



Учредители:

ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»,
ФГБНУ ВНИИ «Радуга», АНО «Редакция журнала
«Мелиорация и водное хозяйство»

Издается с апреля 1949 года

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

СТРАНИЦА РЕДАКТОРА

Гулюк Г.Г. И опять о культурных долголетних пастбищах. . . 2

Хисматуллин М.М. Монография «Научные основы системы управления генетическими ресурсами зерновых культур» 2

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ: ЗАПАСЫ И КАЧЕСТВО

Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И. Влияние выноса тяжелых металлов из донных отложений водоемов на качество воды 4

ГИДРОТЕХНИКА, ГИДРАВЛИКА

Качаев А.Е., Турапин С.С. Численное моделирование устойчивости грунтовой плотины при различном заполнении водохранилища 9

Талалаева В.Ф., Баев О.А., Колганов А.В. Результаты оценки технического состояния водопроводящей сети каналов и сооружений Республики Калмыкия 12

МЕЛИОРАТИВНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ

Дубенок Н.Н., Маркин В.Н., Солошенко А.Д., Шабанов В.В. Почвенные водохранилища 17

МЕЛИОРАЦИЯ И УРОЖАЙ

Тарбаев В.А., Янюк В.М., Тарасенко П.В. Проектная урожайность в системе оценки агропроизводительной способности орошаемых земель 25

Дубенок Н.Н., Гемонов А.В., Лебедев Д.А. Технология возделывания баклажан при капельном орошении в условиях Центрального Нечерноземья 31

НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕЛИОРАЦИИ

Ольгаренко В.И., Ольгаренко И.В., Коржов И.В., Ольгаренко В.И. Функции планирования водопользования на оросительных системах с использованием современных ИТ-технологий. 34

ОСУШЕНИЕ

Пономарев А.Б., Янко Ю.Г., Штыков В.И. Повышение эффективности действия осушительных систем путем расположения дрена в два яруса 40

ИНФОРМАЦИЯ

Алексею Семёновичу Овчинникову — 75 лет 44

EDITOR'S PAGE

Guliuk G.G. And again about cultural long-term pastures 2

Khismatullin M.M. Monograph «Scientific foundations of the management system of genetic resources of grain crops» 2

WATER RESOURCES: RESERVES AND QUALITY

Tolkachev G. Yu., Korzhenevskiy B.I. The effect of removal of heavy metals from the sediments of reservoirs on water quality 4

HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS

Kachaev A.E., Turapin S.S. Numerical modeling of the stability of an earth dam with different reservoir filling 9

Talalaeva V. F., Baev O. A., Kolganov A.V. The results of the technical condition assessment water supply network of canals and structures the Republic of Kalmykia. . . . 12

RECLAMATION AGRICULTURE

Dubenok N.N., Markin V.N., Soloshenkov A.D., Shabanov V.V. Soil reservoirs 17

MELIORATION AND HARVEST

Tarbaev V.A., Yanyuk V.M., Tarasenko P.V. Project yield in the system of assessment of agricultural productivity of irrigated lands. 25

Dubenok N.N., Gemonov A.V., Lebedev D.A. Technology of eggplant cultivation with drip irrigation in the conditions of the central Non-Black Earth Region 31

SCIENTIFIC ENSURING MELIORATION

Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Korzhov I.V., Olgarenko V.I. Water use planning functions in irrigation systems using modern IT technologies 34

DRAINAGE

Ponomarev A.B., Yanko Yu.G., Shtykov V.I. Improving the efficiency of drainage systems by arranging drains in two tiers 40

INFORMATION

A.S. Ovchinnikov is 75 years old 44

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-61128 от 03.04.2015.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), полные тексты статей доступны на сайте <https://elibrary.ru>.

Формат 60x84/8. Усл. печ. л. 6,0. Тираж 1000 экз.

Верстка Т.Б. Самсонова

Адрес редакции: 127550, Москва, Б. Академическая, д. 44, корп. 2. Тел./факс (499) 976-02-71. E-mail: mivh@mail.ru, <http://mivh.vniigim.ru>

Главный редактор – Г.Г. ГУЛЮК

Редакционный совет:

М.В. БОРОВОЙ, М.В. ГЛИСТИН, Н.К. ДОЛГУШКИН, Н.Н. ДУБЕНОК, Д.В. КОЗЛОВ, А.В. КОЛГАНОВ, И.П. КРУЖИЛИН, А.П. ЛИХАЦЕВИЧ, Я.П. ЛОБАЧЕВСКИЙ, С.Г. МИТИН, П.А. МИХЕЕВ, В.И. ОЛЬГАРЕНКО, Г.В. ОЛЬГАРЕНКО, Н.Н. СОЛОДЧУК, Т.Г. СТЕПАНОВА, В.И. ТРУХАЧЁВ, М.М. ХИСМАТУЛЛИН, В.А. ШЕВЧЕНКО, В.Н. ЩЕДРИН, В.П. ЯКУШЕВ, С.В. ЯХНЮК

Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов публикаций.

И ОПЯТЬ О КУЛЬТУРНЫХ ДОЛГОЛЕТНИХ ПАСТБИЩАХ



Г.Г. ГУЛЮК

Вернуться в недалекое прошлое исторически важно. Разговор пойдет об одном из хозяйств Смоленской области, которое при проведении мелиоративных мероприятий перевыполнило задание по продажам государству основных продуктов земледелия и животноводства. С общей площади посевов было собрано 24,1 ц/га зерна, получен неплохой урожай картофеля, льна, кормовых культур. Надои молока на козову составили 3250 кг, на 228 кг больше, чем предыдущие. Возросла продажа продукции государству. Без преувеличения могу сказать – эти высокие показатели для Смоленской области являются результатом, в первую очередь, широкой мелиорации.

В хозяйстве 5328 тыс. га сельскохозяйственных угодий, в том числе 3484 га пашни. Свыше 30 % сельскохозяйственных угодий – естественные луга и пастбища, как правило, мелкого залегания торфяники, расположенные в пойме рек Вероница, Поповка и Тарбынька. 10 лет назад большая часть этих земель была переувлажнена и заболочена, хозяйство получало на них трав не более 8...10 ц/га в пересчете на сено. При такой интенсивности эти угодья не могли обеспечить кормами растущее поголовье крупного рогатого скота, повышение его продуктивности.

После известных событий 1966 г. в колхозе приступили к широкой мелиорации заболоченных и закустаренных земель, к созданию на них высокопродуктивных сенокосов и пастбищ. Общими усилиями ПМК-12 и хозяйства было расчищено от кустарника 500 га, осушено 1337 га, в том числе закрытым дренажем 646 га, проведены коренные улучшения угодий на площади 1149 га. В колхозе начал действовать специальный мелиоратив-

ный отряд, возглавляемый агрономом. В задачи отряда входили: добыча фрезерного торфа для удобрений, проведение культуртехнических работ на мелиорируемых землях, уход за осушенными землями.

После проведения мелиоративных работ с каждого гектара улучшенных угодий стали собирать по 30...40 ц высококачественного сена, 30 ц ячменя и почти 150 ц картофеля. Среднегодовое производство кормов в пересчете на условную голову скота возросло с 19 до 25 ц кормовых единиц. В результате укрепления кормовой базы в пересчете на 100 га сельскохозяйственных угодий производится 415 ц молока и 57 ц мяса.

Окрепла экономика хозяйства. Чистый доход возрос с 255 до 521 тыс. руб., понимая, что 70 % прироста чистого дохода получено за счет мелиорации земель. Опыт использования неорошаемых пастбищ показал, что примерно 3/5 общего урожая трав приходится на май-июнь. С целью получения трав в зеленой массе на пастбище в течение всего периода вегетации потребовалось строительство оросительной системы.

Культурные пастбища создаются на легких подзолистых почвах, поэтому высокопродуктивное лугово-пастбищное хозяйство немислимо без приложения минеральных удобрений. Оправданная норма удобрений на пастбищах обеспечивает 8,3 тыс. кормовых единиц с 1 га при нормальных условиях удобрения и увлажнения почвы. Урожай трав при этом повышается до 12,8 тыс. кормовых единиц с 1 га.

Руководители государственных бюджетных учреждений! Прошу с текущего года обратить внимание на улучшение и запуск в эксплуатацию орошаемых долголетних культурных пастбищ. В этом смысл реализации государственной программы.

Гулюк Георгий Григорьевич, доктор с.-х. наук, главный редактор (Журнал «Мелиорация и водное хозяйство»).

