула Н.Н. Иванова [5]:

$$\dot{A}_i = 0.0018 \cdot (25 + t)^2 (100 - \alpha),$$

где E_o – месячная испаряемость, мм; t – средняя месячная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; α – средняя месячная относительная влажность воздуха, %.*

В рамках исследований был проведен анализ изменения суммы биологически активных температур воздуха ($\sum t, ^{\circ}\text{C}$), фотосинтетически активной радиации (R_i), испаряемости (E_{oi}) и годовых атмосферных осадков (O_{ci}), характеризующих природно-ресурсный потенциал территории Алматинской и Жетысуской областей. Оценка проводилась на основе сравнительного анализа в интервале 1941-1960 гг. (базовая), 1961-1980, 1981-2000, 2001-2020 гг. (фрагмент представлен в таблице 2).

Оценка природно-ресурсного потенциала территории Алматинской и Жетысуской областей показала, что энергетические показатели

за рассматриваемый период в сравнении с 1941-1960 (базовая) по 2001-2020 гг. (прогнозная) повышаются в разрезе природно-климатических зон:

* В предгорной степной зоне, где расположены Райымбекский и Кегенский административные районы, по данным метеорологических станций Нарынкол и Кеген, за рассматриваемый период 1941-2020 гг. сумма биологически активных температур воздуха ($\sum t, ^{\circ}\text{C}$) увеличивается от $138,6$ до $784,1^{\circ}\text{C}$, фотосинтетически активная радиация (R_i) – от $4,5$ до $26,0$ кДж/см², испаряемость (E_{oi}) – от $45,0$ до $235,0$ мм; годовые атмосферные осадки (O_{ci}) изменились от $-1,0$ до $3,0$ мм.

* В предгорной полупустынной зоне, где расположены Талгарский, Енбекшиказахский, Карасайский, Уйгурский, Ескельдинский, Кербулакский, Коксуский и Панфиловский административные районы, по данным метеорологических станций Ассы, Есик, Алматы, Кыргызсай, Текели, Сарыозек, Талдыкурган и Жаркентза, за рассматриваемый период 1941-2020 гг. сумма биологически активных температур воздуха ($\sum t, ^{\circ}\text{C}$) увеличивается от $69,9$ до $1118,8^{\circ}\text{C}$, фотосинтетически активная радиация (R_i) – от $2,3$ до $37,0$ кДж/см², испаряемость (E_{oi}) – от $21,0$ до $335,0$ мм; годовые атмосферные осадки (O_{ci}) изменились от $-143,0$ до $71,0$ мм.

* В южной пустынной зоне, где расположены Балхашский, Жамбылский, Илийский, Аксуский, Алакольский, Караталский и Саркандский административные районы, по данным метеорологических станций Баканас, Узынагаш, Конаев, Учарал, Уштобе и Сарканд, за рассматриваемый период 1941-2020 гг. сумма биологически активных температур воздуха ($\sum t, ^{\circ}\text{C}$) увеличивается от $84,3$ до $263,3^{\circ}\text{C}$, фотосинтетически активная радиация (R_i) – от $2,8$ до $8,7$ кДж/см², испаряемость (E_o) – от $25,0$ до $79,0$ мм; годовые атмосферные осадки (O_{ci}) изменились от $-14,0$ до $42,0$ мм.

При этом повышение суммы биологически активных температур воздуха ($\sum t, ^{\circ}\text{C}$) и фотосинтетически активной радиации (R_i , кДж/см²) как энергетических ресурсов природных систем способствует повышению теплообеспеченности и снижению влагообеспеченности сельскохозяйственных угодий. Использование показателя влагообеспеченности обосновывается тем, что он включает в себя основную составляющую водного (сумму атмосферных осадков) и теплового (испаряемость) балансов, которые связаны определенными функциональными зависимостями с другими элементами водного и теплового балансов почвенного и растительного покровов ландшафтов [6].

Таблица 2

**Изменение природно-ресурсного потенциала Алматинской и Жетысуской областей
в Балхаш-Алакольском водохозяйственном бассейне**

Table 2

**Changes in the natural – resource potential of Almaty and Zhetysusk regions
in the Balkhash-Alakol water management basin**

Метеостанция Weather station	Период прогнозирования Period of forecasting	Показатели природно-ресурсного потенциала Indicators of the natural-resource potential			
		$\Sigma t, C$	$R_i, \text{ КДЖ/см}^2$	$\dot{A}_{ii}, \text{ мм}$	$O_{ci}, \text{ мм}$
Алматинская область / Almaty area					
Предгорная степная зона / Foothillsteppezone					
Нарынкол Narynkol	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	1966,0	121,2	590,0	407,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	2183,5	128,4	655,0	410,0
	Разница средних / Average difference	217,5	7,2	65,0	3,0
Кеген Kegen	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	1259,3	97,7	378,0	356,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	2043,4	123,7	613,0	355,0
	Разница средних / Average difference	784,1	26,0	235,0	-1,0
Предгорная полупустынная зона / Foothillsemi-desertzone					
Ассы Assy	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	964,5	88,0	289,0	430,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	1034,4	90,3	310,0	364,0
	Разница средних / Average difference	69,9	2,3	21,0	-66,0
Есик Esik	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3133,7	159,8	940,0	638,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3351,9	167,1	1006,0	495,0
	Разница средних / Average difference	218,7	7,3	66,0	-143,0
Алматы Almaty	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3392,3	168,4	1018,0	625,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3635,9	176,5	1091,0	696,0
	Разница средних / Average difference	243,6	7,4	73,0	71,0
Кыргызсай Kyrgyzsai	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3047,7	157,0	914,0	383,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3217,5	162,6	965,0	387,0
	Разница средних / Average difference	169,8	5,6	51,0	4,0
Южная пустынная зона / Southern desert zone					
Баканас Bakanas	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3573,5	174,4	1072,0	188,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3770,6	180,9	1131,0	200,0
	Разница средних / Average difference	197,1	6,5	59,0	12,0
Узынагаш Uzynagash	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3127,6	159,6	938,0	405,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3315,8	165,9	995,0	444,0
	Разница средних / Average difference	188,2	6,3	57,0	39,0
Конаев Konaev	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3495,0	171,8	1049,0	220,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3724,8	179,4	1117,0	257,0
	Разница средних / Average difference	229,8	7,6	68,0	37,0
Жетысуская область / Zhetysusk area					
Предгорная полупустынная зона / Foothillsemi-desertzone					
Текели Tekeli	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	1878,8	118,3	564,0	775,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	2997,6	155,3	899,0	748,0
	Разница средних / Average difference	1118,8	37,0	335,0	-27,0
Сарыозек Saryozek	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3005,1	155,6	902,0	307,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3254,7	163,8	986,0	327,0
	Разница средних / Average difference	249,6	9,0	92,0	36,0
Талдыкурган Taldykurgan	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3264,3	164,2	979,0	378,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3581,8	174,7	1075,0	417,0
	Разница средних / Average difference	317,5	10,5	96,0	39,0
Жаркент Zharkent	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3563,4	174,1	1069,0	185,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3745,2	180,1	1124,0	208,0
	Разница средних / Average difference	181,8	6,0	55,0	23,0
Южная пустынная зона / Southern desert zone					
Учарал Ucharal	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3356,5	167,2	1007,0	324,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3523,3	172,7	1057,0	310,0
	Разница средних / Average difference	166,8	5,5	50,0	-14,0
Уштобе Ushtobe	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3376,8	167,9	1013,0	270,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3538,4	173,2	1061,0	270,0
	Разница средних / Average difference	161,6	5,3	48,0	0,0
Сарканд Sarkand	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	3199,9	162,0	960,0	481,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	3284,4	164,8	985,0	484,0
	Разница средних / Average difference	84,5	2,8	25,0	3,0

В общем виде коэффициент увлажнения (K_{yi}), позволяющий одновременно учитывать и оценивать тепло- и влагообеспеченность ландшафтов, представляет собой отношение суммы осадков (O_{ci}) к сумме испаряемости (E_{oi}), который определяется в основном среднемесячной температурой (t , °C) и влажностью (α , %) воздуха, то есть [5]

$$K_{yi} = O_{ci} / E_{oi}.$$

В природной системе, как любой физический процесс изменений и превращений, процесс теплообмена в конкретной точке пространства за известный промежуток времени характеризуется балансом прихода и расхода энергии, то есть законом сохранения энергии, когда для их математического описания используется комплексный гидротермический показатель ($\bar{R}_i$) [7], представляющий собой отношение радиационного баланса (R_i) к затратам тепла на испарение выпавших осадков ($L \cdot O_{ci}$):

$$\bar{R}_i = R_i / L \cdot O_{ci},$$

где L – удельная теплота парообразования, принятая постоянной и равная 2,5 кДж/см².

При этом суммарное испарение сельскохозяйственных угодий (мм) вычисляется согласно уравнению [8]:

$$ET_i = 4,0 \cdot R_i \cdot L^{-1}.$$

Для определения дефицита испаряемости и суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий проведем некоторые преобразования:

$$\Delta E_{oi} = [0,0018 \cdot (25 + t)^2 (100 - \alpha)] - O_{ci};$$

$$\Delta ET_i = [4,0 \cdot (R_i / \bar{R}_i) \cdot L] - O_{ci}.$$

При этом предельно допустимый дефицит суммарного водопотребления (дефицит нормы водопотребления) сельскохозяйственных угодий определяется с учетом геоэкологических ограничений, то есть при ($\bar{R}_i = 0,9 - 1,0$), когда в природной среде наблюдаются благоприятные условия формирования почвообразовательного процесса [9].

На основе интегральных климатических и энергетических показателей определена естественная тепло- и влагообеспеченность территории Алматинской и Жетысуской областей Балхаш-Алакольского водохозяйственного бассейна (табл. 3), что позволяет установить влияние глобального изменения климата на дефицит испаряемости и суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий в пространственно-временном масштабе.

Таблица 3

Изменение естественной тепло- и влагообеспеченности сельскохозяйственных угодий Алматинской и Жетысуской областей в Балхаш-Алакольском водохозяйственном бассейне по сравнению с базовым периодом

Table 3

Changes in the natural heat and moisture supply of agricultural lands of Almaty and Zhetysusk regions in the Balkhash-Alakol water basin compared to the base period

Метеостанция Weather station	Период прогнозирования Period of forecasting	Показатели тепло- и влагообеспеченности сельскохозяйственных угодий Indicators of heat and moisture supply of agricultural lands				
		K_{yi}	$\bar{R}_i$	ΔE_{oi}	ET_i	ΔET_i
1	2	3	4	5	6	7
Алматинская область / Almaty area						
Предгорная степная зона / Foothill steppe zone						
Нарынкол Narynkol	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,69	1,19	183,0	485,0	78,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,63	1,25	245,0	514,0	104,0
	Разница средних / Average difference	-0,06	0,06	62,0	29,0	26,0
Кеген Kegen	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,94	1,10	22,0	391,0	35,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,58	1,39	258,0	495,0	40,0
	Разница средних / Average difference	-0,36	0,29	236,0	104,0	5,0
Предгорная полупустынная зона / Foothill semi-desert zone						
Ассы Assy	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	1,49	0,82	-141,0	352,0	-78,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	1,17	0,99	-54,0	361,0	-3,0
	Разница средних / Average difference	-0,32	0,17	87,0	9,0	75,0
Есик Esik	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,68	1,00	302,0	639,0	1,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,49	1,36	511,0	668,0	173,0
	Разница средних / Average difference	-0,19	0,36	209,0	29,0	172,0
Алматы Almaty	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,61	1,08	393,0	674,0	49,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,64	1,01	395,0	706,0	10,0
	Разница средних / Average difference	0,01	-0,07	2,0	31,0	-39,0

1	2	3	4	5	6	7
Кыргызсай <i>Kyrgyzsai</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,42	1,64	531,0	628,0	245,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,40	1,68	578,0	650,0	263,0
	Разница средних / Average difference	-0,02	0,04	47,0	22,0	18,0
Южная пустынная зона / Southern desert zone						
Баканас <i>Bakanas</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,18	3,71	884,0	698,0	510,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,18	3,62	931,0	724,0	504,0
	Разница средних / Average difference	0,00	-0,09	47,0	26,0	-6,0
Узынагаш <i>Uzynagash</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,43	1,57	533,0	638,0	233,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,45	1,49	551,0	644,0	220,0
	Разница средних / Average difference	0,02	-0,08	18,0	26,0	-13,0
Конаев <i>Konaev</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,21	3,12	829,0	687,0	467,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,23	2,79	860,0	718,0	461,0
	Разница средних / Average difference	0,02	-0,33	31,0	31,0	-6,0
Жетысуская область / Zhetysusk area						
Предгорная полупустынная зона / Foothill semi-desert zone						
Текели <i>Tekeli</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	1,37	0,61	-221,0	473,0	-302,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,83	0,83	151,0	621,0	-127,0
	Разница средних / Average difference	-0,54	0,21	372,0	148,0	-175,0
Сарыозек <i>Saryozek</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,34	2,03	595,0	622,0	313,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,33	2,00	659,0	655,0	328,0
	Разница средних / Average difference	-0,01	-0,03	64,0	33,0	15,0
Талдыкур-ган <i>Taldykur-gan</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,37	1,73	301,0	657,0	279,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,39	1,67	658,0	699,0	282,0
	Разница средних / Average difference	0,02	-0,06	357,0	42,0	3,0
Жаркент <i>Zharkent</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,17	3,76	884,0	696,0	511,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,19	3,46	916,0	711,0	512,0
	Разница средних / Average difference	0,02	-0,30	32,0	15,0	1,0
Южная пустынная зона / Southern desert zone						
Учарал <i>Ucharal</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,32	2,07	683,0	669,0	345,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,29	2,23	747,0	691,0	381,0
	Разница средних / Average difference	-0,03	0,16	64,0	22,0	36,0
Уштобе <i>Ushrobe</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,27	2,49	743,0	672,0	402,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,25	2,57	791,0	693,0	423,0
	Разница средних / Average difference	-0,02	0,08	48,0	21,0	13,0
Остров Алгазы <i>Island Algazy</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,14	4,80	805,0	639,0	505,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,13	5,22	884,0	652,0	527,0
	Разница средних / Average difference	-0,01	0,42	79,0	13,0	22,0
Сарканд <i>Sarkand</i>	Среднее 1941-1960 (база) / Average 1941-1960 (base)	0,53	1,35	479,0	648,0	167,0
	Среднее за 2001-2020 гг. / Average for 2001-2020 gg.	0,49	1,36	501,0	659,0	175,0
	Разница средних / Average difference	-0,04	0,01	32,0	11,0	8,0

При этом повышение среднегодовой температуры воздуха в пространственно-временном масштабе на территории Балхаш-Алакольского водохозяйственного бассейна (табл. 1) как энергетического ресурса природной системы способствует повышению испаряющей способности природной системы (табл. 2) в сравнении с базовым периодом (1941-1960 гг.). За прогнозируемый период 2001-2020 гг. это привело к значительному снижению водообеспеченности (K_{yi}) (от 0,06 до 0,54) и повышению теплообеспеченности ($\bar{R}_i$) (от 0,06 до 0,29) естественных ландшафтов, к росту дефицита испаряемости (ΔE_{oi}) от 2,0 до 372,0 мм, суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий (ΔET_i) – от 1,0 до 104,0 мм (табл. 3).

Таким образом, современная тенденция изменения климата на территории Балхаш-Алакольского водохозяйственного бассейна показывает, что среднегодовая температура воздуха, испаряемость и суммарное водопотребление сельскохозяйственных угодий постепенно повышаются. При этом годовые атмосферные осадки повышаются незначительно, что приводит к повышению дефицита испаряемости и суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий, которые способствовали усилению аридизации климата и изменению границы природно-климатических зон.

Схематическая карта коэффициента увлажнения за апрель-сентябрь на территории Казахстана была разработана в 1969 г.

Н.В. Данильченко и А.П. Попыкиным [10]. В настоящее время она используется в Казахском научно-исследовательском институте водного хозяйства при районировании режима орошения сельскохозяйственных культур в Казахстане. Карта устарела и не характеризует современное состояние природной системы и глобальное изменение климата. Также оросительные нормы сельскохозяйственных культур в Казахстане, разработанные Казахским научно-исследовательским институтом водного хозяйства [11, 12], и нормы водопотребности сельскохозяйственных угодий государств Центральной Азии, рекомендованные Научно-информационным центром Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии (МКВК) [13], соответствующие классификации выдающего физика Льва Ландау, противостоят законам природы и принципам природопользования [14], не могут быть использованы в качестве нормативных показателей, так как их количественные значения являются гораздо большими, чем потенциальная испаряющая способность природной системы.

Теоретическое обоснование нормы водопотребности сельскохозяйственных культур или угодий осуществляется на основе законов сохранения энергии природной системы, так как рассмотрение процесса влагообмена между дневной и ночной поверхностями связано с процессом теплообмена. Как любой физический процесс изменений и превращений, процесс теплообмена в конкретной точке пространства за известный промежуток времени характеризуется балансом прихода и расхода энергии, то есть законом сохранения энергии. В связи с этим нормы водопотребности сельскохозяйственных культур или угодий не могут быть больше испаряющей способности природной системы, а незнание законов природы привело к изменению понятий, ценностей и критериев, связанных с мелиорацией сельскохозяйственных земель.

Для решения водохозяйственных проблем в условиях дефицита водных ресурсов с глобальным изменением климата необходимо прежде всего теоретическое обоснование нормативных показателей в целях долгосрочного прогнозирования и планирования деятельности в сфере природопользования:

- суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур ($\bar{A}_{vi}$) или дефицит суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур ($\Delta\bar{A}_{vi}$) – количество воды, требуемое для пополнения физического испарения с поверхности почвы и транспирации с листовой поверхности культуры, являющихся функцией климатических показателей природной системы и биологических особенностей сельскохозяйственных культур, необходимо для

оптимизации состава и структуры адаптивно-ландшафтных систем земледелия с учетом геоэкологических ограничений при территориальном планировании оросительных мелиораций. Иными словами, средневзвешенный дефицит водопотребления сельскохозяйственных культур в структуре гидроагроландшафтов не должен быть больше, чем дефицит водопотребления сельскохозяйственных угодий [9]:

$$\Delta E_{\text{уср}} = \sum_{i=1}^n \Delta E_{vi} \cdot \alpha_i \leq \Delta E T_{\text{уср}},$$

где ΔE_{vi} – дефицит водопотребления -той сельскохозяйственной культуры в гидроагроландшафте, м³/га; i – количество сельскохозяйственных культур, входящих в структуру гидроагроландшафта; α_i – доля сельскохозяйственных культур в структуре гидроагроландшафта; $\Delta E T_{\text{уср}}$ – дефицит водопотребления сельскохозяйственных угодий, м³/га; $\Delta E_{\text{уср}}$ – средневзвешенный дефицит водопотребления сельскохозяйственных культур в структуре гидроагроландшафта.

– Суммарное водопотребление сельскохозяйственных угодий ($E T_{\text{уср}}$) или дефицит суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий ($\Delta E T_{\text{уср}}$) – количество воды, требуемое для пополнения физического испарения с поверхности почвенного покрова и транспирации с поверхности растительного покрова, являющихся функцией климатических показателей природной системы и затраты энергии на почвообразование, необходимо для нормирования забора воды из природных источников ($W_{\text{звб}}$), водоподачи для сельскохозяйственных угодий ($W_{\text{бсу}}$) и мощности водохозяйственных систем ($F_{\text{ласз}}$).

Объем водоподачи для сельскохозяйственных угодий ($W_{\text{бсу}}$) можно представить как функцию дефицита суммарного водопотребления сельскохозяйственных угодий ($\Delta E T_{\text{уср}}$), мощности адаптивно-ландшафтных систем земледелия ($F_{\text{ласз}}$) и надежности техники и технологии водоподачи ($K_{\text{нтв}}$), то есть $W_{\text{бсу}} = f(\Delta E T_{\text{уср}}, F_{\text{ласз}}, K_{\text{нтв}})$. Объем забора воды из природных источников является в свою очередь технологической функцией объема водоподачи для сельскохозяйственных угодий ($W_{\text{бсу}}$) и надежности водохозяйственных систем ($K_{\text{нвс}}$), то есть $W_{\text{звб}} = f(W_{\text{бсу}}, K_{\text{нвс}})$ [9].

Выводы

В целом глобальное изменение климата привело к постоянному повышению среднегодовому значению годовой температуры воздуха и к незначительному снижению годовых атмосферных осадков, как продуктов взаимосвязанных природных процессов и выполняющих особые средообразующие функции которые могут способствовать увеличению дефицита водопотребления сельскохозяйственных угодий или культур, выполняющих экономическую и экологическую функции жизнедеятельности человека. В рамках обеспечения водной безопасности они требуют

ориентирования естественнонаучных представлений об экологическом нормировании водопотребности сельскохозяйственных угодий и регламен-

таций безотходных ресурсосберегающих технологий орошения для предотвращения бесполезных затрат располагаемых водных ресурсов.

Библиографический список

1. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 13: Многолетние данные. Ч. 1-6, вып. 18: КазССР. Кн. 2. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 656 с.
2. Справочно-информационный портал «Погода и климат» <https://www.pogodaklimat.ru>
3. Всемирная Метеорологическая Организация (WMO), <https://public.Wmo.int/ru>
4. **Никольский Ю.Н., Шабанов В.В.** Расчет проектной урожайности в зависимости от водного режима мелиорируемых земель // Гидротехника и мелиорация. – 1986. – № 9. – С. 52-56.
5. **Иванов Н.Н.** Зоны увлажнения земного шара // Известия АН СССР, серия география и геофизика. – 1941. – № 3. – С. 15-32.
6. **Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Kamaliyev A.M.** Climatic changes in the basin of the transboundary Shu river // News of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of agricultural sciences. – 2019. – Vol. 5, N53. – P. 104-112.
7. **Будыко М.И.** Испарение в естественных условиях. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 136 с.
8. **Сенчуков Г.А., Новикова И.В.** Суммарное водопотребление и урожайность сельскохозяйственных культур // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2015. – № 4(20). – С. 108-119
9. **Мустафаев Ж.С., Рябцев А.Д.** Адаптивно-ландшафтные мелиорации земель в Казахстане. – Тараз: 2012. – 528 с.
10. **Данильченко Н.В., Попыкин А.П.** Методические указания по расчету режима орошения сельскохозяйственных культур в Казахстане // Вестник научно-технической и производственной информации. – Алма-Ата, 1969. – № 5 (9). – 78 с.
11. Оросительные нормы сельскохозяйственных культур в Казахстане (рекомендации). – Дзямбул: КазНИИВХ, 1981. – 80 с.
12. **Ибатуллин С.Р., Кван Р.А., Парамонов А.И., Балгабаев Н.Н.** Нормирование орошения в водохозяйственных бассейнах Казахстана. – Тараз, 2008. – 122 с.
13. **Рузиев М.Т., Приходко В.Г.** Оценка перспектив устойчивого развития государств бассейна Аральского моря с помощью модельных расчетов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2002. – № 1. – С. 54-56.
14. **Мустафаев Ж.С.** Экологическое обоснование мелиорации сельскохозяйственных земель. – LAPLAMBERN, AcademicPublishing, 2016. – 378 с.

Критерии авторства

Мустафаев Ж.С. выполнил теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись. Имеет на статью авторское право и несёт ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 15.08.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

References

1. Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 13: Mnogoletnie dannye. Ch. 1-6, vyp. 18: KazSSR. Kn. 2. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 656 s.
2. Spravochno-informatsionnyj portal «Pogoda i klimat» // www.pogodaklimat.ru
3. Vsemirnaya Meteorologicheskaya Organizaciya (WMO), <https://public.Wmo.int/ru>
4. **Nikolsky Yu.N., Shabanov V.V.** Raschet proektnoj urozhajnosti v zavisimosti ot vodnogo rezhima melioriruemykh zemel // Gidrotehnika i melioratsiya. – 1986. – № 9. – S. 52-56.
5. **Ivanov N.N.** Zony uvlazhneniya zemnogo shara // Izvestiya AN SSSR, seriya geografiya i geofizika. – 1941. – № 3. – S. 15-32.
6. **Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Kamaliyev A.M.** Climatic changes in the basin of the transboundary Shu river // News of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of agricultural sciences. – 2019. – Vol. 5, No. 53. – P. 104-112.
7. **Budyko M.I.** Isparenie v estestvennykh usloviyakh. – L.: Gidrometeoizdat, 1948. – 136 s.
8. **Senchukov G.A., Novikova I.V.** Summarnoe vodopotreblenie i urozhajnost selskohozyajstvennykh kultur // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioratsii. – 2015. – № 4(20). – S. 108-119
9. **Mustafaev Zh.S., Ryabtsev A.D.** Adaptivno-landshaftnye melioratsii zemel v Kazakhstane. – Taraz: 2012. – 528 s.
10. **Danilchenko N.V., Popykin A.P.** Metodicheskie ukazaniya po raschetu rezhima orosheniya selskohozyajstvennykh kultur v Kazakhstane // Vestnik nauchno-tehnicheskoy i proizvodstvennoy informatsii. – Alma-Ata, 1969. – № 5 (9). – 78 s.
11. Orositelnye normy selskohozyajstvennykh kultur v Kazakhstane (rekomentatsii). – Dzhambul: KazNIIVH, 1981. – 80 s.
12. **Ibatullin S.R., Kvan R.A., Paramonov A.I., Balgabaev N.N.** Normirovanie orosheniya v vodohozyajstvennykh bassejnah Kazakhstana. – Taraz, 2008. – 122 s.
13. **Ruziev M.T., Prihodko V.G.** Otsenka perspektiv ustojchivogo razvitiya gosudarstv bassejna Aralskogo morya s pomoshchyu modelnyh raschetov // Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo. – 2002. – № 1. – S. 54-56.
14. **Mustafaev Zh.S.** E'kologicheskoe obosnovanie melioratsii selskohozyajstvennykh zemel'. – LAPLAMBERN, Academic Publishing, 2016. – 378 s.

Criteria of Authorship

Mustafaev Zh.S. performed theoretical and experimental research, on the basis of which he conducted a generalization and wrote the manuscript.

The article was submitted to the editorial office 15.08.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504: 626.83:532.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-114-120

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО ВОДОВЫПУСКНОГО СООРУЖЕНИЯ В НЕЗАТОПЛЕННОМ РЕЖИМЕ

ГУРЬЕВ АЛИМ ПЕТРОВИЧ[✉], д-р техн. наук, профессор
alim_guryev@mail.ru

ХАНОВ НАРТМИР ВЛАДИМИРОВИЧ[✉], д-р техн. наук, профессор
nvkhanov@yahoo.com

ХАЕК БУШРА, аспирант
bushra.hayek@gmail.com

НОВИЧЕНКО АНТОН ИГОРЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент
novichenko@rgau-msha.ru

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

Водовыпускное сооружение является важной составной частью мелиоративной насосной станции. Разработана конструкция телескопического водовыпускного сооружения, в статье представлен анализ гидравлических условий работы в незатопленном режиме. Предложен водовыпуск нового типа с отличительной особенностью наличия телескопического механизма, позволяющего размещаться в водоприемном бассейне, в голове магистрального канала оросительной системы, состоящий из двух коробчатых конструкций, соединенных между собой с возможностью перемещения относительно друг друга, что позволяет осуществлять выпуск воды в канал в незатопленном режиме. Приводятся детальное описание предлагаемого конструктива и некоторые предварительные расчеты, подтверждающие его работоспособность и эффективность функционирования. Для выполнения реальных расчетов телескопического водовыпуска следует рассмотреть параметры затопленной вертикально восходящей струи, а также определить оптимальные параметры периметра телескопического водовыпуска.

Ключевые слова: телескопические водовыпускные сооружения, незатопленная струя, мелиоративная насосная станция, сифонные водовыпуски, напорные трубопроводы, вертикально восходящая струя

Формат цитирования: Гурьев А.П., Ханов Н.В., Хаек Бушра, Новиченко А.И. Гидравлическое обоснование работы телескопического водовыпускного сооружения в незатопленном режиме // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 114-120. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-114-120.

© Гурьев А.П., Ханов Н.В., Хаек Бушра, Новиченко А.И., 2022

Original article

HYDRAULIC SUBSTANTIATION OF THE TELESCOPIC OUTLET OPERATION IN NON-FLOODED MODE

GURYEV ALIM PETROVICH[✉], doctor of technical sciences professor
alim_guryev@mail.ru

KHANOV NARTMIR VLADIMIROVICH[✉], doctor of technical sciences professor
nvkhanov@yahoo.com

HAYEK BUSHRA, post graduate student
bushra.hayek@gmail.com

NOVICHENKO ANTON IGOREVICH, candidate of technical sciences, associate professor
novichenko@rgau-msha.ru

¹ Russian State Agrarian University – Moscow MAA named after C.A. Timiryazev, 127434, Moscow, Timiryazevskaya St., 49, Russia

The water outlet structure is an important component of a reclamation pumping station. The article develops the design of a telesgraphic water outlet structure and provides an analysis of hydraulic

operating conditions in non-flooded mode. The paper proposes a new type of water outlet with a distinctive feature of the presence of a telescopic mechanism that allows it to be placed in the water intake at the head of the main channel of the irrigation system and consists of two box structures connected to each other with the possibility of moving relative to each other, which allows the collection of carts in the non-flooded mode. The paper provides a detailed description of the proposed design and some preliminary, but confirming its operability and efficiency of functioning, are carried out. To perform real calculations of the telescopic water outlet, it is necessary to consider the parameters of the flooded vertically ascending jet, as well as to determine the optimal parameters of the perimeter of the telescopic water outlet.

Keywords: *telescopic water outlets, non-flooded jet, reclamation pumping station, siphon water outlets, pressure pipelines, vertically ascending jet*

Format of citation: *Guryev A.P., Khanov N.V., Hayek, Novichenko A.I. Hydraulic substantiation of the telescopic outlet operation in non-flooded mode // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 5. – P. 114-120. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-114-120.*

Введение. Насосные станции, подающие и пополняющие водный ресурс на гидро-мелиоративные объекты, могут иметь гигантские объемы расхода воды, являются весьма затратными и столь же необходимыми для решения задач сельского хозяйства по обеспечению продовольственного благополучия страны.

При проектировании мелиоративных систем с мощными напорными трубопроводами и насосными станциями особое внимание придается мероприятиям и конструктивным решениям по снижению гидравлических потерь на всех участках активных систем водоподачи, что дает существенный экономический эффект за счет снижения энергопотребления. Однако в ряде случаев возникают перебои с электропитанием приводов насосных станций, что приводит к существенным экономическим потерям воды из мелиоративной системы в силу обратного тока. Это является чрезвычайно опасным режимом работы гидроагрегата, что не только вызывает его ускоренный износ, но может послужить и причиной его полного разрушения.

В процессе разработки проектов насосных станций проблема решается применением соответствующих конструкторских и проектных задач увязки водовыпускных сооружений, имеющих сопряжения напорных водоводов с мелиоративными каналами, либо снабжением их соответствующими решениями.

Материалы и методы исследований.

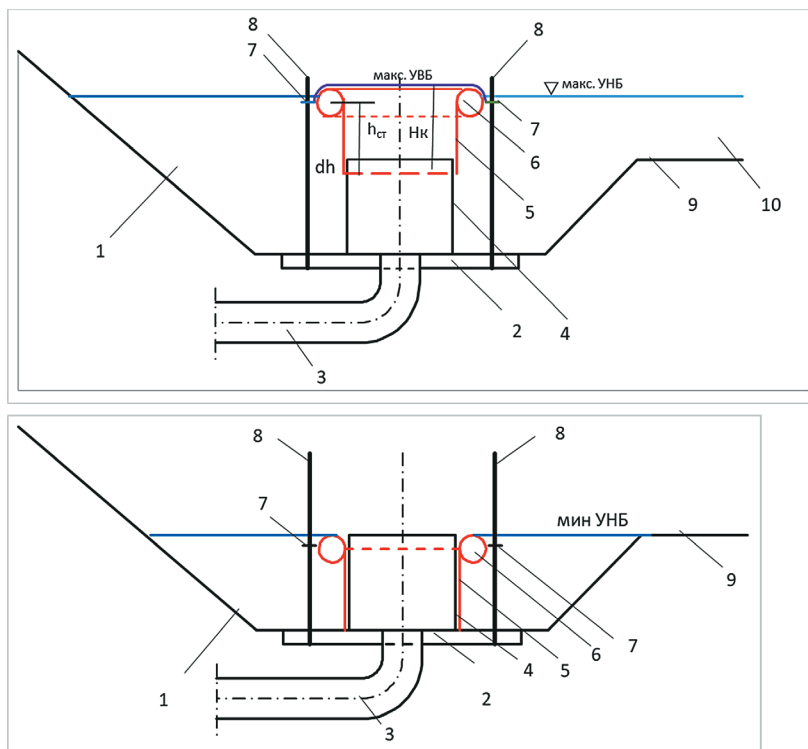
С целью оптимизации конструкции водовыпускного сооружения мелиоративной насосной станции на кафедре гидротехнических сооружений ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева разработана конструкция телескопического водовыпуска. Конструкция предлагаемого водовыпускного сооружения поясняется чертежом, представленным на рисунке 1.

Водовыпуск телескопического типа размещается в водоприемной камере, в голове

магистрального канала оросительной системы, и состоит из двух коробчатых конструкций, соединенных с возможностью телескопического перемещения относительно друг друга. На дне камеры устанавливается бетонная плита, служащая основанием водовыпуска. На плите жестко прикреплен короб. Второй короб с возможностью перемещения установлен по вертикали, вдоль направляющих элементов первого короба. Для этого к верхнему ребру подвижного короба по периметру прикреплены полые трубы (поплавочная система), выполненные из герметично соединенных между собой отрезков труб, подъемная сила которых уравнивает вес короба [1].

Вода в нижний короб поступает из концевой участка напорного трубопровода, выполненного вертикально и закрепленного в бетонном основании нижнего короба. Для предотвращения прижатия стенок подвижного короба к стенкам неподвижного короба (и тем самым – создания дополнительного сопротивления трения перемещению короба) по углам короба прикреплены петли, жестко закрепленные на коробе и свободно перемещающиеся по вертикально установленным направляющим штангам, жестко заделанные в основание.

Работает водовыпускное сооружение следующим образом. При неработающей насосной станции в приемном канале будет отсутствовать вода, а в водоприемной камере установится уровень воды, соответствующий отметке дна канала. При этом гребень поплавков не должен располагаться ниже этого уровня воды. При такой конструкции водовыпуска струя, выходящая из напорного трубопровода, является аналогом фонтанной струи [1], работающей в режиме затопления. Поскольку описание работы такой конструкции водовыпуска в литературе отсутствует, необходимо изучить физику явлений, происходящих при вытекании воды из напорного трубопровода в телескопический водовыпуск.



1а – продольный разрез по оси напорного трубопровода водовыпускного сооружения при максимальном уровне воды в канале

1a – a longitudinal section along the axis of the pressure pipeline of the water outlet at the maximum water level in the channel

1б – продольный разрез по оси напорного трубопровода водовыпускного сооружения при минимальном уровне воды в канале

1b – is a longitudinal section along the axis of the pressure pipeline of the water outlet structure with a minimum water level in the channel

Рис. 1. Конструкция телескопического водовыпускного сооружения:

- 1 – водоприёмная камера в голове магистрального канала;
 2 – бетонная плита – основание водовыпуска; 3 – напорный трубопровод;
 4 – жестко закреплённый короб; 5 – подвижной короб; 6 – полые трубы (поплавочная система);
 7 – петли, закреплённые на подвижном коробе 8 – направляющие штанги;
 9 – дно магистрального канала; 10 – наполнение канала при максимальном расходе

Fig. 1. Design of a telescopic water outlet structure:

- 1 – water intake chamber at the head of the main channel; 2 – concrete slab – a base of the outlet; 3 – pressure pipeline;
 4 – rigidly fixed box; 5 – movable box; 6 – hollow pipes (float system); 7 – hinges fixed on the movable box; 8 – guide rods;
 9 – bottom of the main channel; 10 – channel filling at the maximum flow rate

Гидравлический анализ работы телескопического водовыпускного сооружения мелиоративной насосной станции в незатопленном режиме. Водовыпускное сооружение мелиоративной насосной станции располагается на концевом участке тракте водоподачи, питающего оросительную систему. К настоящему времени в водовыпускных сооружениях оправдали себя в основном два типа конструкций, предотвращающих возвратный ток воды в напорном трубопроводе при аварийном отключении энергопитания электродвигателей насосных установок: сооружения с запорными устройствами механического действия и сифонные водовыпуски [2]. Эти сооружения должны обеспечить автоматическое предотвращение обратного течения тока воды из водоприемника по напорным трубопроводам при отключении насосных агрегатов, причем при проектировании потребность в обеспечении минимальных гидравлических потерь уходит на второй план. Но эти потери в водовыпусках клапанного типа весьма велики и со временем возрастают, особенно после многих лет эксплуатации.

Поэтому в последнее время получило широкое распространение применение водовыпусков сифонного типа, имеющих меньшие гидравлические потери, несмотря на то, что их сооружение требует больших материальных затрат [3, 1].

Рассмотрим расчеты параметры струи, выходящей из напорного трубопровода аналогично струе фонтана. Особенностью работы рассматриваемой струи водовыпуска сооружения является возможность ее формирования как свободной, затопленной или подтопленной струи, в зависимости от заполненности водой коробов водовыпускного сооружения.

Приведем расчетные зависимости некоторых авторов по определению высоты подъема струи фонтана, основанные на экспериментальных данных. Так, П.А. Спышновым для определения высоты H фонтана были рекомендованы две формулы [4]:

– Люгера для диаметров струи $d = 10 \dots 30$ мм

$$H = \frac{s_0}{1 + \varphi \cdot s_0}, \quad (1)$$

где
$$\varphi = \frac{0,25}{d + (0,1 \cdot d)^3} \quad (2)$$

– Фримана для диаметров струи d , м

$$H = \left(1 - 0,000113 \cdot \frac{s_o}{d}\right) \cdot s_o \quad (3)$$

Существует также ряд аналогичных формул для расчета высоты струи. Например, Кох и Карстаньен [5] приводят формулы:

– Мариотта [5], который еще в 1686 г. предложил экспериментальную формулу для расчета высоты H подъема струи:

$$H = \frac{s_o}{1 + 0,0103 \cdot s_o} \quad (4)$$

– Вейсбаха [5], в 1848 г. предложившего экспериментальную формулу для расчета высоты H подъема струи:

$$H = \frac{s_o}{1 + 0,01158 \cdot s_o + 0,000582 \cdot s_o^2} \quad \text{для } d = 1 \text{ см} \quad (5)$$

$$H = \frac{s_o}{1 + 0,00778 \cdot s_o + 0,0006038 \cdot s_o^2} \quad \text{для } d = 1,41 \text{ см} \quad (6)$$

– Д'Аубуиссона, упростившего формулу Мариотта [9]:

$$H = (1 - 0,01 \cdot s_o) \cdot s_o \quad (7)$$

По нашему мнению, в работе Коха и Карстаньена [5] расчет параметров вертикальных водометов рассмотрен наиболее подробно и физически обоснованно с теоретической стороны.

Согласно видениям Коха [5] вертикальный поток [1] можно представить как струю во внешней оболочке и как спадающий по периметру верхнего сечения ствола, скорость которого падает по мере удаления от выходного сечения сопла. Исходя из принципа неразрывности потока сечение струи при этом увеличивается [5]. В таблице приведены параметры вертикально восходящей струи с радиусом $r_o = 0,2$ м при скорости истечения $V_o = 18$ м/с [6].

По данным Коха [5], в зависимости от соотношения радиуса сопла струи r_o и скоростного напора $s_i = \frac{V_i^2}{2g}$ возможны три формы шапки струи, схематичное очертание которых приведено на рисунке 2.