МОНОГРАФИЯ «НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР»

М.М. ХИСМАТУЛЛИН

В монографии, изданной в Казанском государственном аграрном университете в 2025 г., представлены результаты многолетних научных исследований по разработке системы управления генетическими ресурсами зерновых культур в условиях усиления аридности и растущих природно-климатических рисков. Приведены обобщенные результаты теоретических и экспериментальных исследований, патентно-лицензионной деятельности, опытно-конструкторских работ, освоения серийного производства машин и оборудования, внедренческой работы, практического опыта и другие материалы в области селекции, семеноведения, семеноводства и мелиорации.

Зерновой комплекс Российской Федерации является основой ее продовольственной безопасности и конкурентоспособности сельского хозяйства на мировом

аграрном рынке. Устойчивый рост производства зерна в ближайшее время остается приоритетным направлением государственной аграрной политики. В решении данной задачи особое место занимает эффективное управление генетическими ресурсами растений – селекция и семеноводство, в том числе на орошаемых землях. Именно поэтому монография, подготовленная коллективом авторов из Республики Татарстан, Ульяновской и Свердловской областей, имеет несомненную актуальность и практическую значимость для АПК страны.

В монографии представлены материалы многолетних исследований авторов по особенностям селекции различных сельскохозяйственных культур на экологическую пластичность, урожайность и качественные характеристики продукции; научные основы создания но-

вых биопрепаратов и интегрированной защиты растений на их основе; адаптивных агротехнологий производства зерна и семян, в том числе с применением технических средств и инновационных дождевальных машин нового поколения, обеспечивающих получение семян высокого качества с сохранением их репродуктивного потенциала.

В работе приводится глубокий анализ климатических рисков при производстве зерна, а также необходимость в обосновании разработке стратегии адаптации к ним.

Детальный анализ результатов работы селекционеров Казанского ГАУ, Ульяновского НИИСХ филиала СамНЦ РАН, ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН», Татарского НИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН, Ассоциации «Элитные семена Татарстана» и мелиораторов Республики Татарстан позволяет сделать вывод о том, что имеется готовый набор решений в виде адаптивных сортов зерновых культур и технологий, использование которых позволяет значительно снизить ущерб климатических изменений на зерновой комплекс регионов России с устойчивым увлажнением. Данные сорта возделываются в различных природно-экономических зонах страны и показывают хорошие производственные результаты.

Очень ценным материалом является глава, посвященная опыту работы Ассоциации «Элитные семена Татарстана», которая уже с 1996 г. обеспечивает практическую интеграцию усилий селекционных центров, семеноводческих предприятий, государственных органов и сельских товаропроизводителей. Полученные результаты позволяют использовать ее успешный опыт и в других регионах России.

В главе, посвященной техническим решениям в области семеноводства, приводится теоретическое обосно-

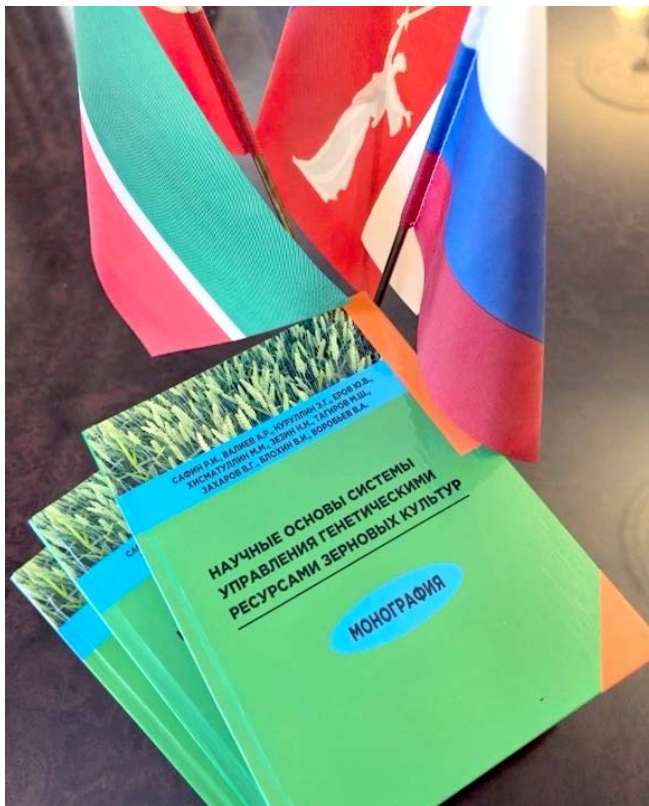
вание конструктивно-технологических параметров новых протравочных машин, разработанных и внедренных учеными Татарстана, а также данные по новым универсальным зерноочистительно-семясортировальным машинам пневмомеханического типа и семенных линий на их основе.

В главе монографии, посвященной разработке адаптивных сортов агротехнологий зерновых культур, приводятся рекомендации по основным элементам технологии и интегрированным системам защиты растений с максимальным использованием биопрепаратов производства Республики Татарстан.

Очень важной является глава, посвященная оптимизации орошения на семенных посевах зерновых культур. С учетом роста засушливости климата и увеличения площади орошаемых земель разработка системы орошения в семеноводстве имеет несомненную актуальность. В разделе монографии «Семеноводство с орошением» представлено обоснование эффективности технологий производства сельскохозяйственных культур при орошении и результаты исследования технологии производства семян зерновых культур с орошением. В разделе также приводится анализ имеющейся в России техники для орошения сельскохозяйственных культур и требования, предъявляемые к ним, научно-технические основы разработки техники нового поколения для орошения, а также результаты внедрения модельного ряда широкозахватной дождевальной машины кругового действия «Казанка» производства ООО «Казанский завод оросительной техники».

Авторами научной работы являются:

1. Сафин Радик Ильясович, заведующий кафедрой «Общее земледелие, защита растений и селекция», ФГБНУ ВО «Казанский государственный аграрный университет».



2. Валиев Айрат Расимович, ректор ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет».

3. Нуруллин Эльмас Габбасович, профессор кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе, ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет».

4. Еров Юрий Васильевич, генеральный директор, Ассоциация по производству семян зерновых культур «Элитные семена Татарстана».

5. Хисматуллин Марс Мансурович, директор ФГБУ «Управление мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения по Приволжскому федеральному округу».

6. Зезин Никита Николаевич, директор, ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук».

7. Тагиров Марсель Шарипзянович, генеральный директор, ООО «Агротехнологии».

8. Захаров Владимир Григорьевич, главный научный сотрудник отдела селекции, Ульяновский научно-исследовательский института сельского хозяйства имени Н.С. Немцева – филиал ФГБНУ Самарского федерального исследовательского центра РАН.

9. Блохин Василий Иванович, ведущий научный сотрудник, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подраз-

деление ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

10. Воробьев Владимир Александрович, главный научный сотрудник лаборатории селекции и первичного семеноводства, Красноуфимский селекционный центр Уральского научно-исследовательского института сельского хозяйства – ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук».

Достоинством научно-внедренческой работы является ее многолетний характер и тесная интеграция исследований с практической работой семеноводческих хозяйств и сельских товаропроизводителей.

Объем монографии 528 страниц, тираж – 1000 экз.

Монография может быть полезна для научных работников, практической деятельности руководителей и специалистов предприятий АПК, для обучения студентов по профильным направлениям в высших учебных заведениях.

На монографию получена рецензия ведущих ученых России: академика РАН В.М. Косолапова, академика РАН А.А. Завалина, член-корреспондента РАН А.И. Прянишникова.

Хисматуллин Марс Мансурович, доктор с.-х. наук, директор (ФГБУ «Управление «Приволжскмелиоводхоз»).

УДК 627.157:002.637 (282.247.41)

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-4-8

ВЛИЯНИЕ ВЫНОСА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОЕМОВ НА КАЧЕСТВО ВОДЫ

Г.Ю. ТОЛКАЧЕВ, Б.И. КОРЖЕНЕВСКИЙ

Ключевые слова: водные объекты, тяжелые металлы, донные отложения, вторичное загрязнение, Ивановское водохранилище.

Keywords: water bodies, heavy metals, sediments, secondary pollution, Ivan'kovo reservoir.

Аннотация. Рассмотрены современные актуальные геоэкологические аспекты изучения загрязнений донных отложений водных объектов тяжелыми металлами и As, а так же возможное вторичное загрязнение водной толщи этими элементами, иммобилизованными из донных отложений. Валовое содержание загрязнителей в толще донных отложений не всегда соответствуют реальной их опасности. Объективно вредной является чаще всего десятисантиметровая толща приповерхностных иловатых донных отложений, которая при различных геоэкологических условиях может являться как сорбентом, так и источником вторичного загрязнения. Рассмотрены активные формы отложений, которые при определенных физико-химических условиях заведомо могут являться источниками вторичного загрязнения водной толщи. Даны рекомендации по необходимым действиям, предшествующим использованию вод для хозяйственной деятельности.

Abstract. The article considers modern relevant geoecological aspects of studying pollution of the sediments of water bodies by heavy metals and As, as well as possible secondary pollution of the water column with these elements immobilized from the sediments. The gross content of pollutants in the thickness of sediments does not always correspond to their real danger. Objectively harmful is most often a 10-centimeter thickness of near-surface silty sediments, which under various geoecological conditions can be both a sorbent and a source of secondary pollution. The article considers active forms of sediments, which under certain physical and chemical conditions can obviously be sources of secondary pollution of the water column. Recommendations are given on the necessary actions preceding the use of water for the economic activities.

Введение. Весьма нежелательными и опасными в повышенных концентрациях в водных объектах за-

грязняющими веществами, являются микроэлементы Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, As. В качестве интегрального показателя техногенной нагрузки на водный объект рассматривается степень загрязнения донных отложений (ДО), которая является информацией об интенсивности и направленности инженерно-хозяйственной деятельности на водосборной территории, а также показателем работы очистных сооружений или их отсутствия. Изучение загрязнения ДО водных объектов химическими элементами продолжает оставаться одной из важных проблем геоэкологии и охраны окружающей среды. При этом водные объекты являются конечным звеном и потенциальным барьером в природно-техногенной ландшафтно-каскадной системе любой водосборной территории. Использование водных объектов и сопредельных территорий требует изучения их экологического состояния и оценки уровня техногенной нагрузки, при этом отсутствие формальной нормативной базы по содержанию тяжелых металлов (ТМ) в ДО водоемов привело к различным и многообразным подходам и методам оценки техногенной нагрузки.

Режимные наблюдения за состоянием ДО водных объектов – важный, а в большинстве случаев необходимый элемент изучения их геоэкологического состояния, поскольку сами отложения аккумулируют и трансформируют техногенное воздействие, являясь при этом ин-

дикатором его уровня. Наличие и содержание ТМ в ДО определяется гидродинамическими характеристиками потока, физико-химическими процессами, связанными с ТМ, а также их взаимодействием с квазистационарной сорбирующей фазой. Возможны следующие механизмы выноса ТМ из ДО: диффузия в ионной или связанной форме; конвекция вследствие фильтрации по порам ДО вод; взмучивание при изменении гидродинамических условий в придонном слое. Комплексные соединения могут активизировать десорбцию ТМ из взвешенного материала и ДО и негативно влиять на имеющиеся природные адсорбционные процессы, увеличивая концентрацию растворенных металлов в водной массе [1].

Степень накопления либо выноса ТМ из ДО зависит от концентраций комплексных соединений, изменения рН, форм металлов, присутствующих в суспензионном материале и взаимодействия их катионов. Образование прочных растворимых комплексов с органическими лигандами — один из наиболее реальных путей десорбции ТМ из ДО. Устойчивость комплексных соединений с ростом рН увеличивается. Это, вероятно, связано с повышением активности комплексобразующих центров при понижении кислотности.

Активный необратимый восстановитель, взаимодействующий с «ионной» системой ДО — растворенное органическое вещество, образующееся при распаде захороненных органических осадков. Мощность окисленного слоя осадков определяется соотношением интенсивностей диффузионного потока O_2 через границу «вода–ДО» при распаде органического вещества. Чем медленней затухает распад, тем на меньшую глубину в ДО проникает растворенный O_2 [2]. Таким образом, содержание O_2 в верхнем слое ДО и, соответственно, в придонном слое водной массы водоема непосредственно влияет на процессы накопления-выноса ТМ в системе «вода–ДО».

Валовое содержание ТМ является важным показателем, однако оно не указывает на опасность токсических эффектов при вторичном загрязнении водных масс. В большинстве исследований, посвященных частицам металлов в природных водных системах (т. е. металлам, связанных с взвешенными веществами или ДО), рассматривается их общая концентрация. Также необходимо оценивать их содержание и распределение по формам существования в ДО — поскольку именно от форм существования зависит миграция и массообмен в системе «вода–ДО».

Объекты и методы исследования. Отбор проб ДО осуществляется в зависимости от целей исследований. Более трех десятков лет нами используется следующий подход. Водный объект разбивается на серию створов — в каждом створе пробы ДО должны характеризовать водный объект или его часть за определенный промежуток времени, объем проб должен быть достаточным для выполнения запланированных аналитических лабораторных исследований. В каждом створе отбирается несколько проб в зависимости от гидрологических характеристик и их особенностей на данном участке водного объекта. При использовании методики [3, 4] достаточно отбирать пробы весом 300...500 г.

Далее выделяется «сорбирующая фракция» размером менее 0,02 мм — мокрым просеиванием, выпаривается и высушивается, до воздушно-сухого состояния в сушильных шкафах при температуре не выше +60 °С. При длительном хранении пробы рекомендуется замораживать до –20 °С [3]. Определение концентраций ТМ в пробах ДО проводится методами ИСП и атомной адсорбции (Сд) — после их разложения в «царской водке».

Обоснование точек отбора не носит унифицированного характера, т. к. участки различных категорий являются в некоторой степени уникальными и требуют индивидуального подхода. В целом необходимо соблюдать следующие принципы [5, 6]:

- на участках I категории при первичных обследованиях необходимо опробовать 2...4 точки по створам водохранилища или реки на участках ниже промышленно-селитебных агломераций и на условно чистых участках; при повторных отборах следует корректировать пункты опробования в соответствии с целями исследования и результатами предыдущих отборов;
- на участках II категории, т. е. в районах промышленно-гражданского освоения территории створы опробования следует размещать выше и ниже объекта обследования на первичной стадии с корректировкой или сохранением предыдущих мест опробования в зависимости от полученных результатов [3];
- на участках III категории рекомендуется отбирать несколько проб в наиболее интересных местах малых рек;
- участки IV категории — индивидуальны и здесь специфика отбора проб зависит от цели исследования [5, 6].

При изучении загрязнения ДО ТМ существует устоявшийся подход в виде учета гранулометрического состава отложений [7–9]. В работе приведены уровни содержания в ДО ТМ — Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, Fe и Mn, а так же As. Уровень аккумуляции ТМ в ДО оценивался с помощью «индекса геоаккумуляции» [4], который характеризует кратность загрязнения ДО (относительно природного фона) во фракциях грунта <20 мкм. ДО подразделяются на классы качества по каждому ТМ и As.

При определении распределения ТМ по формам существования, особое внимание уделялось выбору фракций ДО (активные формы), на которые могут повлиять различные условия окружающей среды. Использовался метод [10], позволяющий определить, с какими компонентами ДО связываются те или иные микроэлементы. Применение последовательных экстракций, хотя и требует значительного времени, предоставляет подробную информацию о происхождении, способе появления, биологической и физико-химической доступности, мобилизации и транспорте микроэлементов. Фракция 1 — микроэлементы в обменном комплексе ДО. Изменения ионного состава природных вод влияют на процессы сорбции-десорбции. Фракция 2 — микроэлементы, связанные с карбонатами. Фракция очень восприимчива к изменениям рН среды. Фракция 3 — микроэлементы, связанные с оксидами железа и марганца. Фракция 4 — микроэлементы, связанные с органическим веществом ДО. В усло-

виях окисления в природных водах органическое вещество может разлагаться, что приводит к выделению растворимых микроэлементов.

Обсуждение результатов. Для оценки потенциального выноса ТМ из ДО водоема и его вторичного загрязнения — необходимо определить массу каждого металла, накопленную по площади его отложений. Исследования, проведенные Институтом водных проблем (ИВП) РАН на Куйбышевском и других водохранилищах Волжского каскада, показали, что в пределах одного водохранилища и сезона соотношение различных форм существования элементов в твердой фазе ДО остается постоянным по всей площади водоема и меняется только по сезонам [11–13]. Поэтому для оценки масс ТМ, находящихся в разных формах в твердой фазе ДО в пределах изучаемого водоема (либо его отдельного района), могут быть использованы результаты исследований, проведенных на репрезентативных участках.