Таблица

**Расчеты параметров ствола струи
с начальным радиусом $r_o = 0,2$ м при скорости $V_o = 18$ м/с**

Table

**Calculations of the parameters of the jet stem
with an initial radius of $r_o = 0.2$ m at a speed $V_o = 18$ m / s**

$v, \text{ м/с}$ $v, \text{ m / s}$	v/v_o	Скоростной напор в сечении на высоте y <i>Velocity head in cross-section at height y</i>	Высота подъема отдельной призмочки <i>Lifting height of a single prism</i>	Высота подъема отдельной струйки <i>Lifting height of a single stream</i>	Отношение высот подъема <i>Ratio of lifting heights</i>	Высота линии энергии <i>Energy line height</i>	Потери энергии <i>Energy loss</i>	Радиус поперечного сечения струи на высоте <i>Cross-sectional radius of the jet at height</i>	Тангенс угла наклона к оси касательной к внешней границе (оболочки) струи <i>Tangent of the angle of inclination to the axis tangent to the outer boundary (shell) of the jet</i>
$v, \text{ м/с}$	v/v_o	$S, \text{ м}$	$so - s, \text{ м}$	$y = \frac{2}{3} \times \left(s_o - \frac{v}{v_o} \cdot s\right)$	$\frac{y}{s_o - s}$	$y + s, \text{ м}$	$\Delta s_o = so - (y + s)$	r	$\text{tg} \varphi$
$v_o = 18$	1.0	$so = 16,51$	0	0	0,0	16,51	0	0,200	0,003
15	5/6	11,47	5,04	4,64	0,921	16,11	0,40	0,219	0,006
12	2/3	7,34	9,17	7,75	0,845	15,09	1,42	0,245	0,0125
9	1/2	4,13	12,38	9,63	0,778	13,76	2,57	0,283	0,0345
6	1/3	1,83	14,68	10,60	0,722	12,43	4,08	0,346	0,143
3	1/6	0,46	16,05	10,96	0,683	11,42	5,09	0,49	1,600
2	1/9	0,20	16,31	11,01	0,675	11,21	5,30	0,600	7,0
1	1/8	0,05	16,46	11,01	0,669	11,06	5,45	0,848	76,1
0	0	0	16,51	11,01	0,667	11,01	5,46	∞	∞

Как следует из рисунка 2, когда вода выходит с малой скоростью из сопла при соотношении $s_o \leq r_o$ [6], непосредственно над его

выходным сечением образуется грибоподобная шапка. А когда напор воды увеличивается при соотношении $s_o > r_o$, образуются ствол

струи и грибообразная шапка. При очень больших напорах и при высоте ствола струи, многократно превосходящих радиус сопла при соотношении $s \gg r$, формирование струи происходит с захватом струей воздуха

и распадом сплошности поверхности ствола струи, в результате чего шапка струи напоминает сноп. Однако каких-либо конкретных границ формообразования шапки струи Кох не показал.

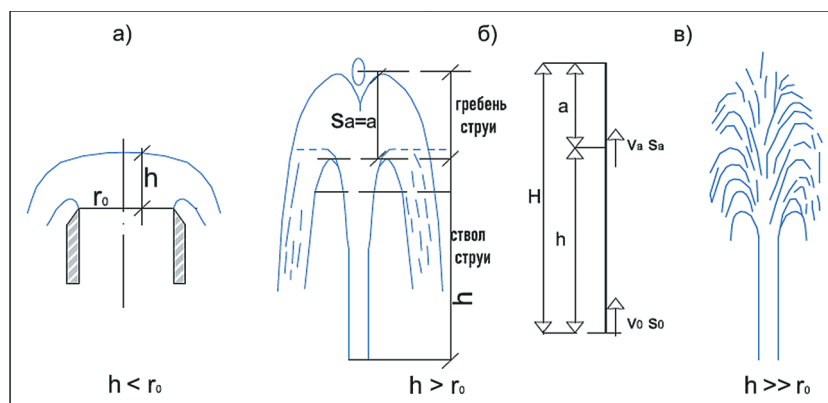


Рис. 2. Формы струи в зависимости от величины начального напора [6]

Fig. 2. Jet shapes depending on the initial head value [6]

Представляет интерес формирование струи по типу «а» и «б» (рис. 2).

По мере подъема струи [5] вертикальная скорость начинает уменьшаться, а в ее поперечных сечениях диаметр струи увеличивается в силу закона неразрывности потока. При этом наступает момент, когда силы инерции подъема струи уменьшаются настолько, что уже не могут противостоять силам тяжести, и растекающаяся струя начинает возвратное движение вниз, образуя шапку над восходящим участком струи.

Если же рассматривать оболочку струи как упругую поверхность, то сечение возврата

ее движения можно условно рассматривать как ребро кольцевого водослива с острой кромкой. Воспользовавшись относительными координатами верхней и нижней поверхности струи [2], построили границы струи как потока на водосливе с острой кромкой. На рисунке 3 приведена схема очертания фонтанной струи по Коху [5] при $s_0 > r_0$ для примера, приведенного в таблице 1.

На рисунке 3а показан профиль струи по расчетам Коха, а на рисунке 3б – профиль струи, подсчитанной по координатам Базена, как струи, переливающейся через кольцевой водослив с острой кромкой.

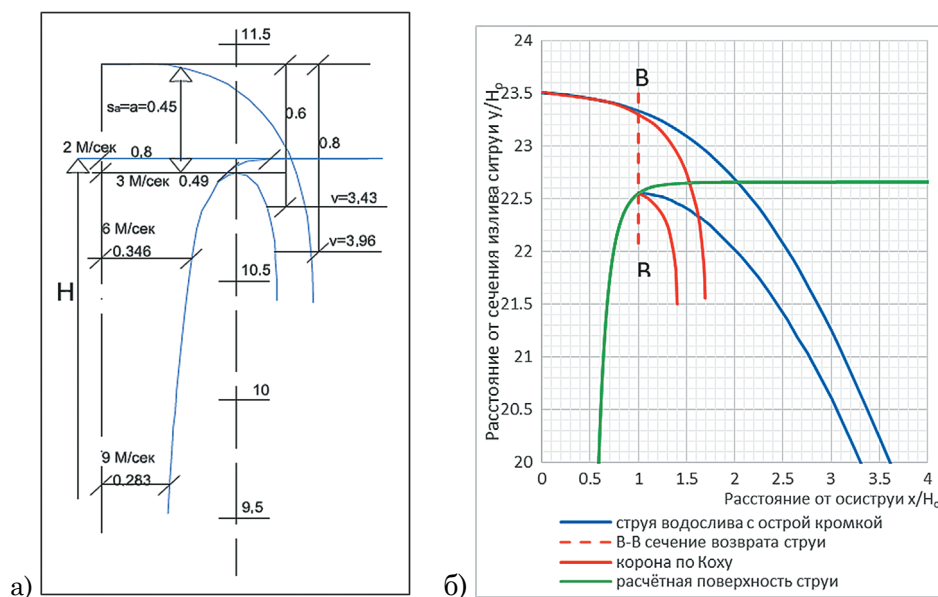


Рис. 3. Формирование шапки на вершине вертикальной струи:

а – по Коху [6]; б – с учетом истечения воды из шапки, как через кольцевой водослив

Fig. 3. Formation of the cap at the top of the vertical jet:

a – according to Koch [6]; b – taking into account the outflow of water from the cap as through the annular spillway

Как следует из рисунка 3б, очертания струй по Коху и как водосливной струи вне ее границ резко различаются. Из литературы, посвященной вопросам расчета параметров струи [4, 7-11], не удалось обнаружить материалы, посвященные формированию шапки вертикально восходящей струи. Принимая за основу расчет параметров по Коху, изложенный выше, логически можно предположить, что высота подъема струи над сечением возврата струи (величина $s_a = a$ согласно рисунку 3а) должна равняться напору H_o над сечением возврата струи. Высота y подъема шапки струи над сечением определяется величиной скоростного напора $s_y = \frac{V_y^2}{2g} = a$. Координата шапки по оси струи определится как $y_o = y + a$. С другой стороны, если принимать $a = H_o$ напору, необходимому для пропуска через кольцевой водослив радиусом r , из уравнения расхода получается, что

$$Q = m \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H^3} = Q = 2 \cdot \pi \cdot m \cdot r \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H^3}. \quad (8)$$

Определив из (8) величину напора H , можем построить линию $y + H = f(r)$. С другой стороны, гребень шапки струи определяется как $y + a = F(r)$. Таким образом, точка пересечения этих линий даст положение сечения возврата струи, радиус этого сечения и высоту подъема струи.

На рисунке 4 представлены результаты расчета параметров струй с $r_o = 0,6$ м для варианта $a > H_o$ при $V_o = 4,5$ м/с, для варианта $a = H_o$ при $V_o = 3,745$ м/с и для варианта с $V_o = 3,0$ м/с, [6], при котором $a < H_o$.

В результате с уменьшением начальной скорости струи V_o уменьшается величина скоростного напора s_o . Таким образом, резко уменьшается начальная скорость, и тем более скоростной напор s_h уменьшается в сечении на высоте h выходного сечения сопла.

Затем наступает момент, когда скоростного напора s_h не хватает для формирования

напора H_o , необходимого для истечения расхода Q через периметр поперечного сечения с радиусом r_h , на высоте h возврата струи.

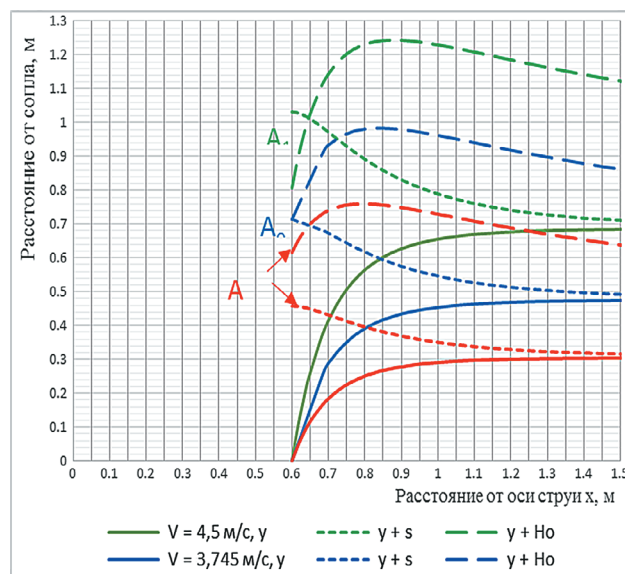


Рис. 4. Результаты расчета параметров струи с $r_o = 0,6$ м

Fig. 4. Results of calculation of jet parameters with $r_o = 0.6$ m

Выводы

1. Предложенная к рассмотрению конструкция телескопического водовыпуска обладает простотой обратного клапана, надежностью и минимальными потерями сифонного водовыпуска.
2. Для выполнения реальных расчетов телескопического водовыпуска следует рассмотреть параметры затопленной, вертикально восходящей струи.
3. Необходимо определить оптимальные параметры периметра телескопического водовыпуска.
4. Необходимо определить параметры шапки водовыпуска при минимальной скорости потока в трубопроводе.

References

1. Gurjev A.P., Khanov N.V., Hayek B. Teoreticheskie raschyoty parametrov strui teleskopicheskogo vodovypuska meliorativnoj nasosnoj stantsii / Sb. nauchn. Tr. T. 1. – M.: RGAU-MSHA im. K.A. Timiryazeva, 2021. – 383-362.
2. Kiselev P.G. Spravochnik po gidravlicheskim raschetam. – M.: Energiya, 1972. – 312 s.
3. Elektronnyj resurs <https://fontan.city/>
4. Spyshnov P.A. Fontany: Opisanie, konstruksii, raschet. – M.: Gos. izd-vo arhitektury i gradostroitelstva, 1950. – 174 s.
5. Kox A., Karstanjen M. Osnovy prakticheskoy gidrodinamiki. – M.: L.: 1933. – 195 s.
6. Spravochnik po podboru chugunnyh trub s sharovidnym grafitom firmy «Pont-a-Muson». Franse. 1993.

7. Хаек Б.А. Теоретическое обоснование оптимальных параметров водовыпускного сооружения мелиоративных насосных станций / Сб. науч. тр. т. 2. – М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. – С. 385-362.

8. Теодоронский В.С., Сабо Е.Д., Золотаревский А.А. Гидротехнические мелиорации. Учебник для вузов, 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2021. – 317 с.

9. Шошин В.И., Прутской А.В. Гидротехнические мелиорации: методические указания к выполнению практических занятий. – Брянск: БГИТА, 2011. – 26 с.

10. Электронный ресурс <https://studme.org> › география › raschet_struy. Гидротехнические мелиорации. Расчет струй.

11. Справочник. Мелиорация и водное хозяйство. Т. 4. Сооружения: / Под ред. П.А. Полад-заде. – М.: Агропромиздат, 1987. – 464 с.

Критерии авторства

Гурьев А.П., Ханов Н.В., Хаек Бушра, Новиченко А.И. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Гурьев А.П., Ханов Н.В., Хаек Бушра, Новиченко А.И. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 26.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

7. Xayek B.A. Teoreticheskoe obosnovanie optimalnyh parametrov vodovy-puskного соорuzheniya meliorativnyh nasosnyh stantsij / Sb. nauchn. Tr. T. 2. – M.: RGAU-MSHA im. K.A. Timiryazeva, 2020. – S. 385-362.

8. Teodoronskij V.S., Sabo E.D., Zolotarevskij A.A. Gidrotehnicheskie melioratsii. Uchebnik dlya vuzov, 2-e izd., ispr. i dop. – M.: Yurajt, 2021. – 317 s.

9. Shoshin V.I., Prutskoj A.V. Gidrotehnicheskie melioratsii: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu prakticheskikh zanyatij. – Bryansk: BGITA, 2011. – 26 s.

10. Elektronnyj resurs <https://studme.org> › geografiya › raschet_struy. Gidrotehnicheskie melioratsii. Raschet struj.

11. Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo. T. 4. Sooruzheniya: spravochnik. / Pod red. P.A. Polad-zade. – M.: Agropromizdat, 1987. – 464 s.

Criteria of Authorship

Guryev A.P., Khanov N.V., Hayek Bushra, Novichenko A.I. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Guryev A.P., Khanov N.V., Hayek Bushra, Novichenko A.I. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 26.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

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

Оригинальная статья

УДК 502/504:630*581.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-121-131

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

ХЛЮСТОВ ВИТАЛИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ¹✉, д-р с.-х. наук, профессор
vitakhlustov@mail.ru

ВАСЕНЁВ ИВАН ИВАНОВИЧ¹, д-р биол. наук, профессор, заведующий кафедрой экологии
vasenev@rgau-msha.ru

ГАНИХИН АЛЕКСАНДР МАКСИМОВИЧ², аспирант, инженер 1 категории
ganikhin.timacad@mail.ru

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

² ФГБУ «Рослесинфорг Центрлеспроект»; 141280, Московская обл, г. Ивантеевка, Заводская ул., 10, Россия

Работа посвящена изучению взаимосвязей продуктивности сосновых древостоев с климатическими факторами регионов Центрального федерального округа РФ. Одним из наиболее эффективных инструментов выявления закономерностей естественного формирования растительных сообществ является множественный регрессионный анализ, благодаря которому появилась возможность получить сложные модели, сочетающие количественные взаимосвязи и закодированные качественные (именные) характеристики бинарными переменными, учитывающими региональные особенности формирования насаждений и их продуктивность. Предпринята попытка обосновать дифференциацию запаса полных и чистых по составу сосновых древостоев ЦФО под влиянием климатических показателей, характеризующих атмосферное увлажнение и температурный режим субъектов РФ при зафиксированных средних высотах древостоев с 5-метровой градацией 15, 20, 25 и 30 м. Обоснование наличия закономерных изменений запаса от климатических показателей подтверждено строгими статистическими суждениями в отношении достоверности коэффициента детерминации (R^2). Во всех случаях расчетное значение F-критерия Фишера превысило значение аналогичного критерия на 1-процентном уровне значимости при соответствующем числе степеней свободы, что указывает на вероятность возникновения ошибки всего в 1% случаев. Полученные регрессии являются достоверными и позволяют оценить потенциальную продуктивность древостоев, которая во многом определяется почвенно-климатическими условиями, на что указывали В.В. Докучаев, Г.Ф. Морозов, Г.Н. Высоцкий, В.Н. Сукачёв, А.И. Уткин и др. Включение в модель показателей сомкнутости лесного полога с учетом природного зонирования позволяет перейти от оценки потенциальной продуктивности древостоев к фактической. Сочетание в моделях нормативов потенциально возможной продуктивности древостоев и климатических показателей, характеризующих атмосферное увлажнение и температурный режим, позволяет глубже познать процесс формирования продуктивности лесов для построения экологически обоснованной системы управления древесными ресурсами Центрального федерального округа РФ.

Ключевые слова: моделирование, климатические показатели, продуктивность древостоев, достоверность взаимосвязей

Формат цитирования: Хлюстов В.К., Васенёв В.В., Ганихин А.М. Влияние климатических показателей на продуктивность сосновых древостоев // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 121-131. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-121-131.

© Хлюстов В.К., Васенёв В.В., Ганихин А.М., 2022

THE IMPACT OF CLIMATIC INDICATORS ON THE PRODUCTIVITY OF PINE STANDS

KHLYUSTOV VITALIJ KONSTANTINOVICH¹✉, *doctor of agricultural sciences, professor*
vitakhlustov@mail.ru

VASENEV IVAN IVANOVICH¹, *doctor of biological sciences, professor, head of the department of ecology*
vasenev@rgau-msha.ru

GANIKHIN ALEXANDR MAXIMOVICH², *post graduate student, engineer of 1st category*
ganikhin.timacad@mail.ru

¹ Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev, 127434, Moscow, Timiryazevskaya St., 49, Russia

² FSBU «Roslesinform» «Tsentrlesproekt»: 141280, Moscow region., Ivanteevka g., Zavodskaya st., 10, Russia

The work is devoted to the study of the interrelationships of the productivity of pine stands with climatic factors of the regions of the Central Federal District of the Russian Federation. One of the most effective tools for identifying patterns of natural formation of plant communities is multiple regression analysis, thanks to which it became possible to obtain complex models combining quantitative relationships and encoded qualitative (nominal) characteristics with binary variables that take into account regional features of the formation of plantings and their productivity. An attempt is made to substantiate the differentiation of the stock of complete and pure pine stands of the Central Federal District under the influence of climatic indicators characterizing atmospheric humidification and temperature regime of the subjects of the Russian Federation at fixed average heights of stands with a five-meter gradation of 15, 20, 25 and 30 m. The rationale for the presence of regular changes in the stock from climatic indicators is confirmed by strict statistical judgments regarding the reliability of the determination coefficient (R^2). In all cases, the calculated value of Fischer's F-test exceeded the value of a similar criterion by a 1 percent significance level with the corresponding number of degrees of freedom, which indicates the probability of an error in only one percent of cases. The regressions obtained are reliable and allow us to assess the potential productivity of stands, which is largely determined by soil and climatic conditions, as indicated by V.V. Dokuchaev, G.N. Morozov, G.N. Vysotsky, V.N. Sukachev, A.I. Utkin, etc. The inclusion of indicators of the closeness of the forest canopy in the model, taking into account natural zoning, allows us to move from assessing the potential productivity of stands to the actual one. The combination in the models of standards of potentially possible productivity of stands and climatic indicators characterizing atmospheric humidification and temperature regime makes it possible to gain a deeper understanding of the process of formation of forest productivity in order to build an environmentally sound system for managing wood resources of the Central Federal District of the Russian Federation.

Keywords: *productivity of stands, climatic indicators, taxation standards, modeling, statistical reliability of relationships*

Format of citation: *Khlyustov V.K., Vasenev I.I., Ganikhin A.M. The impact of climatic indicators on the productivity of pine stands // Prirodobustroystvo. – 2022. – № 5. – P. 121-131. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-121-131.*

Введение. Академик ВАСХНИИЛ Г.Н. Высоцкий для целостного представления о лесе как о явлении географическом, тесно взаимосвязанном с факторами окружающей среды, предложил ландшафтно-географическую схему влияния климатических и почвенно-грунтовых условий на породную и пространственную структуру лесов в разрезе природных зон Европейской части России.

Обширность лесных территорий, их зональное и провинциальное деление предопределяют различия в почвообразовательном и лесообразовательном процессах. Необходимость внедрения в 1970-1980-е гг. новых систем ведения

лесного хозяйства потребовала от научного сообщества усовершенствования региональных нормативов для таксации лесов и разработки правил, наставлений и рекомендаций по ведению лесного хозяйства. Так, для оценки потенциальной продуктивности насаждений были разработаны и повсеместно внедрены взаимосвязанные региональные таблицы стандартных запасов и таблицы хода роста сомкнутых древостоев для основных лесообразующих пород [2].