Сложность кинематической структуры потока в водоемах не позволяет выполнить моделирование процессов выхода загрязняющих веществ, в частности ТМ, из ДО в воду. Поэтому целью экспериментальных исследований является не моделирование многофакторных процессов выхода загрязняющих веществ из ДО, а постановка опытов, позволяющих непосредственно определить параметры, определяющие поток элементов из ДО. Для определения этих параметров проводился следующий статический эксперимент: в аквариум погружались ДО, затем он заполнялся водой, и в течение продолжительного времени определялась концентрации загрязняющих веществ — Fe, Mn, Cu, Zn в воде. Образцы ДО Ивановского водохранилища закладывались в плексигласовые (химически инертные) цилиндры высотой 40 см, диаметром 20 см. Слой образцов составлял около 10 см. Они заливались дистиллированной водой объемом 8 л, цилиндры и их крышки плотно закрывались темной бумагой. Отборы проб для последующих анализов проводились через 7, 14, 30 сут со дня начала эксперимента. Объем пробы составлял 3 л, после чего в цилиндры доливалось 3 л дистиллированной воды. Перед началом забора проб, в цилиндрах определялась температура. Отобранная проба фильтровалась через мембранные фильтры.

В ДО Fe представлено как нерастворимыми, мало подвижными соединениями, так и формами, доступными для геохимических преобразований на стадии раннего диагенеза. Последнее подвержено диагенетическими изменениями в толще осадка, легко растворимо в разбавленных кислотах и включает в себя гидроксиды двух- и трехвалентного Fe, фосфаты, силикаты и другие соединения [14]. Установлено, что концентрация Fe значительно возрастает при переходе от кислородных к бескислородным условиям. В пробах величина БПК₅ на 7-й день была низкой, т. е. благоприятной для высокого выделения Fe, после чего БПК₅ возросло (низкое выделение Fe). При рассмотрении влияния pH на выделение Fe следует учесть, что процесс зависит от Eh, кислородного насыщения, концентрации Fe и фосфора в воде. При низких значениях pH происходит более интенсивное выделение Fe, чем при высоких. При значе-

нии pH=9 процесс поступления железа в водную толщу практически прекращается. В исследуемых пробах на 7-е сутки эксперимента значение pH=7,72, т. е. было достаточно высоким, но надо полагать, что на процесс выделения подействовали другие факторы.

При исследовании Mn следует учитывать, что с одной стороны, Mn⁴⁺ в виде оксидов составляет основу структуры донных осадков, с другой — в виде Mn²⁺ может быть сорбирован этими же оксидами, равно как и другими компонентами осадков. Кроме pH на выделение Mn влияет содержание кислорода. На 7 сут БПК₅ было 6 мг/л, но на 14-е сут возросло до 9,3, при снижении выделения Mn. Исследованиями показано, что снижение содержания кислорода еще недостаточно для выделения Mn из ДО. Непременным условием является снижение величины pH.

Установлено, что при поглощении Cu происходит ее аккумуляция в ДО. В отсутствие сильного воздействия на структуру, а также ряда факторов, способных перевести труднорастворимые формы в легко растворимые, выделения в воду поглощенной Cu не наблюдается в течение длительного времени. Даже в условиях интенсивного ресуспензирования и реокисления осадков, при варьировании температуры от 0 до 20 °С, содержания растворенного кислорода от 0 до 100 % насыщения и величины pH=7,8...8,8 выделение Cu не происходит. Рассматривая изменения концентрации Zn, следует отметить, что влияющие на десорбцию Zn факторы идентичны факторам, влияющим на десорбцию Cu. Влияние pH на десорбцию незначительно.

На основании ранее проведенных исследований возможно сделать вывод, что именно изменение содержания ТМ в подвижных формах способствует изменению их валового содержания в ДО [14]. Также на основе проведенных исследований можно сделать вывод о высокой изменчивости содержания подвижных форм изученных микроэлементов в верхнем 10-сантиметровом слое ДО водохранилища, который активно вовлекается в процесс массообмена с водной массой водохранилища [2, 15, 16]. Следует отметить, что все подвижные формы могут участвовать в процессах массопереноса в системе «твердая фаза—поровый раствор—вода», а их содержание зависит от ряда факторов: меняющегося соотношения приходной и расходной составляющих баланса веществ, гидродинамической обстановки в придонном слое, физико-химических условий в верхнем 10-сантиметровом слое ДО.

Сравнение массы ТМ в твердой фазе и поровом растворе 10-сантиметрового слоя ДО показывает, что доля запасов ТМ в поровом растворе практически всех элементов в летний период незначительна (по материалам летних опробований). Отмечается, что роль порового раствора в процессах вторичного загрязнения водных масс водохранилища не ограничивается запасами растворенных элементов. Часть ТМ, закрепленная в твердой фазе ДО, в определенных условиях переходит в поровый раствор и далее в водную массу, и переход ТМ из ДО в водную массу осуществляется транзитом через поровый раствор. При этом выполненные для Ивановского водохранилища оценки [15] показыва-

ют, что ни диффузионный вынос, ни фильтрация не могут быть реальными механизмами выноса микроэлементов из ДО в водную массу. Вероятно, основной причиной выноса является макроперенос за счет русловых процессов.

Для расчета масс ТМ в твердой фазе верхнего 10-сантиметрового слоя ДО принимаются средние значения характеристик фракции <0,02 мм: плотность осадков около 1,5 г/см³; пористость верхнего горизонта – 0,6. Следовательно, вес призмы твердой фазы илистых отложений размером 1 × 1 × 0,1 м равен 150 кг. Оценка содержания накопленных масс ТМ в изучаемом слое ДО основана на распределении по классам геоаккумуляции (игео-классам), и позволяет оценить массу *m* каждого ТМ в активном слое ДО на площади 1 м² [4] (таблица). Данный подход позволяет определять районы с относительно равномерным загрязнением ДО, рассчитывать их приблизительную площадь и затем – максимально возможный вынос ТМ в водную толщу.

Таким образом, представляется возможным провести районирование ДО по площади в зависимости от уровня игео-класса накопленной массы (или запасов) ТМ. В результате отбора и анализа проб ДО определяются приблизительные площади содержания ТМ для каждого игео-класса. Затем в соответствии с данными таблицы рассчитывается накопленная масса определенного металла для площади каждого района – далее M_{I-geo} . Далее, путем суммирования массы ТМ для каждого игео-класса возможно оценить общую накопленную массу ТМ для ДО всего водоема:

$$M_{I-geo} = mS_{I-geo}; \quad M_{общ} = \sum M_{I-geo},$$

где M_{I-geo} – накопленная масса ТМ по определенному игео-классу в отдельном районе ДО; *m* – масса каждого ТМ в активном слое ДО на площади 1 м²; S_{I-geo} – площадь содержания ТМ в ДО определенного игео-класса; $M_{общ}$ – суммарная накопленная масса ТМ по всей площади ДО водоема.

В результате районирования и унификации содержания ТМ по игео-классам существенно упрощается оценка количества ТМ в ДО, как для каждого района водоема, так и для всего водоема в целом. В водоеме в период летней межени, при сухой погоде, может практически полностью прекращаться поступление водных масс с осадками с водосборной территории. Вследствие этого может существенно понижаться уровень водоема, и соответственно, уменьшаться его объем. В результате в проточных водоемах снижаются скорости течений, начинается стагнация, эвтрофикация и заморные явления. При этом существенно возрастает объем забираемой воды для сельскохозяйственного водопользования различных прибрежных фермерских хозяйств. Вместе с тем в условиях стагнации водоема, как правило, существенно ухудшается гидрохимическая обстановка – снижается содержание растворенного O₂, особенно в придонном слое, а также показатели рН в придонном

Распределение значений накопленной массы ТМ в призме ДО по игео-классам

Элемент	Фон, г	Накопленная масса по классам геоаккумуляции, г						
		0	1	2	3	4	5	6
Mn	127,5	191	382,5	765	1530	3060	6120	>6120
Cd	0,045	0,07	0,135	0,27	0,54	1,08	2,16	>2,16
Zn	14,25	21,4	42,8	85,6	171,2	342,4	684,8	>684,8
Pb	3	4,5	9	18	36	72	144	>144
Cu	6,75	10,1	20,2	40,4	80,8	161,6	323,2	>323,2
Ni	10,2	15,3	30,6	61,2	122,4	244,8	490	>490
Co	2,85	4,3	8,6	17,2	34,4	68,8	138	>138
Cr	13,5	20,2	40,4	80,8	161,6	323,2	646	>646
As	2	2,9	5,8	11,6	23	46	84	>84
Hg	0,06	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	>3,2

слое воды и в ДО [15], что свидетельствует о подкислении системы «вода–ДО» и переходе от окислительных условий к восстановительным, что в свою очередь приводит к опасности вторичного загрязнения. В таких условиях возможен переход ТМ, находящихся в подвижных формах существования в ДО, в водную массу практически в полном объеме в течение одной-двух недель. Накопленная масса ТМ после выхода из ДО распространяется в водной среде водоема, вследствие чего в воде повышается концентрация металлов. Для оценки максимально возможного влияния выноса масс ТМ из ДО представляется допустимым принять, что из отложений выйдут полностью все изучаемые элементы, содержащиеся в подвижных формах. Также для данной оценки представляется возможным принять утверждение, что в предполагаемых условиях уровень водоема и, следовательно, объем будет минимальный. При этом возможно принять, что вынесенные металлы будут распространяться по всему объему водных масс и рассчитать максимально возможное добавленное содержание металла в воду в результате вторичного загрязнения. Расчет может быть произведен по формуле:

$$C_3 = M_{общ} / V; \quad C_{общ} = C_3 + C_в, \quad (1)$$

где C_3 – концентрация ТМ, добавленная (вынесенная) в водную массу из ДО; $M_{общ}$ – суммарная накопленная масса ТМ по всей площади ДО водоема; *V* – объем водной массы водоема; $C_{общ}$ – общая концентрация ТМ в результате выноса из ДО; $C_в$ – концентрация ТМ в воде перед выносом из ДО.

Далее можно рассчитать общую концентрацию каждого металла в воде – путем сложения концентрации, добавившейся в результате выноса, и уже имеющейся концентрации в водной массе.

Как следует из формулы (1), в засушливые летние меженные периоды, с потенциальным ухудшением качества воды в водоемах, перед водопользованием необходимо измерять содержания ТМ в воде, рассчитывать объем водной массы и давать оценку накопленным массам ТМ в ДО. Данные расчеты можно проводить как на отдельных водоемах, так и на отдельных участках средних и крупных рек, на которых расположены сельхозугодья и предполагается активное водопользование. По результатам расчета $C_{общ}$ ТМ в воде исследуемого водоема, можно принимать решение о целесообразности и правомочности использования его воды в сельскохозяйственных целях.

Выводы

1. Загрязнение ДО водного объекта отражает его современное состояние и несет информацию об инженерно-хозяйственной деятельности на водосборной территории, при этом фракция ДО <20 мкм способна удовлетворять требованиям мониторинга водного объекта, инвентаризации и оценки содержания ТМ. Их аккумуляцию в ДО рекомендуется оценивать с помощью «индекса геоаккумуляции», который характеризует относительную кратность загрязнения ДО во фракциях <20 мкм.

2. Представленное ранжирование территории по иерархическим уровням (таксонам) позволяет достаточно четко определить ранги участков при исследовании загрязнений и определять последовательность действий, необходимых при изучении загрязнений ДО ТМ. Выбор пунктов отбора проб и частота повторяемости отбора позволит минимизировать затраты на эти операции.

3. Представляется возможным провести районирование ДО по площади в зависимости от уровня игео-класса накопленной массы (или запасов) ТМ. В результате отбора и анализа проб ДО определяются приблизительные площади содержания ТМ для каждого игео-класса. В результате районирования и унификации содержания ТМ по игео-классам существенно упрощается оценка количества ТМ в ДО для всего водоема в целом.

4. Для оценки влияния выноса ТМ из ДО на воду изучаемого объекта, необходимо рассчитать добавленное содержание каждого металла в водную массу. Далее рассчитывается общая концентрация каждого металла в воде в результате выноса путем сложения концентрации, добавившейся в результате выноса, и уже имеющейся концентрации в водной массе. По результатам расчета общей концентрации ТМ в воде принимается решение об использовании воды в сельскохозяйственных целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 270 с.
2. Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 168 с.
3. Исследования загрязненности донных отложений как основа мониторинга состояния водотоков / Н.В. Коломийцев, В.Е. Райнин, Т.А. Ильина, Л.Б. Зими́на-Шалдыбина, Г. Мюллер // Мелиорация и водное хозяйство. 2001. № 3. С. 11–15.
4. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veraenderungen seit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. s. 778–783.
5. Основные принципы мониторинга загрязнения большой реки (на примере бассейна реки Волги) / Б.И. Корженевский, Г.Ю. Толкачев, Т.А. Ильина, Н.В. Коломийцев // Строймного. 2017. № 2 (7). С. 1/7–7/7.
6. Мониторинг загрязнения автотранспортом малых рек Московской области тяжелыми металлами / Б.И. Корженевский, Н.В. Коломийцев, Т.А. Ильина, Н.О. Гетьман // Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 4 (208). С. 24–29.
7. Коломийцев Н.В., Ильина Т.А. Интегральные критерии для оценки экологического состояния донных отложений водных объектов // Мелиорация и водное хозяйство. 2009. № 5. С. 39–42.
8. Техногенное загрязнение речных экосистем / В.Н. Новосельцев и др.; под ред. В.Е. Райнина и Г.Н. Виноградовой. М.: Научный мир. 2002. 140 с.
9. Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений / Н.В. Коломийцев, Б.И. Корженевский, Т.А. Ильина, Е.Н. Гетьман // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 6. С. 15–19.

10. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals // Analytical chemistry. 1979. Vol. 51. No 7. P. 844–851.

11. Современное состояние и проблемы охраны качества воды в бассейне Волги / А.Б. Авакян, Е.В. Венецианов, А.Г. Кочарян, К.И. Сафронова // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 4. С. 471–479.

12. Кочарян А.Г., Толкачев Г.Ю. Гидроэкология: определение возможности вторичного загрязнения тяжелыми металлами на основании их содержания в донных отложениях // Инженерная экология. 2009. № 1. С. 37–50.

13. Венецианов Е.В. Некоторые особенности сорбции тяжелых металлов слоем донных осадков и почвогрунтов // Водные ресурсы. 1997. № 3.

14. Водохранилище Воткинской ГЭС / Под ред. Ю.М. Матарзина. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1968. 164 с.

15. Толкачев Г.Ю. Тяжелые металлы в системе «вода–донные отложения». LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, 2012. 98 с.

16. Ивановское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны / В.А. Абакумов, Н.П. Ахметьева, В.Ф. Бреховских и др. М.: Наука, 2000. 344 с.

REFERENCES

1. Linnik P.N., Nabivanec B.I. Formy migracii metallov v presnyh poverhnostnyh vodah. L.: Gidrometeoizdat, 1986. 270 s.
2. Brekhovskih V.F. Gidrofizicheskie faktory formirovaniya kislородного rezhima vodoyomov. M.: Nauka, 1988. 168 s.
3. Kolomyitsev N.V., Raynin V.E., Il'ina T.A., Zimina-Shaldybina L.B., Mueller G. Issledovaniya zagryaznennosti donnyh otlozhenij kak osnova monitoringa sostoyaniya vodotokov // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. 2001. № 3. S. 11–15.
4. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veraenderungen seit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. s. 778–783.
5. Korzhenevskiy B.I., Tolkachev G.Yu., Il'ina T.A., Kolomyitsev N.V. Osnovnye principy monitoringa zagryazneniya bol'shoj reki (na primere bassejna reki Volgi) // StroyMnogo. 2017. № 2(7). S. 1/7–7/7.
6. Korzhenevskiy B.I., Kolomyitsev N.V., Il'ina T.A., Get'man N.O. Monitoring zagryazneniya avtotransportom malyh rek Moskovskoj oblasti tyazhelymi metallami // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2018. № 4(208). S. 24–29.
7. Kolomyitsev N.V., Il'ina T.A. Integral'nye kriterii dlya ocenki ekologicheskogo sostoyaniya donnyh otlozhenij vodnyh ob'ektov // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. 2009. № 5. S. 39–42.
8. Tekhnogennoe zagryaznenie rechnyh ekosistem / V.N. Novosel'cev i dr.; pod red. V.E. Raynina i G.N. Vinogradovoj. M.: Nauchny mir. 2002. 140 s.
9. Kolomyitsev N.V., Korzhenevskiy B.I., Il'ina T.A., Get'man E.N. Ocenka tekhnogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty po zagryaznennosti donnyh otlozhenij // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. 2015. № 6. S. 15–19.
10. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals // Analytical chemistry. 1979. Vol. 51. No 7. P. 844–851.
11. Avakyan A.B., Venecianov E.V., Kocharyan A.G., Safronova K.I. Sovremennoe sostoyanie i problemy ohrany kachestva vody v bassejne Volgi // Vodnye resursy. 1994. T. 21. № 4. S. 471–479.
12. Kocharyan A.G., Tolkachev G.Yu. Gidroekologiya: opredelenie vozmozhnosti vtorignogo zagryazneniya tyazhyolyimi metallami na osnovanii ih sodержaniya v donnyh otlozheniyah // Inzhenernaya ekologiya. 2009. № 1. S. 37–50.
13. Venecianov E.V. Nekotorye osobennosti sorbcii tyazhyolyh metallov sloem donnyh osadkov i pochvogruntov // Vodnye resursy. 1997. № 3.
14. Vodokhranilishche Воткинской GES / Pod red. Yu.M. Matarzina. Perm': Izd-vo Perm'. Universiteta, 1968. 164 s.
15. Tolkachev G.Yu. Tyazhyolye metally v sisteme «voda–donnye otlozheniya». LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, 2012. 98 s.
16. Ivan'kovskoe vodokhranilishche: Sovremennoe sostoyanie i problemy ohrany / V.A. Abakumov, N.P. Ahmet'eva, V.F. Brekhovskih i dr. M.: Nauka, 2000. 344 s.