На современном этапе развития и цифровой трансформации лесной отрасли приоритетным научным направлением для сплошной инвентаризации лесов является разработка

информационно-справочных систем таксационных нормативов (ИССЛТН) комплексной оценки древесных ресурсов [3].

Распространение растительности по земной поверхности обусловлено количеством солнечной радиации, поступающей на единицу площади, что определяет почвообразовательный процесс и характер территориального распределения экологически устойчивой растительности. При этом древесные растения основного яруса насаждений накапливают информацию о влиянии климатических показателей на их продуктивность в виде годичных слоев. Изучением влияния климатических факторов на продуктивность лесов занимается дендроклиматохронология [4-8].

Следует отметить, что изучение продуктивности древостоев методами дендрохронологии не следует считать удачным, так как ширина годичных слоев является усредненной, линейной и относительной величиной, не связанной с продуктивностью древостоя, выраженной через сумму объема стволовой древесины (запас) на единице площади ($\text{м}^3/\text{га}$).

Обозначенные ООН экологические проблемы, связанные с изменением климата, а также с влиянием на него лесных экосистем, изложены в многочисленных публикациях. В них также указано влияние глобального потепления на распространение и формирование растительности [9-14].

Среди климатических факторов, оказывающих наибольшее влияние на лесные экосистемы, следует отметить увлажнение и температурный режим территорий. Эти факторы могут воздействовать не только на продуктивность, но и на вероятность возникновения пожаров и их интенсивность [15, 16]. Особый интерес представляют публикации, содержащие информацию о моделировании распространения лесных пожаров [17].

Общеизвестно влияние на продуктивность растительных сообществ процесса фотосинтеза, интенсивность которого тесно связана с климатическими показателями. Вместе с тем следует указать на то, что климат регионов во многом предопределяет пространственную структуру лесов, что наглядно просматривается по природным зонам в меридианном направлении и что проявляется прежде всего через снижение сомкнутости полога древостоев, через формирование явно выраженной парцеллярной структуры насаждений в результате ухудшения их фитосанитарного состояния. Поэтому особый научный интерес представляет строгое статистическое суждение с критерияльным доказательством наличия взаимосвязи стандартного запаса со средними многолетними показателями климата при разных значениях средней высоты древостоев.

Цель исследований заключается в выявлении закономерностей и статистически строгом доказательстве взаимосвязей продуктивности основных древостоев с климатическими показателями, характеризующими атмосферное увлажнение и температурный режим регионов в условиях Центрального федерального округа РФ.

Задачи исследования:

1. Получить единую, регионально ориентированную модель взаимосвязи запаса сомкнутых основных насаждений со средней высотой древостоев ЦФО.

2. Дать статистическую оценку взаимосвязей стандартного запаса древостоев с испаряемостью, суммой активных температур, годовым показателем увлажнения (M_d), показателем континентальности климата по Н.Н. Иванову (ПКК).

Материалы и методы исследований. Методической основой определения запаса древостоев на пробных площадях является проведение сплошного перечета деревьев и использование таблиц объемов (сортиментных таблиц) по разрядам высот для расчета запаса по ступеням толщины и запаса древостоя в целом.

Для определения запаса при массовой таксации используются стандартные таблицы запасов, которые функционально связаны с таблицами хода роста нормальных древостоев. Эта связь предусматривает совпадение в указанных нормативах запасов при одинаковой средней высоте. Общепринятым с методической точки зрения является условие того, что табличные значения запасов должны соответствовать потенциально возможной продуктивности максимально сомкнутых древостоев.

Для решения первой задачи использованы стандартные таблицы по 17 регионам ЦФО, а также методические указания, которые предполагают включение в модели фиктивных бинарных переменных, кодирующих названия субъектов РФ [3].

Для решения второй задачи использованы методические основы парного регрессионного анализа зависимости стандартного запаса от испаряемости, суммы активных температур, годового показателя увлажнения (M_d), показателя континентальности климата по Н.Н. Иванову (ПКК). При этом влияние климатических факторов на продуктивность древостоев доказывалось статистическими критериями параметров уравнений регрессии на 1-процентном уровне значимости при соответствующем числе степеней свободы, что позволяет сделать строгое статистическое суждение и подтвердить вероятность возникновения ошибки всего лишь в 1% случаев [1].

Результаты и их обсуждение. Общеизвестно, что существенная географическая отдаленность насаждений от экологических оптимумов их произрастания отражается на интенсивности транспирации и фотосинтеза, которые напрямую связаны с экологической устойчивостью насаждений и их фитосанитарным состоянием.

Динамика продуктивности насаждений и сукцессионных процессов под влиянием климатических факторов носит в основном описательный характер. Однако в настоящее время этого недостаточно, так как требуется решение вопросов, связанных с моделированием продуктивности древостоев по регионам страны.

При наличии моделей запаса по регионам и конверсионных коэффициентов представляется возможным определить массу накопленного углерода в древостоях по фракциям фитомассы (стволов, коры, ветвей, корней, хвои и листвы). Решение поставленной задачи сводится к следующему.

Центральный федеральный округ представлен 17 субъектами РФ. Для них органами управления лесным хозяйством утверждены 17 стандартных таблиц запасов, которые включены в лесоустроительную инструкцию и макеты для проведения массовой таксации лесов при лесоустройстве. Поэтому указанные

нормативы положены в основу получения сводной модели стандартных запасов округа. Для этого субъекты РФ были закодированы бинарными переменными в соответствии с методическими указаниями [18] (табл. 1).

В результате анализа получена регрессионная модель стандартных запасов вида:

$$I = \exp((1,34852 + 1,83468 \ln H - 0,12268 \ln^2 H + \ln H(-0,22177X_1 - 0,21855X_2 + 0,0X_3 - 0,16308X_4 - 0,22177X_5 - 0,10344X_6 + 0,0X_7 + 0,0X_8 - 0,04488X_9 - 0,22177X_{10} - 0,10151X_{11} - 0,22177X_{12} + 0,0X_{13} - 0,13604X_{14} - 0,21855X_{15} - 0,18919X_{16}) + \ln^2 H(0,08595X_1 + 0,08552X_2 + 0,0X_3 + 0,06285X_4 + 0,08595X_5 + 0,03851X_6 + 0,0X_7 + 0,0X_8 + 0,01892X_9 + 0,08595X_{10} + 0,04005X_{11} + 0,08595X_{12} + 0,0X_{13} + 0,05020X_{14} + 0,08552X_{15} + 0,07326X_{16}))$$

$$t = |9,2; 17,1; 6,1; 5,7; 5,6; 4,05; 7; 2,7; 1,2; 5,7; 2,6; 5,7; 3,5; 5,6; 4,9; 6,8; 3,0; 1,5; 6,8; 3,1; 6,8; 3,9; 6,7; 5,8| > t_{0,5} = 1,96;$$

$$R^2 = 0,999; E = \pm 2,1\%;$$

$$F = 1399,9 \text{ при } P < 0,05.$$

Таблица 1

Кодирование бинарными переменными стандартных значений запаса по субъектам ЦФО

Table 1

Encoding of standard stock values by regions of the Central Federal District with binary variables

Область Region	Блочные фиктивные переменные / Block dummy variables															
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
Белгородская / Belgorod	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Брянская / Bryansk	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Владимирская / Vladimir	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Воронежская / Voronezh	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ивановская / Ivanovo	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Калужская / Kaluga	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Костромская / Kostroma	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Курская / Kursk	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Липецкая / Lipetsk	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Московская / Moscow	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Орловская / Orel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Рязанская / Ryazan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Смоленская / Smolensk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Тамбовская / Tambov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Тверская / Tver	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Тульская / Tula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ярославская / Yaroslavl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Модель характеризуется высокими значениями коэффициента детерминации ($R^2 = 0,999$), значимостью численных коэффициентов уравнения ($t > t_{0,5}$) и достоверностью модели по F-критерию

Фишера при $P < 0,05$, незначительной стандартной ошибкой уравнения ($E = \pm 2,1\%$).

Для таких областей, как Курская, Липецкая, Воронежская и Тамбовская, стандартные

таблицы запасов являются идентичными, что подтверждается расчетными значениями коэффициентов уравнения с нулевыми значениями. Визуализация модели представлена на рисунке 1. Анализ рисунка позволяет сделать вывод о значительных расхождениях в запасах по субъектам РФ, попадающим в две природно-климатической зоны округа. Это подтверждено

обозначением красными линиями и стрелками между максимальным и минимальным значениями запасов при фиксированной высоте, равной 30 м. Разница составляет 200 м³/га.

Разработанную модель следует рассматривать прежде всего как организационно-внедренческую при решении вопросов, связанных с цифровизацией лесоустроительных работ в ЦФО.

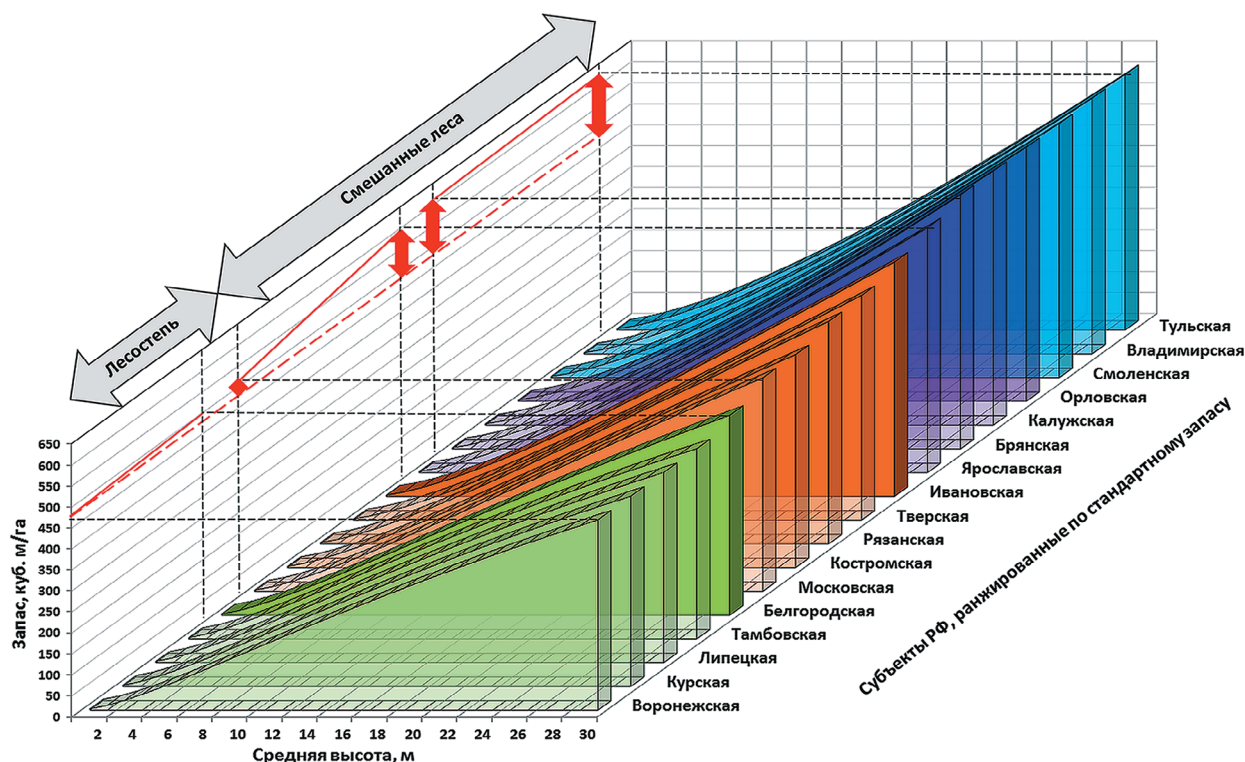


Рис. 1. Графическая интерпретация модели стандартных запасов
сосновых древостоев по субъектам РФ ЦФО

Fig. 1. Graphical interpretation of the model of standard reserves of pine stands by regions
of the Central Federal District of the Russian Federation

При решении поставленных задач о влиянии климата на лесные сообщества необходимо учитывать следующее. Запас древостоев является величиной физической, определяемой показателями их морфометрии. Общеизвестной формулой расчета запаса древостоев, чистых по составу, является формула (1):

$$M = GHF, \quad (1)$$

где G – сумма площадей сечений древостоя, м²; H – средняя высота древостоя, м; F – видовое число.

Показатель, характеризующий сумму площадей сечений (G) древостоя, может иметь одинаковое значение при разных значениях числа деревьев (N) и среднего диаметра древостоя (D) на оцениваемом участке, что указывает на функциональную связь между этими показателями вида:

$$G = \exp(-9,45241 + 2,0 \ln D + 1,0 \ln N); \quad (2)$$

$$R^2 = 1,0.$$

Изложенное подтверждает необходимость проведения инвентаризации лесов с применением

научно обоснованных и регионально утвержденных нормативов, среди которых стандартные таблицы являются основными для достоверного определения запаса древостоев. Однако с научной точки зрения следует обосновать достоверность различий в стандартных запасах не с позиций названия субъектов РФ, а в зависимости от физических факторов, оказывающих влияние на продуктивность древостоев. По этой причине была сформулирована задача проведения статистического анализа влияния на запас таких климатических показателей, как испаряемость, сумма активных температур, годовой показатель увлажнения, коэффициент континентальности климата по Н.Н. Иванову. Краткая характеристика указанных показателей приведена ниже.

Испаряемость характеризуется суммой испарившейся влаги с постоянно увлажненной поверхности в заданную единицу времени. Единицей измерения испаряемости является миллиметр испарившейся воды. Величина

испаряемости напрямую зависит от температуры воздуха, которая является динамичной в течение как суток, так и календарного года. Наибольшими значениями испаряемости характеризуются южные регионы, в то время как наименьшие значения характерны для полярных регионов.

Сумма активных температур характеризуется количеством тепла и выражается через сумму среднесуточных температур воздуха, когда температура превышает порог, необходимый для начала вегетации растений (для большей части растений порог соответствует 10°C).

Годовой показатель увлажнения (Md) отображает степень увлажнения за вегетационный период и рассчитывается по формуле:

$$Md = 1g(20I/D),$$

где I и D – годовые суммы осадков и дефицита влажности воздуха.

При оценке степени увлажнения по данному показателю пользуются следующей шкалой: 0,60 – избыточное; 0,60-0,45 – хорошее; 0,60-0,50 – более влажное; 0,50-0,45 – менее влажное; 0,45-0,25 – умеренно влажное; 0,45-0,35 – полувлажное; 0,35-0,25 – полусухое.

Коэффициент континентальности климата по Н.Н. Иванову рассчитывается по авторской формуле:

$$K = A \cdot 100 / 0,33 M,$$

где A – годовая амплитуда температуры из среднемесячных ее величин; M – широта местности.

При оценке степени континентальности по данному показателю пользуются следующей шкалой: для океанических областей значением является $K < 100\%$; для слабоумеренных и среднеконтинентальных – $100\% > K < 250\%$; для резкоконтинентальных – $K > 250\%$.

Данные о средних многолетних показателях климата, рассмотренные выше, приводятся в справочниках по агроклимату и в специальной литературе [19, 20]. Широкое применение климатические показатели нашли при зонировании территорий в целях развития сельскохозяйственного производства.

Следует отметить, что указанные переменные (выделенные полужирным шрифтом) тесно связаны между собой и с другими климатическими показателями (табл. 2).

Таблица 2
Корреляционная матрица климатических показателей 17 субъектов РФ ЦФО

Table 2
Correlation matrix of climatic indicators of 17 regions of the Central Federal District of the Russian Federation

Климатические показатели <i>Climatic indicators</i>	САМТВ	ВСП	ГПУ	ИСП	ГСО	ПКК	СТ > 10°C	АМТВ	БП	ОП t > 10°C	ТП t > 0°C
САМТВ	1										
ВСП	0,183	1									
ГПУ	0,059	0,592	1								
ИСП	-0,064	-0,769	-0,915	1							
ГСО	0,053	0,157	0,807	-0,510	1						
ПКК	-0,077	-0,377	-0,911	0,709	-0,941	1					
СТ > 10°C	-0,003	-0,650	-0,884	0,824	-0,707	0,815	1				
АМТВ	0,068	0,857	0,654	-0,788	0,304	-0,500	-0,693	1			
БП	-0,166	-0,885	-0,683	0,791	-0,351	0,511	0,755	-0,922	1		
ОП t > 10°C	-0,153	-0,839	-0,826	0,871	-0,541	0,706	0,867	-0,875	0,926	1	
ТП t > 0°C	-0,102	-0,838	-0,689	0,804	-0,328	0,525	0,769	-0,849	0,877	0,902	1

Обозначения / Designations:

САМТВ – средний из абсолютных минимумов температуры воздуха / *average of absolute minimal air temperatures*;

ВСП – высота снежного покрова (средняя из максимальных) (см) / *height of snow cover (average of maximal) (cm)*;

ГПУ – **годовой показатель увлажнения (Md)** / *annual indicator of moistening (Md)*

ИСП – **испаряемость за год (f)** / *evaporation per year (f)*;

ГСО – годовая сумма осадков (мм) (p) / *annual amount of precipitation (mm) (p)*;

ПКК – **показатель континентальности климата, по Н.Н. Иванову** / *indicator of continentality of climate, according to N.N. Ivanov*;

СТ > 10°C – **сумма температур за период с температурой выше 10 градусов** / *amount of temperatures for the period with the temperature higher 10 degrees*;

АМТВ – абсолютный минимум температуры воздуха / *absolute minimum of air temperature*;

БП – безморозный период / *frost-free period*

ОП t > 10°C – основной период (дни) с температурой выше 10 градусов / *main period (days) with the temperature higher 10 degrees*;

ТП t > 0°C – теплый период (дни) с температурой выше 0 градусов / *warm period (days) with the temperature higher 0 degrees*.

Для решения второй задачи проведен регрессионный анализ зависимости запаса от перечисленных климатических показателей для средних высот древостоев 15, 20, 25, 30 м. Размах варьирования запасов при указанных значениях существенно различался. Так, при средней высоте 15 м размах составил $10 \text{ м}^3/\text{га}$, при средней высоте в 20 м – $50 \text{ м}^3/\text{га}$, при средней высоте в 25 м – $80 \text{ м}^3/\text{га}$, при средней высоте в 30 м – $120 \text{ м}^3/\text{га}$.

Полученные регрессии оценены строгим суждением и характеризуются достоверными коэффициентами детерминации. Во всех случаях расчетные значения F-критерия Фишера превышали теоретические на 1-процентном уровне значимости при числе степеней свободы, равном $16 (f = 17 - 1 = 16)$.

Взаимосвязь запаса с испаряемостью продемонстрирована на рисунке 2. Анализ

изменения запасов по высотам позволяет сделать вывод о том, что взаимосвязь является обратной и указывает на снижение продуктивности древостоев при увеличении испаряемости. Вариация испаряемости по субъектам ЦФО составляет от 360 до 627 мм/год . Полученные регрессии описывают от 35,3 до 58,2% дисперсии результивного признака (запаса древостоев на 1 га) при фиксированных значениях средних высот древостоев, что подтверждается коэффициентами детерминации (R^2). Расчетные значения F-критерия Фишера для уравнений составили от 9,5 до 20,9. Это превысило табличное ($F_{01} = 8,7$) на 1-процентном уровне значимости, что позволяет сделать вывод о наличии достоверной взаимосвязи запаса древостоев с испаряемостью в диапазоне двух природно-климатических зон округа: лесостепной и смешанных лесов.