Толкачев Глеб Юрьевич, канд. геогр. наук, ст. науч. сотрудник, k-26@yandex.ru, ORCID 0000-0001-6983-7106, Authors ID 70414; **Корженевский Борис Игоревич**, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ORCID 0000-0001-7663-9677, Scopus 57195526993, Authors ID 350982 (ФГБУ «ФНЦ гидротехники и мелиорации имени А.Н. Косыгина»).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЗАПОЛНЕНИИ ВОДОХРАНИЛИЩА

А.Е. КАЧАЕВ, С.С. ТУРАПИН

Ключевые слова: напряженно-деформационно-фильтрационное состояние, грунтовая плотина, поровое давление, кривая депрессии, грунт, гидротехническое сооружение.

Keywords: stress-strain-filtration state, soil dam, pore pressure, depression curve, soil, hydraulic engineering structure.

Аннотация. В статье представлена методика численного моделирования для оценки устойчивости грунтовой плотины при различном заполнении водохранилища (в том числе при быстрой сработке водохранилища как случая, при котором плотина максимально нагружена различным динамическим воздействием водных масс). Методика численного моделирования напряженно-деформационно-фильтрационного состояния грунтовой плотины в ПК PLAXIS 2D разработана с учетом различных условий нагружения объекта, в том числе при быстрой сработке водохранилища. По данной методике численные результаты порового давления $P_{\text{актив}}$ и коэффициента устойчивости $k_{\text{ст}}$ при различных режимах работы грунтовой плотины (при различных фазовых состояниях плотины). Определены параметры коэффициента устойчивости для каждой из фаз, рассмотренных в исследовании.

Abstract. The article presents a numerical modeling technique for assessing the stability of a soil dam under various reservoir conditions (including rapid reservoir discharge, as a case in which the dam is maximally loaded by various dynamic effects of water masses). A technique has been developed for numerical modeling of the stress-strain-filtration state of a soil dam in a PLAXIS 2D PC, taking into account various loading conditions of the facility, including during rapid reservoir operation. Numerical results of the pore pressure $P_{\text{актив}}$ and the $k_{\text{ст}}$ stability coefficient have been obtained for different operating modes of a soil dam (under different phase states of the dam). The parameters of the stability coefficient for each of the phases considered in the study are determined.

Введение. В настоящее время является актуальным вопрос о безопасном использовании и возможных методах реконструкции гидротехнических сооружений с большим сроком эксплуатации (более 25 лет). Однако необходимо отметить, что моделирование гидрологических процессов в таких сооружениях должным образом не проводится, а последующие работы в рамках проектов по их реконструкции малоэффективны и небезопасны [1].

В нашей стране большинство грунтовых плотин никогда не поддавались реальным наблюдениям, которые могли бы зафиксировать их состояние и проанализировать работоспособность сооружений. Отсутствуют надежные данные для сравнения с расчетами, такими как фильтрация, поровое давление в материале ядра и его откосах, осадки, смещения и др. [2].

Безопасностью эксплуатации, а также натурными наблюдениями за фильтрацией, поровым давлением, осадками и смещением плотины с ядром (высокими) стали заниматься в период строительства грунтовых плотин после 50-х годов прошлого века. Среди ученых, занимающихся проблемами гидротехнических сооружений, можно отметить исследования: Н.А. Анискина [3], В.М. Никитина [4], М.Н. Леднева [5], С.С. Турапина [6–7].

Моделирование грунтовых плотин при их проектировании или обследовании на сегодняшний день невозможно без BIM-технологий в строительстве [8–10]. Подобные технологии помогают получить не только численные модели эксплуатируемых плотин, но и эф-

фективно разработать методы по их реконструкции с учетом трехмерных особенностей грунтов.

Целью исследования является разработка с помощью программного комплекса методики численного моделирования для оценки устойчивости грунтовой плотины при различном заполнении водохранилища (в том числе при быстрой сработке водохранилища).

Исследование проблемы нестационарной фильтрации в условиях резкого падения уровня верхнего бьефа с акцентом на грунтовые плотины и дамбы было предметом анализа в работах как отечественных, так и зарубежных ученых [11–12].

Тематики исследований в этой области различны. Стоит отметить, что в этих работах обращается внимание на исследование состояний грунтовых плотин на различных грунтах, физико-механические характеристики которых моделируются в соответствии с определенными особенностями той или иной местности. В последние годы для анализа устойчивости откосов грунтовых плотин в различных ситуациях снижения уровня воды в водохранилище, включая задачи нестационарной фильтрации, активно используются численные методы. Среди них особенно выделяется метод конечных элементов (МКЭ) [13].

Методы и объект исследования. В работе представлены подходы и результаты численного анализа проблемы устойчивости откоса земляной плотины в условиях экстренной разрядки увеличенного объема водохранилища. Для расчетов использован программный комплекс PLAXIS 2D, применяющий мелкую расчетную сетку метода конечных элементов. Объектом моделирования является приведенная симметричная грунтовая плотина с ядром, показанная на рис. 1.

Модель плотины, которая принята для исследования, имеет высоту 30 м, ширину в основании 172,5 м и ширину по гребню 5 м. Плотина для отработки методики принята состоящей из глинистого ядра и отсыпанных боковых призм (откосов). В основании гидротехнического сооружения залегает переуплотненный заиленный песок, условно названный подстилающим грунтом. Для нашей модели учтем его на глубине равной 30 м. Примем нормальную высоту уровня воды в водохранилище равной 25 м.

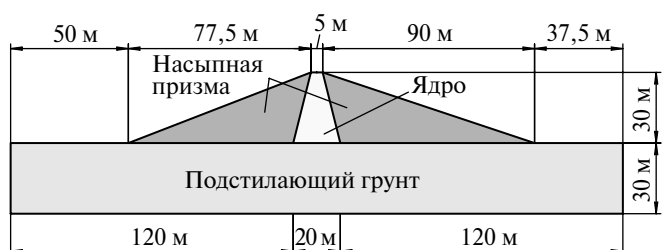


Рис. 1. Габаритно-расчетная схема решаемой задачи грунтовой плотины

Для подстилающего грунта используется модель Мора-Кулона и тип подстилающего грунта Drained – дренированный. Для этой модели важно учесть поведение непонасыщенных грунтов выше уровня грунтовых вод. Поэтому выбирается для грунтов гидравлическая модель Ван Гинухтена [14].

Физико-механические свойства подстилающего грунта (легкий суглинок с плотностью 1700 кг/м³) представлены в табл. 1, 2-я колонка.

Для насыпных откосов также используется модель Мора-Кулона и тип поведения Drained – дренированный. Зададим механические, физические и фильтрационные параметры (табл. 1, 3-я колонка). Материал условно относится к суглинкам со средней плотностью 1600 кг/м³.