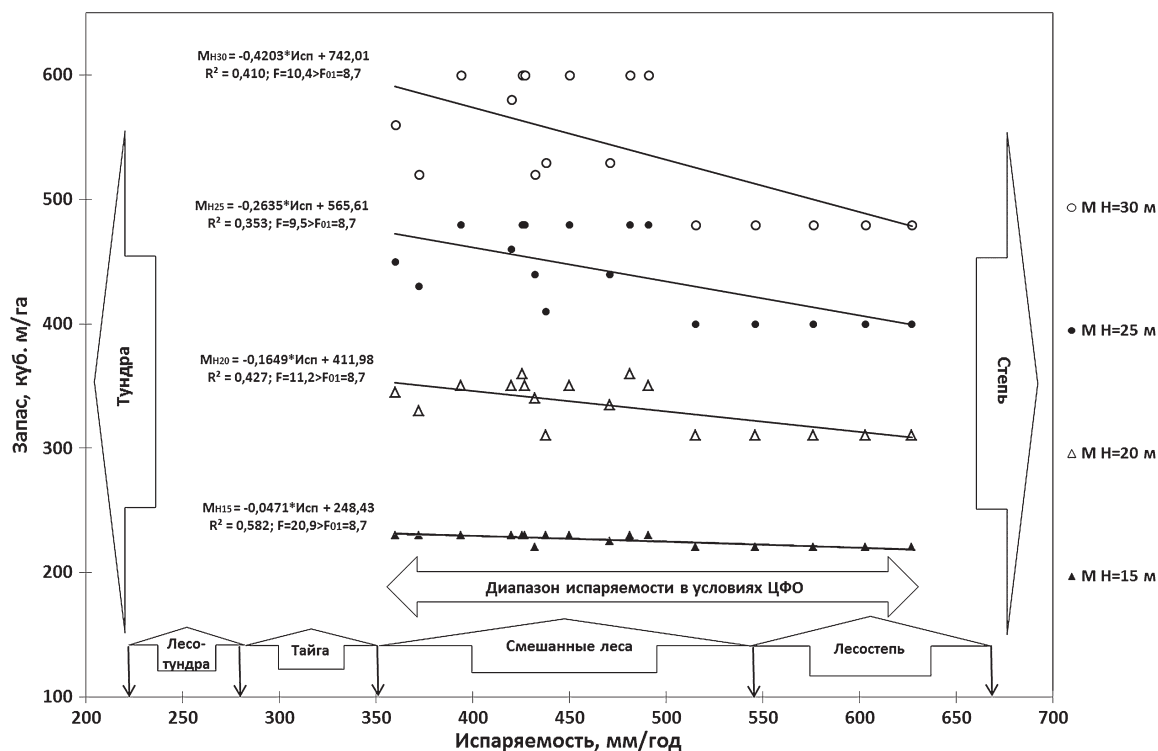


Рис. 2. Взаимосвязи стандартного запаса древостоев с испаряемостью при фиксированных значениях средней высоты древостоев

Fig. 2. Relationships of the standard stock of tree stands with evaporation at fixed values of the average height of the stands

Взаимосвязь запаса с величиной годового показателя увлажнения приведена на рисунке 3. Размах годового показателя увлажнения по субъектам округа составляет от 0,32 до 0,60. Полученные регрессии описывают от 41,9 до 54,2% дисперсии запаса, что подтверждается коэффициентами детерминации (R^2). Расчетные значения F-критерия Фишера ($F_{\text{расч}} = \text{от } 10,8 \text{ до } 17,9$) оказались больше теоретического значения на 1-процентном

уровне значимости ($F_{01} = 8,7$). Сравнение критериев позволяет сделать вывод о наличии взаимосвязи запаса с годовым показателем увлажнения в диапазоне, охватывающем с юга часть полусухой, полувлажной, влажной зон и доходящем на севере до зоны избыточного увлажнения.

Взаимосвязь запаса с суммой активных температур приведена на рисунке 4. Линии регрессии запасов по высотам позволяют сделать

вывод о том, что при увеличении суммы активных температур происходит снижение продуктивности древостоев. Размах варьирования суммы активных температур находится в диапазоне от 1787 до 2616 $^{\circ}\text{C}^0$. Полученные

регрессии описывают от 34,6 до 48,9% дисперсии запаса древостоев при фиксированных значениях средних высот древостоев, что подтверждается коэффициентами детерминации (R^2).

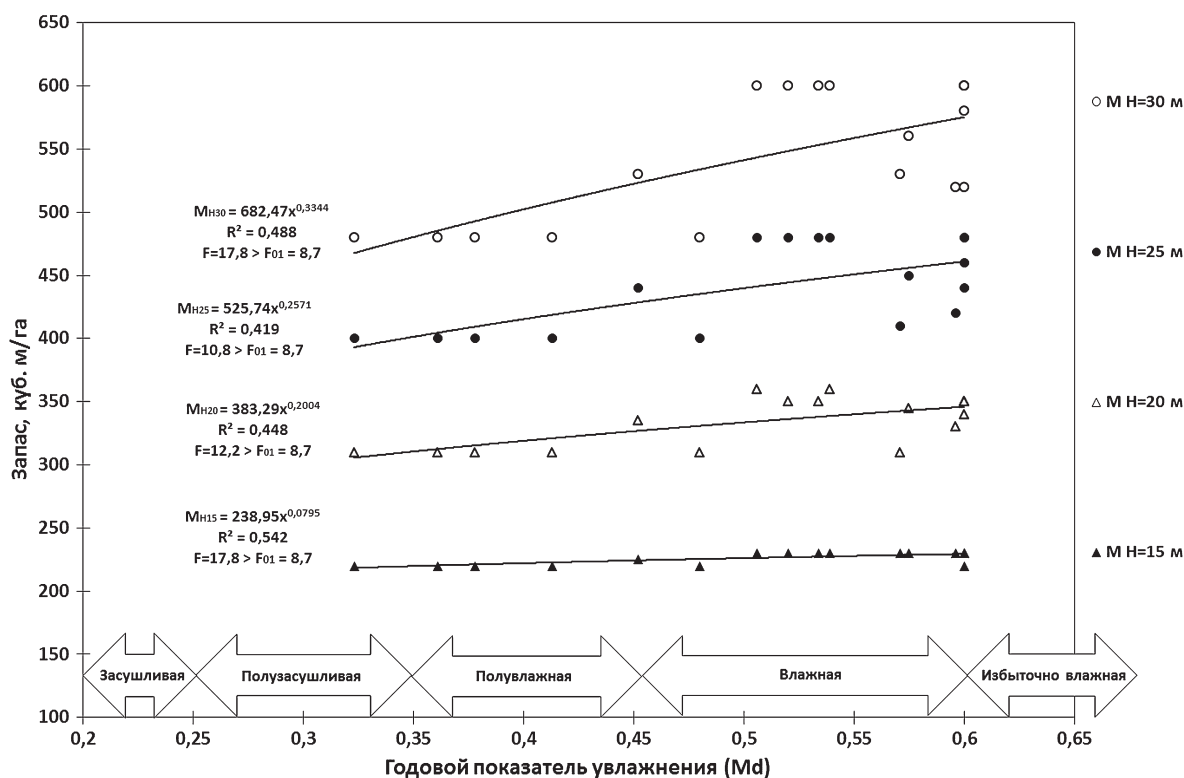


Рис. 3. Взаимосвязи стандартного запаса древостоев с годовым показателем увлажнения при фиксированных значениях средней высоты древостоев по зонам увлажнения

Fig. 3. Relationships of the standard stock of stands with the annual moisture index at fixed values of the average height of the stands by moisture zones

Расчетные значения F-критерия Фишера составили от 9,6 до 14,4 и превышают теоретическое значение на 1-процентном уровне значимости ($F_{01} = 8,7$). Для регрессии запаса при средней высоте 25 м значение расчетного F-критерия составляет 7,9 и находится между теоретическими значениями критериев на втором и третьем пороговых уровнях доверительной вероятности ($F_{05/01} = 4,5/8,7$). Это указывает на отсутствие строгого суждения, но подтверждает вероятность возникновения ошибки в 5% случаев. Полученные регрессии позволяют сделать вывод о достоверности взаимосвязи стандартного запаса древостоев с суммой активных температур.

Взаимосвязь запаса с показателем континентальности климата по Н.Н. Иванову приведена на рисунке 5. Анализ линий регрессии запасов в разрезе заданных высот позволяет сделать вывод о том, что продуктивность уменьшается по мере увеличения значений показателя континентальности. Размах варьирования климатической характеристики по ЦФО находится в диапазоне от 145 до 180. Полученные

регрессии охватывают от 32,5 до 39,8% дисперсии запаса при фиксированных значениях средних высот древостоев, что подтверждается коэффициентами детерминации (R^2). Расчетные F-критерии Фишера только для двух из четырех уравнений составили от 9,0 до 9,2, что превысило теоретические ($F_{01} = 8,7$) на 1-процентном уровне значимости. Для запасов со средней высотой древостоев 15 и 20 м значения расчетного F-критерия составляют 7,2 и 8,9 и находятся между теоретическими значениями критериев ($F_{05/01} = 4,5/8,7$), что указывает на отсутствие строгого суждения об анализируемом фрагменте. Достоверность регрессии в случае $H = 15$ м подтверждена на 5%-ном уровне значимости.

Параметры регрессионных уравнений запаса древостоев с оценкой их достоверности дают возможность ранжировать климатические показатели по степени влияния на потенциальную продуктивность древостоев. Наличие тесной взаимосвязи между рассмотренными климатическими показателями (табл. 2) позволило расставить приоритетность следующим

образом: испаряемость; годовой показатель увлажнения, Md; сумма активных температур;

показатель континентальности климата по Н.Н. Иванову.

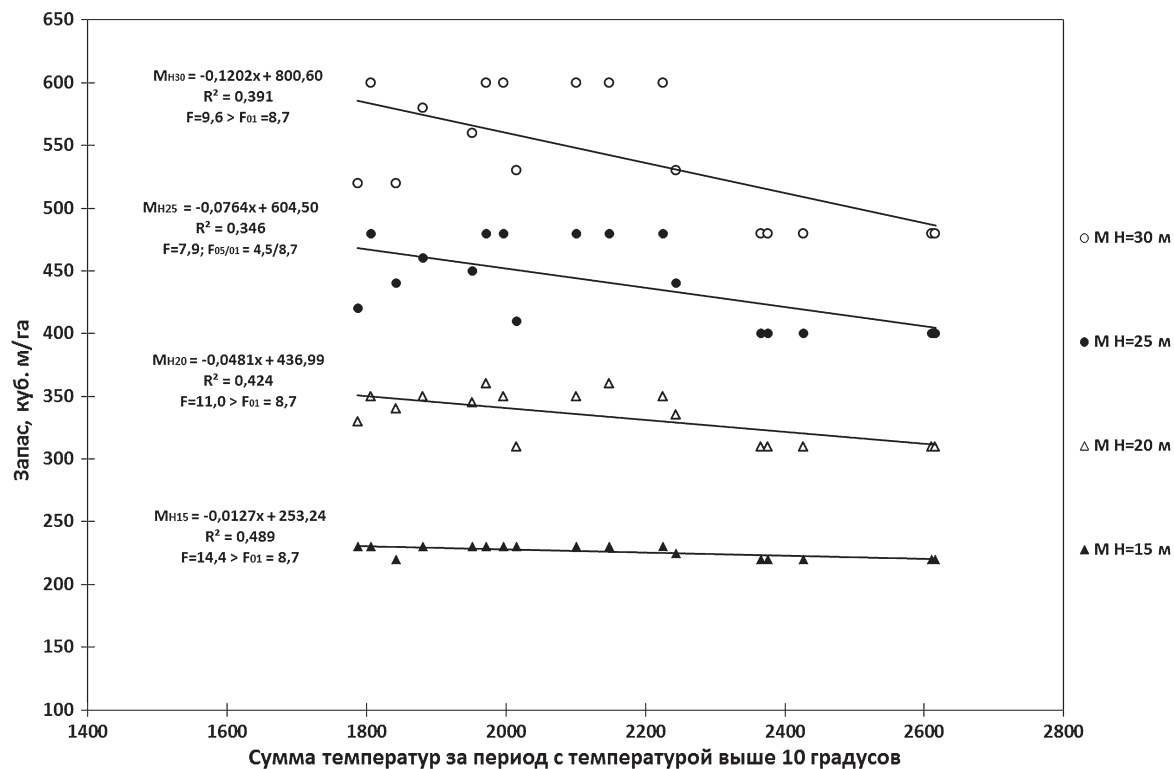


Рис. 4. Взаимосвязи стандартного запаса древостоев с суммой активных температур выше 10°C при фиксированных значениях средней высоты древостоев

Fig. 4. Relationships of the standard stock of stands with the sum of active temperatures above 10°C with fixed values of the average height of the stands

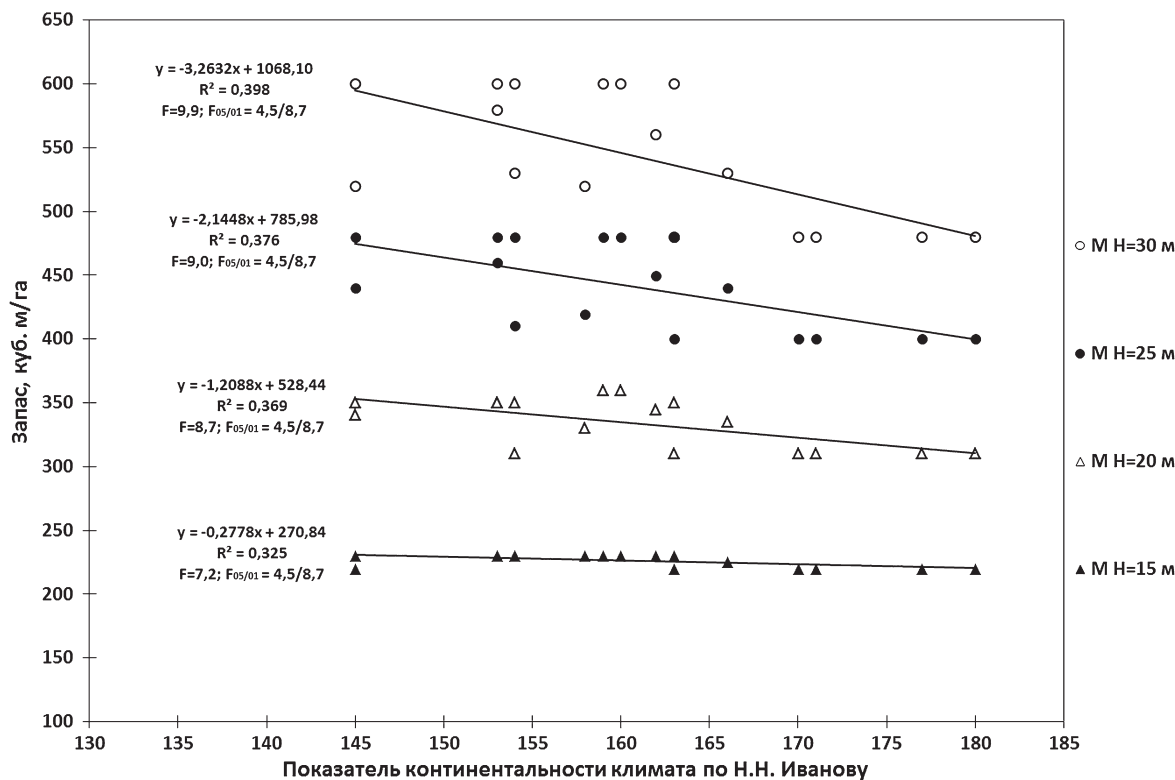


Рис. 5. Взаимосвязи стандартного запаса древостоев с показателем континентальности климата по Н.Н. Иванову при фиксированных значениях средней высоты древостоев

Fig. 5. Interrelations of the standard stock of tree stands with the indicator of the continentality of the climate according to N.N. Ivanov with fixed values of the average height of the stands

Следует отметить, что выявленные взаимосвязи не являются определяющими фактическую продуктивность ввиду того, что при моделировании запаса не были учтены ни показатели пространственной структуры, ни почвенные характеристики. Общеизвестно, что именно эти показатели оказывают наибольшее влияние на формирование продуктивности древостоев. Однако именно они являются индикаторами влияния климата на лесорастительное районирование.

Существенное отклонение климатических условий от оптимальных ведет к изменению физиологических процессов в растениях, и как следствие – к ухудшению фитосанитарного состояния, породной и пространственной структуры лесов. Общеизвестны факты появления в лесном пологом так называемых окон, формирования групповой структуры древостоев и естественных редиц при продвижении от таежной зоны к степной. В результате таких изменений происходит снижение сомкнутости полога и продуктивности древостоев.

Таким образом, следует указать, что величина запаса в стандартных таблицах соответствует запасу, представленному в таблицах хода роста нормальных древостоев при фиксированных значениях высоты. Поэтому в географическом понимании изменение сомкнутости и полноты древостоев связано с критерием нормальности (максимальной продуктивности) древостоев, который следует рассматривать в зависимости от экологических факторов, и прежде всего – климатических.

Библиографический список

1. Герасимов Ю.Ю., Хлюстов В.К. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ: применение в лесоправлении и экологии: учебник для лесных вузов. – М.: МГУЛ, 2001. – 260 с.
2. Загребев В.В. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В.И. Сухих, А.З. Швиденко, Н.Н. Гусев, А.Г. Мошкалева. – М.: Колос, 1992. – 495 с.
3. Хлюстов В.К. Комплексная оценка и управление древесными ресурсами. Модели – нормативы – технологии. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. – 449 с. – URL: <http://elibrary.timacad.ru/dl/full/s23052022kniga2.pdf>.
4. Глызин А.В., Размахнина Т.Б., Корсунов В.М. Дендрохронологические исследования в контактной зоне «Лес-степь» как источник информации о ее динамике // Сибирский экологический журнал. – 2005. – № 1. – С. 79-83.
5. Комин Г.Е. Дендрохронологический анализ динамики радиального прироста пихты кавказской // Лесное хозяйство Северного Кавказа: сборник научных трудов. – Вып. 25. – Сочи: ФГУ «НИИгорлесэкол», 2007. – С. 152-163.
6. Матвеев С.М. Дендроиндикация динамики состояния сосновых насаждений Центральной лесостепи. – Воронеж: ВГУ, 2003. – 272 с.
7. Молчанов А.А. Дендроклиматические основы прогнозов погоды / АН СССР, Лаборатория лесоведения. – М.: Наука, 1976. – 168 с.

Выводы

1. Общая модель регрессии запасов чистых по составу полных сосновых древостоев для 17 субъектов РФ ЦФО является статистически достоверной, характеризуется очень высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,999$); низким значением стандартной ошибки ($E = \pm 2,1\%$); высоким значением F-критерия Фишера ($F = 1399,9$ при $P < 0,05$) и значимостью численных коэффициентов по t-критерию Стьюдента ($t > t_{05} = 1,96$).

2. Влияние климатических показателей: испаряемости, годового показателя увлажнения, суммы активных температур и показателя континентальности климата по Н.Н. Иванову – на запас чистых по составу нормальных сосновых древостоев ЦФО является достоверным и статистически подтвержденным, на что указывают коэффициенты детерминации, значения которых находятся в диапазоне от 0,325 до 0,582. Расчетные значения F-критерия Фишера больше теоретических на 1-процентном уровне значимости в 13 случаях из 16 ($F_{\text{расч.}} > F_{01} = 7,9$) и в 3 случаях – на 5-процентном уровне значимости.

3. Обосновано опосредованное влияние на стандартный запас нормальных древостоев показателей климата в силу изменения пространственной структуры древостоев (полноты) при продвижении с севера на юг от зоны лиственных лесов до лесостепной зоны.

References

1. Gerasimov Yu.Yu., Khlyustov V.K. Matematicheskie metody i modeli v raschetah na EVM: primeneniye v lesoupravlenii i ekologii: uchebnik dlya lesnykh vuzov. – M.: MGUL, 2001. – 260 s.
2. Zagreev V.V. Obshchesoyuznye normativy dlya taksatsii lesov / Sukhih V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkalev A.G. – M.: Kolos, 1992. – 495 s.
3. Khlyustov V.K. Kompleksnaya otsenka i upravleniye drevesnymi resursami. Modeli – normativy – tehnologii. – M.: Izd. RGAU-MSHA imeni Timiryazeva, 2015. – 449 s. <http://elibrary.timacad.ru/dl/full/s23052022kniga2.pdf>
4. Glyzin A.V., Razmahina T.B., Korsunov V.M. Dendrokhronologicheskie issledovaniya v kontaktnoy zone «les – step» kak istochnik informatsii o ee dinamike // Sibirsky ekologichesky zhurnal. – 2005. – № 1. – S. 79-83.
5. Komin G.E. Dendrokhronologichesky analiz dinamiki radialnogo prirosta pihty kavkazskoy // Lesnoye hozyajstvo Severnogo Kavkaza. Sb. nauchnykh trudov, vyp. 25. – Sochi: FGU «NIIGorlesekol», 2007. – S. 152-163.
6. Matveev S.M. Dendroindikatsiya dinamiki sostoyaniya sosnovykh nasazhdenij Tsentralnoj lesostepi. – Voronezh: VGU, 2003. – 272 s.
7. Molchanov A.A. Dendroklimaticheskie osnovy prognozov pogody / AN SSSR, Lab. lesovedeniya. – M.: Nauka, 1976. – 168 s.
8. Metody dendrokhronologii. Chast I. Osnovy dendrokhronologii. Sbor i poluchenie drevesno-koltsevoj

8. Методы дендрохронологии. – Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учебно-методическое пособие / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов и др. – Красноярск: КрасГУ, 2000. – 80 с.

9. Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А. Влияние климатических изменений на растительный покров Европейской России // Известия РАН. Серия «Географическая». – 2009. – № 2. – С. 57-68.

10. Замолодчиков Д.Г., Краев Г. Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. – 2016. – № 4 (48). – С. 23-31.

11. Шиятов С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата: научное издание. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 215 с.

12. Lucht W., Schaphoff S., Erbrect T. et al. Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change // Carbon Balance and Management. – 2006. – Vol. 1. – Pp. 1-7.

13. Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F. et al. Climate induced boreal forest change: Predictions versus current observations // Global and Planetary Change. – 2007. – V. 56. – № 34. – Pp. 274-296.

14. Yu M., Wang G., Parr D., Ahmed K.F. Future changes of the terrestrial ecosystem based on a dynamic vegetation model driven with RCP8.5 climate projections from 19 GCMs // Climatic Change. – 2014. – V. 127. – Pp. 257-271.

15. Коровин Г.Н., Зукерт Н.В. Влияние климатических изменений на лесные пожары в России // Климатические изменения: взгляд из России; Под ред. В.И. Данилова-Данильяна. – М.: ТЕИС, 2003. – С. 69-98.

16. Малевский-Малевич С.П. Анализ изменения пожароопасной обстановки в лесах России в XX и XXI веках на основе моделирования климатических условий / Е.К. Молькентин, Е.Д. Надёжина и др. // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 3. – С. 14-24.

17. Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б. Лесные пожары при потеплении климата в XXI веке // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2013. – Т. 25. – С. 300-314.

18. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Кн. 1, 2. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

19. Материалы по природно-экономической характеристике сельскохозяйственных микрорайонов СССР. Ч. I. – М.: Изд-во экономической литературы, 1962. – 999 с.

20. Архив климатических данных. – URL: <http://climatebase.ru/regions/Russia>.

Критерии авторства

Хлюстов В.К., Васенёв И.И., Ганихин А.М. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 21.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

informatsii: учебно-методическое пособие / Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V. i dr. – Krasnoyarsk: KrasGU, 2000. – 80 s.

9. Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A. Vliyanie klimaticheskikh izmenenij na rastitelny pokrov Evropejskoj Rossii // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. – 2009. – № 2. – S. 57-68.

10. Zamolodchikov D.G., Kraev G. Vliyanie izmenenij klimata na lesa Rossii: zafiksirovannye vozdeystviya i prognoznnye otsenki // Ustojchivoe lesopolzovanie. – 2016. – № 4 (48). – S. 23-31.

11. Shiyatov S.G. Dinamika drevesnoj i kustarnikovo-rastitelnosti v gorah Polyarnogo Urala pod vliyaniem sovremennykh izmenenij klimata: nauchnoe izdanie. – Ekaterinburg, UrO RAN, 2009. – 215 s.

12. Lucht W., Schaphoff S., Erbrect T. et al. Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change // Carbon Balance and Management. 2006 V. 1 P. 1-7.

13. Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H. F. et al. Climate induced boreal forest change: Predictions versus current observations // Global and Planetary Change. 2007 V. 56 № 34. P. 274-296.

14. Yu M., Wang G., Parr D., Ahmed K.F. Future changes of the terrestrial ecosystem based on a dynamic vegetation model driven with RCP8.5 climate projections from 19 GCMs // Climatic Change. 2014 V. 127 P. 257-271.

15. Korovin G.N., Zukert N.V. Vliyanie klimaticheskikh izmenenij na lesnye pozhary v Rossii / Sb. Klimaticheskie izmeneniya: vzglyad iz Rossii; pod red. V.I. Danilova Danil'jana. – M.: TEIS, 2003. – S. 69-98.

16. Malevsky-Malevich S.P. Analiz izmeneniya požaroopasnoj obstanovki v leshakh Rossii v XX i XXI vekah na osnove modelirovaniya klimaticheskikh uslovij / Moljkentin E.K., Nadezhina E.D. i dr. // Meteorologiya i gidrologiya. – 2007. – № 3. – S. 14-24.

17. Sherstyukov B.G., Sherstyukov A.B. Lesnye pozhary pri poteplenii klimata v XXI veke // Problemy ekologicheskogo monitoring i modelirovaniya ekosistem. – 2013. – T. 25. – S. 300-314.

18. Drejper N., Smith G. Prikladnoj regressiionny analiz. Kn. 1, 2. – M.: Finansy i statistika, 1986. – 366 s.

19. Materialy po prirodno-ekonomicheskoy karakteristike selskohozyajstvennyh mikrorajonov SSSR. Ch. I. – M.: Izd. – vo ekonomicheskoy literatury, 1962. – 999 s.

20. Climatebase.ru. Arhiv klimaticheskikh dannyh: <http://climatebase.ru/regions/Russia>

Criteria of Authorship

Khlyustov V.K., Vasenev I.I., Gahikhin A.M. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Khlyustov V.K., Vasenev I.I., Gahikhin A.M. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 21.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504: 630*:631.474

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-132-138

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЧВ ПОД ЛЕСНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ ГОРОДА АСТАНЫ

КОЧЕГАРОВ ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ¹, магистр, младший научный сотрудник

garik_0188@mail.ru

КАБАНОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ^{1✉}, аспирант, старший научный сотрудник

7058613132@mail.ru

КАБАНОВА СВЕТЛАНА АНАТОЛЬЕВНА^{1✉}, канд. биол. наук, ассоциированный профессор

kabanova.05@mail.ru

НЕВЕНЧАННАЯ НАТАЛЬЯ МИХАЙЛОВНА², канд. с.-х. наук

nm.nevenchannaya@omgau.org

ДАНЧЕНКО МАТВЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ³, канд. геогр. наук, доцент

mt2005@sibmail.com

СКОТТ САБИНА АРТУРОВНА⁴, магистр

e-mail: scott.1818@osu.edu

¹ Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агроресомелиорации им. А.Н. Букейхана; 021704, Акмолинская область, г. Щучинск, ул. Кирова, 58, Республика Казахстан

² Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина; 644008; г. Омск, Институтская площадь, 1, Россия

³ Томский государственный университет, Биологический институт; 634050, Томск, пр. Ленина, 36, Россия

⁴ Государственный Колледж Колумбуса; 43210, США, Огайо, Колумбус, пр. Нил, 1735

Исследование финансируется Министерством экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан (№ BR10263776)

Целью исследований является определение влияния степени засоленности почв на состояние листовых насаждений в зеленой зоне г. Астаны. Объектами исследований стали лесные культуры кулисного типа, произрастающие на ограниченно-лесопригодных почвах. Для изучения были выбраны искусственные насаждения березы повислой *Betula pendula* и вяза приземистого *Ulmus pumila* 2006 и 2010 гг. посадки, входящие в один класс возраста. В зависимости от состояния искусственных насаждений на пробных площадях выполнялись почвенные прикопки на глубину корнеобитаемого слоя и использовались образцы почвы для выполнения анализа. В результате выявлено, что тип засоления почв по всем пробным площадям разнообразен, и наиболее часто встречается хлоридно-сульфатное засоление как в здоровых, так и в ослабленных насаждениях древесных пород. При хлоридном и сульфатно-хлоридном засолении состояние березовых насаждений значительно снижается. Содержание суммы токсичных солей в почве под лесными культурами вяза приземистого в здоровых насаждениях было минимальным, постепенно увеличиваясь с ухудшением состояния деревьев. В березовых культурах наблюдалось примерно одинаковое содержание суммы солей в здоровых и погибших насаждениях, превышение показателя отмечено в ослабленных насаждениях. Таким образом, на состояние изучаемых древесных пород наибольшее влияние оказывают глубина солевого горизонта, биологические особенности культуры и содержание токсичных солей (тип засоления). Определено, что для вяза приземистого сумма солей 0,057% является летальной, содержание солей в количестве 0,014% не влияет на ухудшение состояния и роста деревьев. Относительно березы повислой получены противоречивые результаты, которые требуют дополнительных исследований. Однако в результате исследований выявлено, что на состояние здоровых и ослабленных изучаемых пород токсичное влияние оказывают все ионы. Что же касается березы, то при хлоридном и сульфатно-хлоридном засолении состояние деревьев значительно ухудшается.

Ключевые слова: солевой состав, категория лесопригодности почв, жизненное состояние, тип засоления почв, береза повислая, вяз приземистый

Формат цитирования: Кочегаров И.С., Кабанов А.Н., Кабанова С.А., Невенчанная Н.М., Данченко М.А., Скотт С.А. Агроэкологическая оценка почв под лесными насаждениями

защитной зоны г. Астаны // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 132-138. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-132-138.

© Кочегаров И.С., Кабанов А.Н., Кабанова С.А.,
Невенчаная Н.М., Данченко М.А., Скотт С.А., 2022

Original article

AGROECOLOGICAL ASSESSMENT OF SOILS UNDER FOREST PLANTATIONS OF THE PROTECTION ZONE OF ASTANA

KOCHEGAROV IGOR SERGEEVICH¹, MA student, junior researcher

garik_0188@mail.ru

KABANOV ANDREJ NIKOLAEVICH^{1✉}, post graduate student, senior researcher

7058613132@mail.ru

KABANOVA SVETLANA ANATOLJEVNA^{1✉}, candidate of biological sciences, associate professor

kabanova.05@mail.ru

NEVENCHANAYA NATALJA MIKHAILOVNA², candidate of agricultural sciences

nm.nevenchanaya@omgau.org

DANCHENKO MATVEJ ANATOLJEVICH³, candidate of geographical sciences, associate professor

mtd2005@sibmail.com

SCOTT SABINA ARTUROVNA⁴, MA student

scott.1818@osu.edu

¹ Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforest reclamation named after A.N. Bukeikhan; 021704, Shchuchinsk, Akmola region, Kirov str., 58, Republic of Kazakhstan

² Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin; 644008; Omsk, Institutskaya Square, 1, Russia

³ Tomsk State University, Biological Institute; 634050, Tomsk, Lenin pr., 36, Russia

⁴ Columbus State College, 43210, USA, Ohio, Columbus, Nile Ave., 1735

This study is funded by the Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan (No. BR10263776)

*Purpose of research – determine the influence of the degree of soil salinity on the state of hardwood plantations in the green zone of Nur-Sultan city. The objects of research were forest plantations growing on soils with limited forest suitability. Artificial plantations of silver birch *Betula pendula* and Siberian elm *Ulmus pumila* in 2006 and 2010 of the same age class were selected for the study. Depending on the state of artificial plantations, soil tilling was carried out on the test plots at the depth of the root formation and soil samples were used for the analysis. It was revealed that there is diversity in the type of soil salinity across all sample plots and the most common one is chloride and sulfate salinity that is found in both healthy and weakened stands of both tree species. In chloride and sulfur chloride soil salinization, the physical state of birch plantations was significantly reduced. The content of the sum of toxic salts in the soil under forest plantations of the Siberian elm in healthy stands was minimal, which was gradually increasing with the deterioration of the condition of the trees. In silver birch species, approximately the same content of the total salts was observed in healthy and deteriorated plantations, the increase in toxic salts contents was observed in weakened plantations. The height and diameter of trees in healthy stands of both tree species exceeded those of trees in weakened plantations, judging by the coefficient of variation, tree growth was heterogeneous. It was determined that for the Siberian elm the amount of salts of 0.057% is lethal, the salt content in the amount of 0.014% does not affect the decline in the condition and growth of trees. For the forest plantations of silver birch, contradictory results have been obtained, which require additional research.*

Keywords: salt composition, category of soil suitability in forests, health status, type of soil salinity, silver birch, Siberian elm

Format of citation: Kochegarov I.S., Kabanov A.N., Kabanova S.A., Nevenchanaya N.M., Danchenko M.A., Scott S.A. Agroecological assessment of soils under forest plantations of the protection zone of Astana // Prirodobustroystvo. – 2022. – № 5. – S. 132-138. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-132-138.

Введение. Засоление почв является глобальной проблемой для всего мира. Влияние засоления почв на рост и состояние растений носит комплексный характер, кроме

непосредственного содержания токсичных солей. Играть свою роль также свойства почвы, наличие и количество воды, климат и другие условия среды. В течение эволюции растения приспособились к определенным условиям, и у них сложился определенный генотип, позволяющий выживать в экстремальных почвенно-климатических условиях [1]. При анализе методик определения солевого состава почвы выявлено, что они используют весьма различные характеристики и подходы к выявлению негативного влияния на деградацию почвы, что предлагается для анализа и оценки данных о качественном составе, степени засоления и химизма [2]. Известно, что при определенной агротехнике можно улучшить категорию лесопригодности почвы и ее плодородия, хотя лимитирующим фактором остается недостаток воды [3-5].

Гибель искусственных насаждений может происходить по многим причинам антропогенного характера и влияния условий окружающей среды. Но весьма часто лесные культуры погибают вследствие неправильного подбора ассортимента древесных и кустарниковых пород в зависимости от степени засоленности почвы.

Уральские ученые разработали классификацию солонцов по лесопригодности, которая позволит проводить лесоразведение на ранее не использовавшихся площадях [6].

Выращивание искусственных насаждений вокруг столицы Казахстана г. Астаны началось в 90-е гг. прошлого столетия. В основу группировки почв по степени лесопригодности положены требования, предъявляемые различными древесными и кустарниковыми породами к условиям обитания: к условиям увлажнения, устойчивости к засолению, солонцеватости и затоплению. Почвы со сходным лесорастительным эффектом объединены в следующие три группы по лесопригодности:

* лесопригодные почвы (почвы I группы), которые могут устойчиво произрастать как несолевыносливые и очень слабосолевыносливые породы;

* ограниченно-лесопригодные (почвы II группы) – слабосолевыносливые, солевыносливые;

* условно-лесопригодные (почвы III группы), совмещаемые с ареалом наиболее солевыносливых и засухоустойчивых пород [7].

По степени засоления во вторую группу объединены почвы, содержащие в профиле вредные соли, оказывающие примерно одинаковое угнетающее воздействие на древесную растительность. В темно-каштановых карбонатных глубокосолончаковых почвах общая сумма солей в слое

максимального скопления 80-150 см колеблется в широких пределах: от 0,597 до 1,585%. Это связано с глубиной ежегодного весеннего промачивания почв на 50-80 см, поэтому характерным является максимальное содержание солей с глубины 80 см (рис. 1). Большие значения суммы солей связаны с высоким содержанием без вредного для растений сульфата кальция. В профиле почв присутствуют сода в количестве 0,003-0,007% и токсичные сульфаты (за вычетом гипса) в пределах 4,11-6,41 мг-экв. на 100 г почвы, или 2,0-3,1%.

Лесопригодные почвы в зеленой зоне составляют 20%, основная доля территории приходится на ограниченно условно- и нелесопригодные почвы. Среднегодовое количество осадков не превышает 335 мм. Среднее значение температуры воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли составляет +4,3°C. Этот факт вынуждает подбирать ассортимент древесных и кустарниковых пород исходя из их соле- и засухоустойчивости. На протяжении всего периода создания зеленой зоны в лесных культурах проводятся научные исследования [8].

Целью исследований являлось определение влияния степени засоленности почв на состояние лиственных насаждений в зеленой зоне г. Астаны.

Материалы и методы исследований.

Объектом исследований стали лесные культуры кулисного типа, произрастающие на ограниченно-лесопригодных почвах. Для проведения исследований были выбраны искусственные насаждения березы повислой *Betula pendula* и вяза приземистого *Ulmus pumila* 2006 и 2010 гг. посадки, имеющие один класс возраста. По внешним признакам отбирались здоровые и ослабленные насаждения древесных пород. Затем на заложенных пробных площадях производились измерения таксационных показателей [9] и для каждого дерева определялось состояние (здоровое, ослабленное или сильно ослабленное). Также учитывался старый и свежий сухостой. Жизненное состояние оценивалось в соответствии с методикой Алексеева [10]:

$$H = \frac{100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 4n_4}{N}, \%$$

где H – относительное жизненное состояние древостоя; n_1 – число здоровых деревьев, шт.; n_2 – число ослабленных деревьев, шт.; n_3 – число сильно ослабленных деревьев, шт.; n_4 – число отмирающих деревьев, шт.; N – всего деревьев на пробной площади, шт.

Здоровым считалось насаждение, имеющее индекс жизненного состояния 80-100; ослабленным считали насаждение с индексом 50-79; очень ослабленное насаждение имело индекс 20-49.

В зависимости от состояния искусственных насаждений на пробных площадях выполнялись почвенные прикопки на глубину корнеобитаемого слоя и отбирались образцы почвы для выполнения анализа водной вытяжки.

Почвенный разрез был заложен на месте, предназначенном для создания лесных культур до посадки растений, и по всем критериям лесорастительной оценки почв относится к ограниченно-лесопригодной группе почв [7, 11]. Физико-химический анализ почвы проводился в специализированной лаборатории по общепринятым методикам: определение общей щелочности, хлорид-ионов, сульфат-ионов, кальция и магния – титриметрическим методом; сумма натрия и калия – расчетным методом; сухой остаток – гравиметрическим (весовым) методом; реакция среды – потенциометрическим методом.

В статье приведены средние значения результатов анализа почвы отдельно для лесных культур различного состояния.

Результаты и их обсуждение. По глубине залегания солей на участке формируются глубокосолончаковатые почвы, так как наибольшая сумма солей наблюдается в слое 80-100 см (0,777%). Химизм засоления – каль-

циевый по всей глубине. Тип засоления в горизонте максимального скопления солей – сульфатный. В зависимости от глубины тип засоления изменяется. Так, в слое 0-20 см засоление хлоридное; в слое 40-60 см – хлоридно-сульфатное; затем – сульфатно-хлоридное; а начиная с глубины 80 см – сульфатное. Почвы среднесоленные. Сумма солей в слое 0-80 см невелика – 0,079-0,144%. В слое 80-100 см она является наибольшей: 0,777% – сильнозасоленная на основании классификации почв по содержанию токсичных солей, % к массе почвы (по Н.И. Базилевич, Е.И. Панковой). Затем сумма солей постепенно снижается и на глубине 180-200 см составляет 0,175%. Наибольшее присутствие сульфатных солей наблюдается на глубине от 100 до 180 см. По щелочности в слое 0-20 см почвы являются щелочными; ниже по горизонтам – от нейтральных до сильнощелочных (рН колеблется от 7,03 до 8,86), причем с глубиной щелочность почвы увеличивается, достигая максимума в горизонте скопления карбонатов. По механическому составу в почве присутствуют фракции «физического» песка (от 45,8 до 92,6%), причем распределение фракций по горизонтам неравномерное (рис. 1).

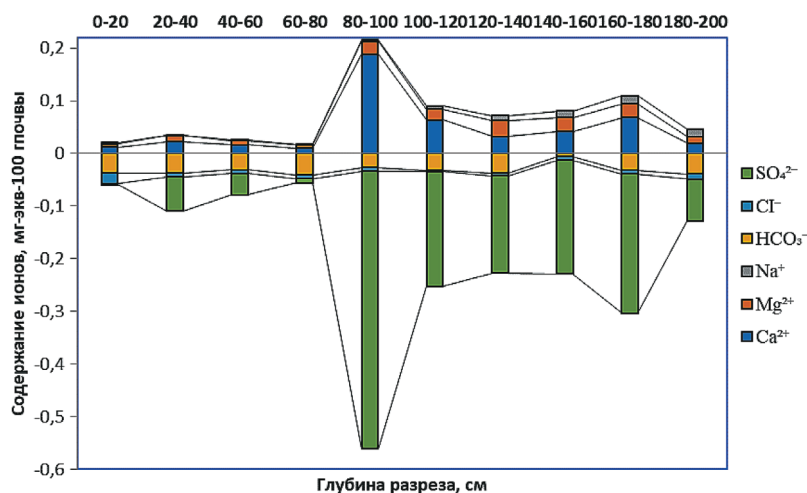


Рис. 1. Солевой профиль ограниченно-лесопригодных почв в зеленой зоне г. Астаны

Fig. 1. Salt profile of limited forest-suitable soils in the green zone of Astana

По итогам почвенных прикопок на ограниченных лесопригодных участках было определено, что сумма токсичных солей под лесными культурами березы повислой в ослабленных насаждениях была больше, чем в почве погибших культур (рис. 2). В почве под культурами вяза приземистого сумма солей в почве ожидаемо была наибольшей под погибшими насаждениями. Минимальные значения суммы солей в почве на обследованных участках вяза приземистого колебались в пределах 0,014-0,057%, максимальные значения – в пределах 0,057-0,108%. Аналогичные

значения для культур березы повислой составили соответственно 0,024-0,046 и 0,066-0,082%.

Для здоровых культур вяза приземистого характерно содержание токсичных солей в среднем 0,037%, для культур березы повислой – 0,052%. Ослабление жизненного состояния культур вяза начинается на почвах, в которых содержание суммы солей в среднем составляет 0,047%. При среднем показателе 0,076% культуры погибли.

Парадоксальными являются результаты почвенного анализа в культурах березы

повислой. Из рисунка 2 следует, что как в здоровых, так и в погибших насаждениях содержится примерно одинаковая сумма солей, а превышение показателя наблюдается в ослабленных насаждениях. Возможно, гибель культур березы повислой обусловлена не только засолением почвы, но другими факторами, требующими дальнейших исследований.

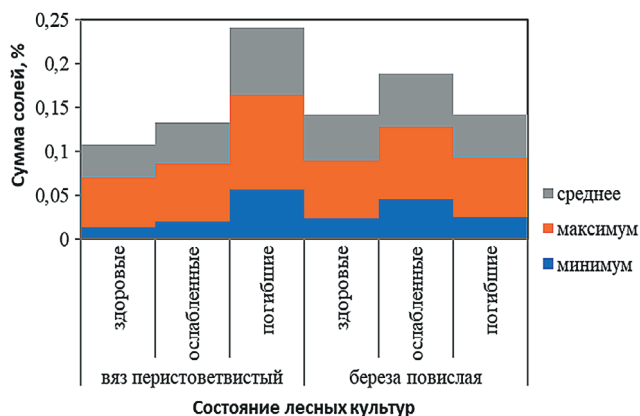


Рис. 2. Сумма солей, %, в почве под лесными культурами вяза приземистого и березы повислой различного состояния

Fig. 2. The sum of salts (%) in the soil under the forest crops of Siberian elm and Silver birch of various conditions

В результате исследований выявлена определенная тенденция содержания токсичных солей в почве под лесными культурами вяза приземистого, когда наблюдалось постепенное увеличение содержания солей в почве, начиная со здоровых и заканчивая погибшими культурами. Основной тип засоления почвы в культурах вяза – хлоридно-сульфатное (71,4%), одинаковой является встречаемость хлоридного и сульфатного засоления (по 14,3%). В здоровых насаждениях все три типа засоления составляют по 33,3%, в ослабленных культурах преимущество имеет хлоридно-сульфатное засоление (77,8%), а также хлоридное (22,2%). На погибших участках вяза хлоридно-сульфатное засоление составляет 66,0%, сульфатное – 34,0%.

Судя по данным рисунка 3, на состояние растений наибольшее влияние оказывал натрий. В почвах ослабленных насаждений его количество изменялось от 0,030 до 0,180 мг-экв, в погибших насаждениях достигало максимума 1,060 мг-экв, тогда как в почвах здоровых насаждений натрия не было. Среднее содержание хлора в почвах здоровых культур составило 0,033, в ослабленных – 0,057, в погибших – 0,040 мг-экв.

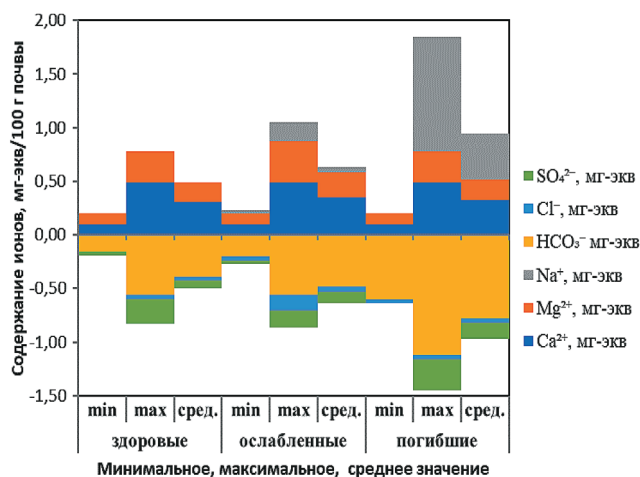


Рис. 3. Содержание токсичных солей в почве под лесными культурами вяза приземистого различного жизненного состояния

Fig. 3. The content of toxic salts in the soil, under forest crops of Siberian elm of various living conditions

Относительно лесных культур березы повислой достигнут прямо противоположный результат: в почве в ослабленных культурах имелось наибольшее количество солей, в погибших культурах – наименьшее (рис. 4).

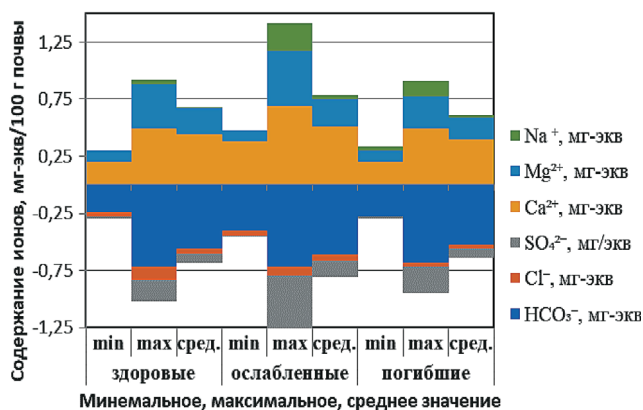


Рис. 4. Солевой профиль почвы в лесных культурах березы повислой различного жизненного состояния

Fig. 4. Salt profile of the soil in forest crops of Silver birch of different living conditions

Тип засоления почв на всех тестовых участках разнообразен: хлоридно-сульфатное засоление составляет 55%, хлоридное и сульфатно-хлоридное – 30%, сульфатное – 15%. Если брать пробные площади в зависимости от состояния деревьев, то в здоровых насаждениях хлоридно-сульфатное засоление составляет 54,6%, хлоридное и сульфатно-хлоридное – 36,3%, сульфатное – 9,1%; в ослабленных насаждениях – соответственно 57,9; 21,1; 21,0%; в погибших – 44,5; 44,3; 11,2%. Исходя из полученных значений показателей, можно

сделать предположение того, что при хлоридном и сульфатно-хлоридном засолении состояние березовых насаждений значительно снижается.

В таблице приведены результаты замеров показателей роста лесных культур березы повислой и вяза приземистого. Здоровые культуры березы повислой превышали ослабленные насаждения по высоте на 37,3%, по диаметру – на 30,25%. Коэффициент вариации изменялся на повышенном уровне по высоте, на высоком уровне – по диаметру. Следовательно, рост деревьев был неоднородным. Высота и диаметр вяза приземистого в здоровых насаждениях значительно превосходили аналогичные показатели у ослабленных деревьев.

Изменчивость таксационных показателей колебалась на повышенном и высоком уровнях.

Таким образом, по полученным данным можно сделать предварительные выводы о степени засоленности почвы, ухудшающей состояние и рост деревьев в лесных культурах. Для вяза приземистого сумма солей 0,057% является летальной, содержание солей в количестве 0,014% не влияет на ухудшение состояния и рост деревьев. Для лесных культур березы повислой получены противоречивые результаты, которые свидетельствуют не только о токсичном влиянии легкорастворимых солей, но в большей мере – о влиянии глубины солевого горизонта и биологических особенностей корневой системы.

Таблица

Таксационные показатели лесных культур березы повислой и результаты водно-химического анализа почвы

Table

Taxation indicators of Silver birch forest crops and results of water-chemical analysis of the soil

Состояние Condition	Год посадки Year of planting	Высота Height		Диаметр Diameter		Содержание, мг-экв/ 100 г почвы Content, mg-eq / 100 g of soil							
		среднее, м average, m	V*, %	среднее, см average, cm	V*, %	сумма солей, % sum of salts, %	HCO ³	Cl ⁻	SO ² ₄	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Береза повислая / Silver birch													
Здоровые Healthy	2006-2010	8,06±0,22	21,62	9,19±0,26	22,35	0,057	0,65	0,03	0,06	0,49	0,23	0,01	0,01
Ослабленные Weakened		5,05±0,21	28,88	6,41±0,52	36,06	0,065	0,65	0,03	0,17	0,54	0,22	0,07	0,02
Погибшие Dead		-	-	-	-	0,043	0,47	0,03	0,06	0,37	0,16	0,02	0,02
Вяз приземистый / Siberian elm													
Здоровые healthy	2010	5,07±0,37	14,66	8,00±0,37	20,03	0,014	0,16	0,04	0	0,10	0,10	0	0
Ослабленные Weakened		3,80±0,17	28,57	4,99±0,26	34,08	0,029	0,32	0,04	0,03	0,20	0,20	0	0
Погибшие Dead		-	-	-	-	0,057	0,60	0,04	0,10	0,49	0,20	0	0,05

Примечание – * - коэффициент вариации. / Note – * - coefficient of variation.

Выводы

По материалам изучения санитарного состояния и роста лесных культур березы повислой и вяза приземистого на ограниченно-лесопригодных почвах в зеленой зоне г. Астаны сделаны определенные выводы.

1. Тип засоления почв по всем пробным площадям является разнообразным, но наиболее часто встречается хлоридно-сульфатное засоление как в здоровых, так и в ослабленных культурах рассматриваемых древесных пород.

2. При хлоридном и сульфатно-хлоридном засолении состояние березовых культур

значительно ухудшается. Этот факт необходимо учитывать при проектировании лесных культур и выборе древесной породы.

3. Содержание суммы токсичных солей в почве под здоровыми лесными культурами вяза приземистого были минимальными. Их постепенное увеличение сказывается на ухудшении состояния деревьев.

4. Высота и диаметр деревьев в здоровых культурах обеих древесных пород превышали аналогичные показатели деревьев в ослабленных культурах.

Библиографический список

1. **Иванищев В.В.** О механизмах солеустойчивости растений и специфике влияния засоления // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2019. – Вып. 4. – С. 76-88.
2. **Манжина С.А.** К вопросу выявления химизма и степени засоления почв: российские и зарубежные практики // Мелиорация и гидротехника. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 163-181. – URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1220>.
3. **Новикова Н.М.** Трансформация солонцовых комплексов Ергенинской возвышенности в искусственных лесных насаждениях / А.Ф. Новикова, М.В. Кожушкова, Н.М. Церенов // Вестник Института комплексных исследований аридных территорий. – 2011. – № 1. (22). – С. 63-74.
4. **Бабичев А.Н., Бабенко А.А.** Влияние различных типов и видов мелиорации на восстановление и повышение плодородия деградированных почв // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 157-176. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-157-176>.
5. **Кузьмин А.И.** Методика реконструкции водоемов Камышловского лога с целью стабилизации их баланса, улучшения экологического состояния и хозяйственного использования солончаково-солонцовых комплексов почв для возрождения продуктивности естественных лугов долины / Ж.А. Тусупбеков, Н.Л. Ряполова, В.С. Надточий // Каталог научных и инновационных разработок ФГБОУ ВО Омский ГАУ. Серия «Агрохимия, почвоведение, экология, природообустройство и водопользование». – Омск: ОмГАУ, 2021. – С. 22-24.
6. **Толкач О.В., Фрейберг И.А., Черноусова Н.Ф.** Использование солонцов в лесокультурных целях // Леса России и хозяйство в них. – 2016. – № 4 (59). – С. 62-69.
7. **Гирлов В.А.** Методические указания по оценке лесопригодности засоленных почв Северного Казахстана. – Щучинск: 1998. – 11 с.
8. **Кабанова С.А., Данченко М.А., Мясников А.Г.** Динамика приживаемости лесобразующих пород зеленой зоны г. Астаны // Проблемы региональной экологии. – 2012. – № 2. – С. 144-146.
9. **Данченко А.М., Кabanова С.А., Данченко М.А., Муканов Б.М.** Лесные культуры: учеб. пособие. – М.: Юрайт, 2018. – 235 с.
10. **Алексеев В.А., Чертов О.Г., Сергейчик Г.А.** Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. – Л.: Наука, 1990. – 200 с.
11. **Степанов В.И.** Наставление по лесовосстановлению и лесоразведению в государственном лесном фонде Казахской ССР. – Ч. 1, 2. – Алма-Ата, 1988. – 103 с.

Критерии авторства

Кочегаров И.С., Кabanов А.Н., Кabanова С.А., Невенчаная Н.М., Данченко М.А., Скотт С.А. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 20.07.2022 г.

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.22

Reference

1. **Ivanishchev V.V.** O mehanismah soleustoichivosti rastenij i spetsifike vliyaniya zasoleniya // Izvestiya TulGU. Estestvennye nauki. 2019. – Vyp. 4. – Sp. 76-88.
2. **Manzhina S.A.** K voprosu vyjavleniya himizma i stepeni zasoleniya pochv: rossijskie i zarubezhnye praktiki // Melioratsiya i gidrotehnika. – 2021. – T. 11. № 3. – S. 163-181. <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1220>
3. **Novikova N.M.** Transformatsiya solontsovykh kompleksov Ergeninskoy vozvyshennosti v iskusstvennykh lesnykh nasazhdeniyah / Novikova A.F., Konyushkova M.V., Tserenov N.M. // Vestnik instituta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territorij. – 2011. – № 1 (22). – S. 63-74.
4. **Babichev A.N., Babenko A.A.** Vliyanie razlichnykh tipov i vidov melioratsii na vosstanovlenie i povyshe-nie plodorodiya degradirovannykh pochv // Melioratsiya i gidrotehnika. – 2022. – T. 12. No. 1. – S. 157-176. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-157-176>
5. **Kuzmin A.I.** Metodika rekonstruktsii vodoemov Kamyshlovskogo loga s tselyu stabilizatsii ih balansa, uluchsheniya ekologicheskogo sostoyaniya i hozyajstven-nogo ispolzovaniya solonchakovo-solontsovykh komplek-sov pochv dlya vrozozhdeniya produktivnosti estestvennykh lugov doliny / Tusupbekov Zh.A., Ryapolova N.L., Nadtochiy V.S. // Katalog nauchnykh i innovatsionnykh razrabotok FGBOU VO Omsky GAU. Seriya «Agrohi-miya, pochvovedenie, ekologiya, prirodoobustrojstvo i vo-dopolzovanie». – Oms: OmGAU, 2021. – S. 22-24.
6. **Tolkach O.V., Freyberg I.A., Chernousova N.F.** Ispolzovanie solontsov v lesokulturnykh tse-lyah // Lesa Rossii i hozyajstvo v nih. – 2016. – № 4 (59). – S. 62-69.
7. **Girlov V.A.** Metodicheskie ukazaniya po otsenke lesoprigodnosti zasolennykh pochv Severnogo Kazakhsta-na. – Shchuchinsk: 1998. – 11 s.
8. **Kabanova S.A., Danchenko M.A., Myasnikov A.G.** Dinamika prizhivaemosti lesoobrazuyushchih porod zelenoy zony g. Astany // Problemy regionalnoy eco-logii. – 2012. – No. 2. – S. 144-146.
9. **Danchenko A.M.** Lesnye kultury: ucheb. poso-bie / Kabanova S.A., Danchenko M.A., Mukanov B.M. – Moscow: Yurayt, 2018. – 235 s.
10. **Alekseev V.A., Chertov O.G., Sergeychik G.A.** Lesnye ekosistemy i atmosfernoe zagryaz-nenie. – L.: Nauka, 1990. – 200 s.
11. **Stepanov V.I.** Nastavlenie po lesovosstanovle-niyu i lesorazvedeniyu v gosudarstvennom lesnom fonde Kazakhskoy SSR. Chast 1, 2. – Alma-Ata: 1988. – 103 s.

Criteria of Authorship

Kochegarov I.S., Kabanov A.N., Kabanova S.A., Nevenchanaya N.M., Danchenko M.A., Scott S.A. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Kochegarov I.S., Kabanov A.N., Kabanova S.A., Nevenchanaya N.M., Danchenko M.A., Scott S.A. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 20.07.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

Оригинальная статья

УДК 502/504:630*:58.006

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-139-144

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИТОГИ ИЗУЧЕНИЯ ФЛОРЫ НЕРЧУГАНСКОГО ЗАКАЗНИКА (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

БАНИЦИКОВА ЕКАТЕРИНА АНАТОЛЬЕВНА , младший научный сотрудник
kait1986@mail.ru

ЖЕЛИБО ТАТЬЯНА ВИТАЛЬЕВНА, младший научный сотрудник
zhelibot@mail.ru

Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук (ИПРЭК СО РАН);
672014, Забайкальский край, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, Россия

Цель исследований заключается в изучении видового состава и анализа флоры Нерчуганского заказника. Создание крупного по площади государственного природного ландшафтного заказника регионального значения «Нерчуганский» на территории Тунгокоченского района Забайкальского края, входящего в состав Дальневосточного федерального округа, при поддержке WWF России было организовано с целью сохранения природного наследия. Исследуемая крупная особо охраняемая природная территория (ООПТ) расположена в бассейне стока Амура – долине реки Нерча и ее важнейшего притока Нерчуган. Важность данной ООПТ с точки зрения экологической безопасности обусловлена тем, что в этом районе ведется масштабная добыча россыпного золота, оказывающая существенное негативное воздействие на природные системы. В статье приведены данные экспедиционных исследований наземной экосистемы территории заказника. В результате собранного материала составлен систематический реестр флоры растений с выделением ведущих семейств. Представлены итоги хорологического анализа и выявлены особенности формирования растительного покрова на данной территории. Распределены поясно-зональная и экологическая классификации растительного покрова. Произведен фитосоциологический анализ флоры заказника. Отмечен ряд редких и нуждающихся в охране видов растений. Анализ флоры первого этапа исследований показал наличие 167 видов из 112 родов, относящихся к 40 семействам, с выделением ведущих. Из них 10 видов, относящихся к 9 родам из 6 семейств, внесены в Красную книгу Забайкальского края. Данная территория характеризуется как разнообразием лесных сообществ, так и островными реликтовыми участками горных степей, имеющих довольно высокое видовое разнообразие. Сохранение малонарушенных к настоящему времени природных сообществ и развитие механизмов неистощительного природопользования позволят сохранить биоразнообразие и экосистемные услуги данной территории.

Ключевые слова: ООПТ, Нерчуганский заказник, Забайкальский край, флора, хорологический анализ растительного покрова, редкие и нуждающиеся в охране виды растений

Формат цитирования: Баницикова Е.А., Желибо Т.В. Предварительные итоги изучения флоры Нерчуганского заказника (Забайкальский край) // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 139-144. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-139-144.

© Баницикова Е.А., Желибо Т.В., 2022

Original article

PRELIMINARY RESULTS OF THE STUDY OF THE FLORA OF THE NERCHUGANSKY RESERVE (ZABAIKALSKY KRAI)

BANSHCHIKOVA EKATERINA ANATOLJEVNA , junior researcher
kait1986@mail.ru

ZHELIBO TATJANA VITALJEVNA, junior researcher
zhelibot@mail.ru

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (INREC SB RAS);
672014, Russia, Zabaykalsky Krai, Chita, Nedorezova Str., 16a, Russia

The purpose of this work is to study the species composition and analysis of the flora of the «Nerchugansky» reserve. The Nerchugansky State Nature Reserve of regional significance was

created in the Tungokochensky District of Zabaikalsky Krai, part of the Far Eastern Federal District, with the support of WWF Russia to preserve its natural heritage. This large protected area is situated in the basin of the Amur River – in the valley of the Nercha River and its most important tributary, the Nerchugan. The importance of this PA in terms of environmental safety is explained by the fact that several large placer gold mines operate in the region, which has a significant negative impact on natural systems. The article presents the data of field studies of the terrestrial ecosystem of the reserve. As a result of the collected material, a systematic register of plant flora has been compiled with the allocation of leading families. The results of the chorological analysis are presented and the features of the formation of vegetation cover in this territory are revealed. The zonal and ecological classifications of the vegetation cover are distributed. The phytosozological analysis of the flora of the reserve was carried out. A number of rare and needy plant species have been identified. The analysis of the flora of the first stage of the study showed the presence of 167 species from 112 genera belonging to 40 families, with the selection of the leading ones. Of these, 10 species belonging to 9 genera from 6 families are included in the Red Book of the Zabaikalsky (Trans-Baikal) Krai. This area is characterized by a diversity of forest communities as well as isolated relict areas of mountain steppes with high species diversity. Preservation of intact natural communities and development of mechanisms of sustainable nature management will preserve biodiversity and ecosystem services of the territory.