Для ядра плотины используется модель Мора-Кулона и тип поведения Undrained (В) – недренированное. Модуль деформации и сопротивление не дренированному сдвигу ядра изменяется с глубиной. Для этого задается приращение этих параметров (табл. 1, 4-я колонка). Условный грунт для расчета принимаем в виде переуплотненного суглинка со средней плотностью 2200 кг/м³.

Для получения достоверных результатов в разрабатываемой методике в соответствии с возможностями ПК PLAXIS 2D моделируется напряженно-деформационное состояние плотины с различными фильтрационными показателями. Точность результатов расчета при помощи МКЭ достигается правильной разбивкой объекта по расчетной сетке. Численное моделирование напряженно-деформационного и фильтрационного состояния производится по всей площади модели, однако произвольная точка необходима для построения в дальнейшем графика зависимости коэффициента запаса устойчивости плотины $k_{ст}$ от полного перемещения в ядре дамбы. Так образу-

ется последовательно построенная плоская модель в КЭ, которая учитывает различные физико-механические характеристики грунтов по модели Ван Гинухтена [14].

Основная часть. Исследуемыми функциями, которые определяют устойчивость грунтовых плотин во времени, будем считать величины порового давления $P_{актив}$ для четырех случаев фильтрации воды через гидротехническое сооружение, а также состояние грунтов, характеризующееся кривой депрессии. Рассматриваемые случаи представлены фазами:

- фаза 1 – с установившимся состоянием при высоком уровне воды в водохранилище;
- фаза 2 – с быстрым понижением уровня воды при быстрой сработке водохранилища (нестационарный режим, продолжительность 5 сут);
- фаза 3 – с медленным понижением уровня воды (нестационарный режим, продолжительность 50 сут);
- фаза 4 – с установившимся состоянием при низком уровне воды в водохранилище.

На рис. 2а представлено распределение порового давления в фазе с установившимся состоянием при высоком (обычном) уровне воды в водохранилище. Здесь значение порового давления выше уровня грунтовых вод – положительно. При численном моделировании в ПК PLAXIS 2D для этой области произведен учет всасывания и построена кривая депрессии. По полученной кривой видим, насколько тело плотины находится в безопасных условиях в случае пучения грунтов от промерзания, а также для подсчета коэффициента запаса на устойчивость низового откоса. Максимальное поровое давление $P_{актив}$ определяется в нижних слоях подстилающего грунта со стороны водохранилища и составляет 589 кН/м².

В фазе, показанной на рис. 2б и связанной с быстрым понижением уровня воды, после небольшого спада видно, что в объеме проницаемого тела в глинистом ядре образовалась локальная кривая депрессии из-за низких значений коэффициента фильтрации.

Это связано с разностью скоростей сработки водохранилища и фильтрации в (нефильтруемом) ядре плотины. Результаты численного моделирования, полученные по данной фазе, соответствуют выводам исследований, опубликованным авторами в работах [3–5]. Для этой фазы максимальное поровое давление $P_{актив}$ определяется в нижних слоях подстилающего грунта под внутренним откосом плотины и равно 511 кН/м².

Физико-механические свойства грунтов

Параметры	Величина		
	Подстилающий грунт	Призмы (откосы)	Ядро
1	2	3	4
Удельный вес грунта при естественной влажности, кН/м ³	17	16	22
Удельный вес грунта в водонасыщенном состоянии, кН/м ³	21	20	25
Начальный коэффициент пористости	0,5	0,5	0,5
Эффективный модуль Юнга, кН/м ²	50·10 ³	20·10 ³	1,5·10 ³
Коэффициент Пуассона	0,3	0,33	0,35
Модуль сдвига, кН/м ²	19,23·10 ³	7519	555.600
Касательный одометрический модуль деформации, кН/м ²	6,73·10 ³	29,63·10 ³	2407
Параметр референсного давления, кН/м ²	1	5	5
Угол внутреннего трения, рад	35	31	0
Угол дилатансии, рад	5	1	0
Скорость прохождения поперечных волн, м/с	105,3	67,9	18,46
Скорость прохождения продольных волн, м/с	197,1	134,8	38,42
Коэффициент фильтрации по оси X	0,01	1	0,1·10 ⁻³
Коэффициент фильтрации по оси Y	0,01	1	0,1·10 ⁻³
Глубинный параметр неравномерности распределения дилатансии, м	10·10 ³	10·10 ³	10·10 ³
Удельный параметр неравномерности распределения дилатансии, 1/м	5,33·10 ⁻⁶	0,13·10 ⁻³	0,18·10 ⁻³
Реологический модуль	1000·10 ¹²	1000·10 ¹²	1000·10 ¹²

Таблица 1

Рассмотрим изменение порового давления для фазы медленного понижения уровня воды. В этом случае из-за замедленного понижения уровня воды в левой части в ядре плотины образуются двухскатная кривая депрессии. Такая картина является характерной для такого поведения грунтов плотины и связана с непроницаемостью материала ее ядра (рис. 2в).

Кривая депрессии в зоне ядра плотины будет иметь два функциональных разрыва – они соответствуют основным законам фильтрации за пределами применения закона Дарси [1]. Максимальное поровое давление $P_{\text{актив}}$ в нижних слоях подстилающего грунта равно 472 кН/м^2 .

На рис. 2г показано распределение порового давления $P_{\text{актив}}$ при низком уровне воды. Область синего цвета в ядре плотины связана с высоким значением давления всасывания. При этом необходимо заметить, что уровень воды может быть более плавным, если для расчета в ПК PLAXIS 2D измельчить сетку в ядре. Аппроксимированная кривая депрессии имеет линейный характер, поровое давление $P_{\text{актив}}$ в грунтах распределяется пропорционально значениям кривой депрессии. Верхняя часть плотины обозначена в синей цветовой гамме, так как находится в разгруженном состоянии (здесь среднее поровое давление $P_{\text{актив}}$ составляет 47 кН/м^2). Максимальные значения порового давления $P_{\text{актив}}$ в желто-красной зоне подстилающего грунта составляют $285...350 \text{ кН/м}^2$.

Особое внимание в исследовании уделяется тому, как меняется коэффициент устойчивости плотины при различных фазах. Для того чтобы посмотреть на это изменение построим график зависимости коэффициента устойчивости плотины от полного перемещения в водонепроницаемом ядре дамбы (рис. 3). Для этого определяем суммарный коэффициент устойчивости гидротехнического сооружения. Из графика видно, что для всех фаз коэффициент устойчивости плотины обеспечивается, что позволит плотине работать и находится в состоянии эксплуатационной надежности.

Такие результаты в представленной методике по оценки устойчивости грунтовых плотин на основе формирования напряженно-деформационно-фильтрационной модели говорят о том, что цель настоящего исследования достигнута. Исследование проведено на основе полученных численных значений функций отклика, заявленных в работе для гидротехнического сооружения подобного типа в соответствии с представленным подходом моделирования различных схем нагружения ГТС.

Выводы. Разработана методика численного моделирования напряженно-деформационно-фильтровального состояния грунтовой плотины в ПК PLAXIS 2D с учетом различных условий нагружения объекта, в том числе при экстренной сработке водохранилища. Получены численные результаты порового давления $P_{\text{актив}}$ и коэффициента устойчивости $k_{\text{ст}}$ при различных режимах работы грунтовой плотины (при различных фазовых состояниях плотины).

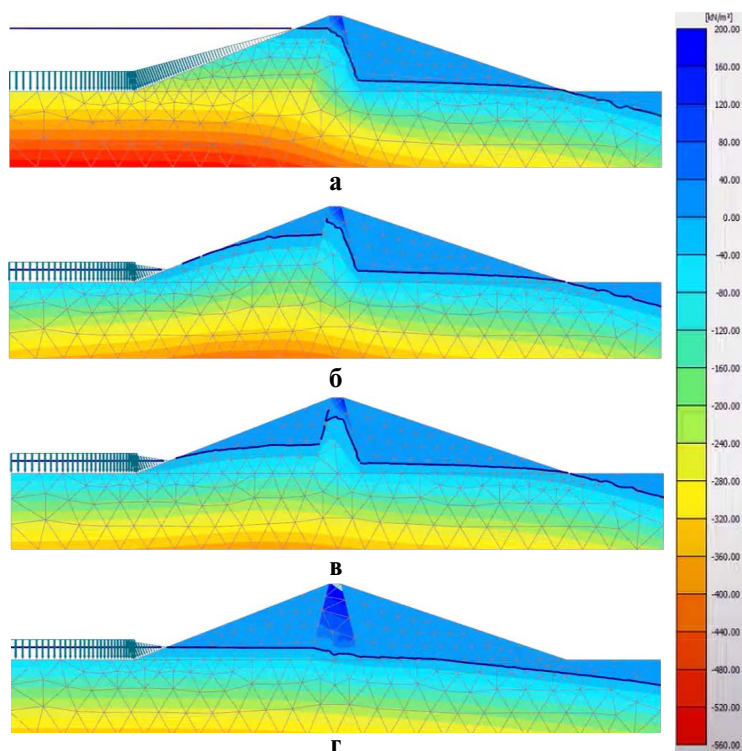


Рис. 2. Активное поровое давление $P_{\text{актив}}$ и кривая депрессии: а – фаза 1; б – фаза 2; в – фаза 3; г – фаза 4