Keywords: PA, «Nerchuganskiy nature reserve», Zabaikalsky Krai, flora, chorological analysis of plant cover, rare plant species in need of protection

Format of citation: Banshchikova E.A., Zhelibo T.V. Preliminary results of the study of the flora of the Nerchugansky reserve (Zabaikalsky krai) // Prirodoobustroystvo. – 2022. – № 5. – P. 139-144. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-139-144.

Введение. По инициативе Министерства природных ресурсов Забайкальского края, а также при активной поддержке Амурского филиала Всемирного фонда дикой природы (WWF) постановлением Правительства Забайкальского края от 18 декабря 2019 г. № 496 [1] создан государственный природный ландшафтный заказник регионального значения «Нерчуганский» согласно Федеральному закону от 14 марта 1995 г. № 33 РФ «Об особо охраняемых территориях» [2]. Общая площадь заказника составляет 252644,4 га и располагается на территории Тунгокоченского района Забайкальского края, входящего в состав Дальневосточного федерального округа.

Важность данной ООПТ с точки зрения экологической безопасности обусловлена тем, что в данном районе ведется масштабная добыча россыпного золота, оказывающая существенное негативное воздействие на природные системы. Результаты исследования необходимы для комплексной экологической оценки территории, экологического мониторинга и разработки методов контроля качества окружающей среды.

В Тунгокоченском районе развита золотодобывающая промышленность. На территории Нерчуганского заказника нет эксплуатируемых или перспективных месторождений полезных ископаемых.

С экологической точки зрения заказник имеет большое значение как территория, выполняющая важную водоохранную и водорегулирующую функцию, способствующая сохранению лесных и пресноводных экосистем

и связанных с ними охотничье-промысловых и редких, нуждающихся в охране, видов животных и растений. В частности, территория заказника имеет значение для сохранения редких охраняемых видов птиц, в том числе занесенных в Красную книгу Российской Федерации, а также 19 видов, занесенных в Красную книгу Забайкальского края. Кроме того, заказник представляет собой участок лесов, хорошо сохранившихся и сравнительно мало пострадавших от пожаров, и соответственно имеющих высокую экологическую ценность. Большая часть площади занята старовозрастными хвойными лесами. Данные сообщества выполняют важную водосберегающую функцию, обеспечивая водный режим такого крупного притока р. Шилка, как Нерча, и ее крупнейшего притока Нерчуган [3].

Целью работы стали изучение видового состава и анализ флоры Нерчуганского заказника, подведение первых итогов проведенных исследований.

Материалы и методы исследований. В работе по анализу флористического состава растений использованы материалы экспедиционных исследований по территории Тунгокоченского района и ныне созданного заказника, также сообщения ряда авторов.

Систематический реестр флоры растений сформирован по сводке С.К. Черепанова [4] с учетом изменений, отраженных в 1-13 томах издания «Флора Сибири» [5], с выделением ведущих семейств. Хорологический анализ и выявление особенностей формирования растительного

покрова на данной территории произведены при использовании классификации географических элементов со ссылкой на работы М.М. Силантьевой [6], А.Ю. Гребенниковой и др. [7]. Распределение поясно-зональной и экологической групп растительного покрова классифицировано по Л.И. Мальшеву и Г.А. Пешковой [8]. Фитосозологический анализ флоры заказника составлен согласно постановлению Правительства Забайкальского края «Об утверждении Перечня объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу Забайкальского края» [9].

Согласно геоморфологическому районированию территория заказника входит в Забайкальское среднегорье [10]. По гребню хребта Черского проходит линия Мирового водораздела между Северным Ледовитым и Тихим океанами. Территория Нерчуганского заказника относится к бассейну стока Тихого океана.

Природно-климатические условия территории Тунгокоченского района характеризуется резко континентальным климатом с большими колебаниями годовых и суточных амплитуд температуры. Тунгокоченский район приравнен к районам Крайнего Севера [11].

По геоботаническому районированию СССР район исследования входит в состав Средне-Сибирской провинции Восточно-Сибирской подобласти светлохвойных лесов, входящей в состав Евразийской хвойно-лесной (таежной) области [12].

Доминирующим типом растительности на территории заказника являются леса. Значительные площади занимают смешанные лиственнично-березовые леса и чистые лиственничники, березняки, и лишь небольшие участки занимают сосновые насаждения. По долинам рек, относительно широким падям распространены кустарниковые сообщества. Луговые сообщества встречаются наиболее часто с редким участием древостоя.

Результаты и их обсуждение. На начальных этапах обследования данной территории составлен систематический реестр наземных экосистем с выделением 167 видов из 112 родов, относящихся к 40 семействам, анализ которых представлен в таблице.

В ходе проведенных исследований во флористическом спектре Нерчуганского заказника выделены ведущие семейства: *Rosaceae* (21 вид, 16 родов), *Asteraceae* (13 видов, 8 родов), *Liliaceae* и *Ranunculaceae* (по 11 видов, 7 родов), *Salicaceae* (11 видов, 3 рода).

Проведенный хорологический анализ выявил особенности формирования растительного покрова данной территории (рис. 1).

Таблица
Систематическая структура флоры
заказника «Нерчуганский»

Table

Systematic structure of the flora
of the «Nerchuganskiy» nature reserve

Семейство <i>Family</i>	Число видов <i>Number of species</i>	%	Число родов <i>Number of genere</i>	%
Equisetaceae	2	1.2	1	0.9
Woodsiaceae	1	0.6	1	0.9
Aspidiaceae	1	0.6	1	0.9
Pinaceae	2	1.2	2	1.8
Poaceae (Gramineae)	8	4.8	7	6.3
Cyperaceae	5	3.0	1	0.9
Liliaceae	11	6.6	7	6.3
Iridaceae	2	1.2	1	0.9
Orchidaceae	1	0.6	1	0.9
Salicaceae	11	6.6	3	2.7
Betulaceae	3	1.8	2	1.8
Urticaceae	1	0.6	1	0.9
Polygonaceae	5	3.0	4	3.6
Chenopodiaceae	1	0.6	1	0.9
Cariophyllaceae	6	3.6	5	4.5
Ranunculaceae	11	6.6	7	6.3
Papaveraceae	2	1.2	1	0.9
Brassicaceae	3	1.8	2	1.8
Crassulaceae	4	2.4	2	1.8
Saxifragaceae	2	1.2	2	1.8
Grossulariaceae	3	1.8	1	0.9
Rosaceae	21	12.6	16	14.3
Fabaceae (Leguminosae)	10	6.0	5	4.5
Geraniaceae	6	3.6	2	1.8
Violaceae	1	0.6	1	0.9
Onagraceae	1	0.6	1	0.9
Apiaceae (Umbelliferae)	4	2.4	4	3.6
Cornaceae	1	0.6	1	0.9
Pyrolaceae	1	0.6	1	0.9
Ericaceae	4	2.4	4	3.6
Primulaceae	5	3.0	3	2.7
Gentianaceae	1	0.6	1	0.9
Polemoniaceae	1	0.6	1	0.9
Lamiaceae (Labiatae)	3	1.8	3	2.7
Scrophulariaceae	2	1.2	2	1.8
Rubiaceae	2	1.2	1	0.9
Caprifoliaceae	3	1.8	2	1.8
Valerianaceae	2	1.2	2	1.8
Campanulaceae	1	0.6	1	0.9
Asteraceae (Compositae)	13	7.8	8	7.1
Всего в 40 семействах <i>Total in 40 families</i>	167	100	112	100



Рис. 1. Хорологическая структура флоры заказника «Нерчуганский»

Fig. 1. The chorological structure of the flora of the «Nerchuganskiy» nature reserve

Растительный покров территории сформирован под влиянием геоэлементов: евроазиатского – 19,2% (например, *Pinus sibirica* Du Tour or (Loudon) Mayr, *Populus tremula* L., *Spiraea media* Franz Schmidt и др.); бореально-голарктического – 18,0% (*Vaccinium uliginosum* L., *Rhodococcum vitis-idaea* L. s.str., *Ledum palustre* L. s.str. и др.). Широко представлены также элементы: североазиатский – 11,4% (*Swida alba* (L.) Opiz, *Rubus sachalinensis* Levl., *Valeriana alternifolia* Ledeb. и др.); восточно-азиатский – 11,4% (*Malus baccata* (L.) Borkh., *Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn, *Ribes fragrans* Pallas и др.); южно-сибирский и монгольский – 10,2% (*Salix kochiana* Trautv., *Lonicera pallasii* Ledeb., *Patrinia rupestris* (Pallas) Dufr. и др.). В меньшей степени отображены во флоре виды с ареалами, относящимися к центрально-азиатскому – 0,6% (*Aconogonon angustifolium* (Pallas) Nara) и северо-восточно-азиатскому – 1,8% (*Rumex gmelinii* Turcz. ex Ledeb.) географическим элементам.

Распределение поясно-зональной и экологической классификаций флоры заказника представлено на рисунке 2.

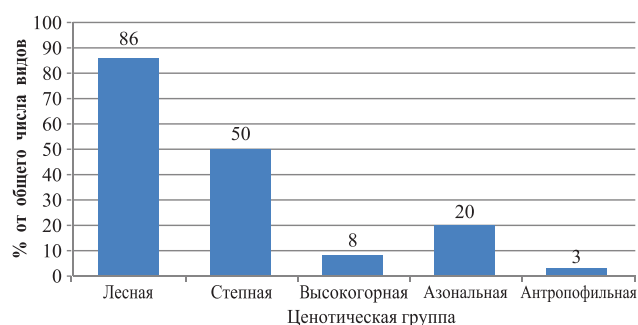


Рис. 2. Ценоотическая структура флоры заказника «Нерчуганский»

Fig. 2. Cenotic structure of the flora of «Nerchuganskiy» nature reserve

Преобладающие виды относятся к Лесному комплексу (86%), который представлен тремя группами: темнохвойные, светлохвойные и пребореальные. Из них наибольшая доля (60%) приходится на светлохвойные группы (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr., *Pinus sylvestris* L., *Betula fruticosa* Pallas и др.), а наименьшая – на темнохвойные (6%): *Equisetum sylvaticum* L., *Linnaea borealis* L., *Smilacina trifolia* (L.) Desf. и др. Степной комплекс (50%) складывается из лесостепной, горно-степной, собственно степной и пустынно-степной групп. Основу этого комплекса составляют группы: лесостепная (такие виды, как *Elymus dahuricus* Turcz. ex Griseb., *Carex pediformis* C.A. Meyer, *Pulsatilla multifida* (G. Pritzel) Juz. и др.); горно-степная (*Polygonatum sibiricum* Delaroché, *Thymus dahuricus* Serg., *Dendranthemum zawadskii* subsp. *zawadskii* и др.), – в равных долях (по 22%). Наименьшее количество процентов в степном комплексе занимает группа собственно степная (6%), а представители пустынно-степной группы на территории заказника на период исследований не обнаружены (0%).

Следующий комплекс «Азональный» является менее встречаемым – 20%. В свою очередь, он представлен 4 группами: водная, водно-болотная, прирусловая и луговая. Наибольший вклад в этот комплекс вносит луговая группа – 10% (например, *Polemonium racemosum* (Regel) Kitamura, *Persicaria scabra* (Moench) Mold., *Veronica longifolia* L. и др.), наименьший приходится на прирусловую (3%) и водную (0%) группы.

Следует отметить, что водная растительность в период экспедиционных исследований и большого подъема воды на реках не исследовалась. Особое внимание было уделено наземным экосистемам.

Высокогорный и горный общепоясной комплекс видов и его поясно-зональные группы растений представлены 8% (*Ribes fragrans*, *Salix glauca* L., *Rheum compactum* L., *Woodsia ilvensis* (L.) R. Br. и др.). Несмотря на удаленность территории заказника и его труднопроходимую местность, антропофильный комплекс также присутствует – 3% (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medicus, *Galeopsis bifida* Boenn., *Erodium stephanianum* Willd.).

При проведении фитосозологического анализа редких и нуждающихся в охране видов растений Нерчуганского заказника выявлено 10 видов, относящихся к 9 родам из 6 семейств, внесенных в Красную книгу Забайкальского края. Наибольшее число редких видов представлено семейством *Liliaceae* (5 видов, 4 рода), остальные содержат по одному виду. Большинство представленных редких

видов имеют вторую категорию статуса редкости (уязвимый вид) согласно параметрам, принятым в Красной книге Plant Red Data Book Международного союза охраны природы (IUCN): *Phlojodicarpus sibiricus* (Fisch. Ex Spreng.) K. – Pol., *Hemerocallis minor* Mill., *Lilium pumilum* Delile, *Lilium pensylvanicum* Ker-Gawl., *Irissan guinea* Hornem., *Cypripedium guttatum* Sw., *Allium altaicum* Pall. Два вида имеют третью категорию (редкий вид): *Convallaria keiskei* Miq., *Rhodiola rosea* L. Один вид имеет четвертую категорию (неопределенные по статусу): *Atragene ochotensis* Pall.

Один из видов – *Rhodiola rosea* – включен в Красную книгу РФ. Максимальное разнообразие редких и охраняемых видов растений наблюдается в чистых лиственничных и березовых лесах либо в смешанных сообществах, в меньшей степени – в луговых.

Библиографический список

1. О создании государственного природного ландшафтного заказника регионального значения «Нерчуганский»: постановление Правительства Забайкальского края от 18 декабря 2019 г. № 496. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/561667381>.
2. Об особо охраняемых природных территориях: Федеральный закон от 14 марта 1995 г. № 33-ФЗ: принят Государственной Думой 15 февраля 1995 г. – URL: <https://rg.ru/documents/2021/01/12/priroda-dok.html>.
3. В Забайкальском крае создан заказник «Нерчуганский». – [Электронный ресурс]. – URL: <https://wwf.ru/resources/news/amur/v-zabaykalskom-krae-sozdan-zakaznik-nerchuganskiy/> (дата обращения: 10.03.2022).
4. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). – СПб.: Агропромиздат, 1995. – 990 с.
5. Флора Сибири: В 14 т. / АН СССР, Сибирское отделение, Центральный сибирский ботанический сад; Под ред. проф. Л.И. Малышева, Г.А. Пешковой. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990.
6. Силантьева М.М. Хорологический анализ аборигенной фракции флоры Алтайского края // Материалы 7-й Международной научно-практической конференции «Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии». – Барнаул: АлтГУ, 2008. – С. 312-322.
7. Гребенникова А.Ю., Митус А.А., Сперанская Н.Ю. Особенности флоры государственного комплексного природного заказника регионального значения «Озеро Большой Тассор» // Известия Алтайского государственного университета. – 2013. – № 3-2 (79). – С. 61-64.
8. Малышев Л.И., Пешкова Г.А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). – Новосибирск: Наука, 1984. – 265 с.
9. Об утверждении Перечня объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу Забайкальского края: постановление Правительства Забайкальского края от 16 февраля 2010 г. № 52, с изм. на 28 августа 2018 г. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/550189017>.
10. Атлас Забайкальского края. – Чита, 2010. – 48 с.

Выводы

Таким образом, территория заказника «Нерчуганский» характеризуется рядом важных экологических особенностей и экологических функций, обеспечивающих экосистемные услуги, предназначенные для сохранения наиболее северных водотоков в бассейне р. Амур. По предварительным итогам исследований флоры, выявлено наличие 167 видов из 112 родов, относящихся к 40 семействам, с выделением ведущих: *Rosaceae*, *Asteraceae*, *Liliaceae*, *Ranunculaceae* и *Salicaceae*. Из них 10 видов, относящихся к 9 родам из 6 семейств, внесены в Красную книгу Забайкальского края: *Rhodiola rosea*, *Phlojodicarpus sibiricus*, *Convallaria keiskei*, *Cypripedium guttatum* и др. Проведение периодических исследований по уточнению биоразнообразия и выявлению местообитаний редких видов позволит обогатить полученный материал дополнительной информацией.

References

1. Postanovlenie Pravitelstva Zabajkalskogo kraya «O sozdanii gosudarstvennogo prirodnogo landshaftnogo zakaznika regionalnogo znacheniya «Nerchuganskiy»» № 496 ot 18 dekabrya 2019 g. <https://docs.cntd.ru/document/561667381>
2. Federalnyj zakon «Ob osobo ohranyaemyh prirodnih territoriyah» № 33 ot 14.03.1995 g. FZ: prinyat Gos. dumoj 15 fevralya 1995 g. <https://rg.ru/documents/2021/01/12/priroda-dok.html>
3. V Zabajkalskom krae sozdan zakaznik «Nerchuganskiy». – [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://wwf.ru/resources/news/amur/v-zabaykalskom-krae-sozdan-zakaznik-nerchuganskiy/> (data obrashcheniya: 10.03.2022).
4. Cherepanov S.K. Sosudisty'e rasteniya Rossii i sopredelny gosudarstv (v predelax byvshego SSSR). – SPb.: Agropromizdat, 1995. – 990 s.
5. Flora Sibiri: V 14 t. / AN SSSR. Sib. otd-nie. Tsent. sib. botan. sad; Pod red. doktorov biol. nauk, prof. L.I. Malysheva, G.A. Peshkovo. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1990 ISBN5-02-028948-5
6. Silantjeva M.M. Horologicheskij analiz aborigennoj frakcii flory` Altajskogo kraya / V kn.: Materialy` 7oj Mezhdun. nauchno-prakt. konf. «Problemy` botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongolii». – Barnaul: AltGU, 2008. – S. 312-322.
7. Grebennikova A.Yu., Mitus A.A., Speranskaya N.Yu. Osobennosti flory` gosudarstvennogo kompleksnogo prirodnogo zakaznika regionalnogo znacheniya «Ozero Bolshoj Tassor» // Izvestiya Altajskogo gos. un-ta. – 2013. – № 3-2(79). – S. 61-64.
8. Malyshev L.I., Peshkova G.A. Osobennosti i genezis flory` Sibiri (Predbaikalje i Zabajkalje). – Novosibirsk: Nauka, 1984. – 265 s.
9. Postanovlenie Pravitelstva Zabajkalskogo kraya «Ob utverzhdenii Perechnya objektov rastitelnogo mira, zanesennyh v Krasnuyu knigu Zabajkalskogo kraya» za № 52 ot 16 fevralya 2010 g. (s izmeneniyami na 28 avgusta 2018 goda) <https://docs.cntd.ru/document/550189017>
10. Atlas Zabajkalskogo kraya. – Chita, 2010. – 48 s. <http://rf-town.ru/1364780.html>

11. Об утверждении лесохозяйственного регламента Тунгокоченского лесничества: приказ Министерства природных ресурсов Забайкальского края от 29 декабря 2018 г. № 87-н/п. – URL: <https://minprir.75.ru/deyatelnost/upravlenie-lesopol-zovaniya/176800-lesnoy-plan-i-lesohozyaystvennyye-reglamenti-2019-2028-g-g-s-izmeneniyami>.

12. Геоботаническое районирование СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 152 с.

Критерии авторства

Банщикова Е.А., Желибо Т.В. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 21.09.2022

Одобрена после рецензирования 18.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022 г.

11. Prikaz Ministerstva prirodnih resursov Zabajkalskogo kraya «Ob utverzhdenii lesohozyaystvennogo reglamenta Tungokochenskogo lesnichestva» № 87-n/p ot 29 dekabrya 2018 g. <https://minprir.75.ru/deyatelnost/upravlenie-lesopol-zovaniya/176800-lesnoy-plan-i-lesohozyaystvennyye-reglamenti-2019-2028-g-g-s-izmeneniyami>

12. Geobotanicheskoe rajonirovanie SSSR. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1947. – 152 s.

Criteria of Authorship

Banshchikova E.A., Zhelibo T.V. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Banshchikova E.A., Zhelibo T.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 21.09.2022

Approved after reviewing 18.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022