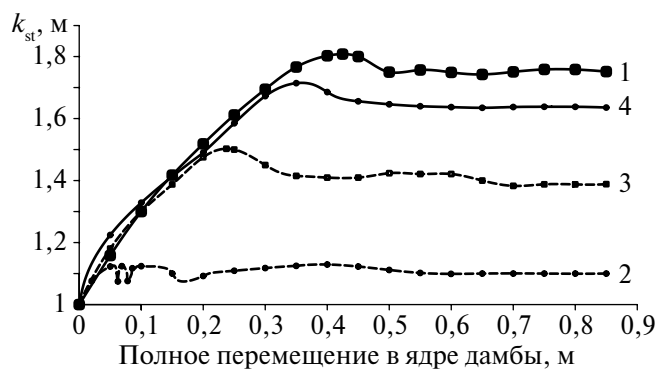


Рис. 3. График зависимости коэффициента устойчивости плотины от полного перемещения в ядре дамбы: 1 – фаза 1; 2 – фаза 2; 3 – фаза 3; 4 – фаза 4

Определены параметры коэффициента устойчивости для каждой из фаз, рассмотренных в исследовании: в статическом состоянии грунтовые плотины с величиной уровня в верхнем бьефе 20 м и более должны быть обеспечены высоким коэффициентом устойчивости (выше средних значений $k_{\text{ст}} = 1,25...1,65$ [13], или проектироваться в сочетании с каменно-бетонными материалами). Результаты численного моделирования подтверждены ранее проведенными исследованиями, которые указаны в ссылках основного текста представленного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротехнические сооружения: Часть 1 / М. Гришин, С. Слиский, А. Антипов, Г. Воробьев, В. Иванищев, В. Орехов, Г. Пашков, В. Поспелов, Л. Рассказов. М.: Высшая школа, 1979. 615 с.
2. Reinius E. The stability of the upstream slope of earth dams. Stockholm, 1948. 120 p.

3. Анискин Н.А., Сергеев С.А. Устойчивость откоса грунтовой плотины при сработке водохранилища // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 3. Ст. 1. С. 6–17. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1.

4. Никитин В.М. Долгосрочный прогноз осадок каменно-набросных плотин // Тр. Ташкент ин-та инж. ирригации и механиз. с. х. 1973. Вып. 55. С. 118–121.

5. Леднев М.А., Шашкова Э.Г., Сатановский С.Г. Результаты натурных наблюдений за напряженно-деформируемым состоянием плотины Чарвакской ГЭС в строительный период // 3-е Науч.-техн. совещ. Гидропроекта по подведению итогов науч.-исслед. работ в обл. энерг. и водохоз. стр-ва за девятую пятилетку и рассмотрению задач десятой пятилетки: тезисы докл. и сообщ. Ч. 1. М., 1976. С. 112–114.

6. Турапин С.С., Савушкин С.С., Каштанов В.В. Эксплуатация гидротехнических сооружений мелиоративного комплекса Минсельхоза России // Экология и строительство. 2018. № 2. С. 19–26. DOI 10.24411/2413-8452-2018-10003.

7. Турапин С.С., Ольгаренко Г.В. Методические рекомендации по правилам эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений. Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015. 68 с.

8. Сидоренко Д.А., Качаев А.Е. BIM-технологии в строительстве: что будет дальше? // Новые технологии в учебном процессе и производстве: материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвященной 35-летию полета орбитального корабля-ракетоуплавателя многоразовой транспортной космической системы «Буран», Рязань, 12–14 апреля 2023 г. / Под ред. А.Н. Паршина. Рязань: Рязанский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 2023. С. 490–492.

9. Хитров Я.И., Качаев А.Е. Использование BIM-технологий для объекта промышленного назначения при реконструкции одного из его действующих производств // New Technologies. Science, Engineering, Pedagogics: материалы Всероссийской научно-практической конференции «Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference». М.: Московский Политех, 2024. С. 293–298.

10. Сорока В.В., Качаев А.Е. Информационное моделирование зданий и сооружений как инструмент снижения рисков инвестиционного строительства // Вестник Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета: сборник научных трудов. М.: Московский политехнический университет, 2024. С. 341–346.

11. Muskat M. The Seepage of Water Through Dams with Vertical Faces // Physics. 1935. Vol. 6. Issue 12. Pp. 402–415. DOI: 10.1063/1.1745284.

12. Шестаков В.М. Некоторые вопросы моделирования неустановившейся фильтрации // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. 1956. № 2. С. 78–82.

13. Aniskin N.A., Antonov A.S. Development geo-seepage models for solving seepage problems of large dam's foundations, on an example of ANSYS Mechanical APDL // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1079–1080. Pp. 198–201.

14. Шестаков В.М. Фильтрационный расчет земляных плотин и перемычек при колебании бьефов // Гидротехническое строительство. 1953. № 7. С. 36–39.

REFERENCES

1. Grishin M., Slisky S., Antipov A., Vorobyov G., Ivanishchev V., Orekhov V., Pashkov G., Pospelov V., Rasskazov L. Hydraulic structures: Vol. 1. Moscow: Higher School. 1979. 615 p.

2. Reinius E. The stability of the upstream slope of earth dams. Stockholm, 1948. 120 p.

3. Aniskin N.A., Sergeev S.A. Stability of the slope of an earth dam during reservoir depletion. Construction: science and education. 2022. Vol. 12. Issue. 3. Article. 1. Pp. 6–17. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1.

4. Nikitin V.M. Long-term forecast of settlements of rockfill dams. Proceedings of the Tashkent Institute of Irrigation and Mechanization of Agriculture. 1973. Issue 55. Pp. 118–121.

5. Lednev M.A., Shashkova E.G., Satanovsky S.G. Results of in-kind observations of the stress-strain state of the Charvak hydroelectric power station dam during the construction // In the Proc. 3rd Scientific and Technical Conference of Hydroproject on summing up the results of scientific research in the field of energy and water management construction for the ninth five-year plan and consideration of the tasks of the tenth five-year plan. 1976. Abstracts of reports and communications. Vol. 1. Moscow, 1976. Pp. 112–114.

6. Turapin S.S., Savushkin S.S., Kashtanov V.V. Operation of hydraulic structures of the melioration complex of the Ministry of Agriculture of Russia. Ecology and Construction. 2018. No. 2. Pp. 19–26. DOI 10.24411/2413-8452-2018-10003. (rus)

7. Turapin S.S., Olgarenko G.V. Methodical recommendations on the rules for the operation of melioration systems and separately located hydraulic structures. Kolomna: IP Vorobyov O.M., 2015. 68 p.

8. Sidorenko D.A., Kachaev A.E. BIM technologies in construction: what will happen next? Ryazan: Ryazan Institute (branch) of the FSAEI of Higher Education «Moscow Polytechnic University», 2023. Pp. 490–492.

9. Khitrov Ya.I., Kachaev A.E. Use of BIM technologies for an industrial facility during the reconstruction of one of its existing production facilities // New Technologies. Science, Engineering, Pedagogics: Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference. Moscow: Moscow Polytechnic University, 2024. Pp. 293–298.

10. Soroka V.V., Kachaev A.E. Information modeling of buildings and structures as a tool for reducing the risks of investment construction. Bulletin of the Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University: Collection of scientific papers. Moscow: Moscow Polytechnic University, 2024. Pp. 341–346.

11. Muskat M. The Seepage of Water Through Dams with Vertical Faces // Physics. 1935. Vol. 6. Issue 12. Pp. 402–415. DOI: 10.1063/1.1745284.

12. Shestakov V.M. Some issues of modeling unsteady filtration. Issues of filtration calculations of hydraulic structures. 1956. No. 2. Pp. 78–82.

13. Aniskin N.A., Antonov A.S. Development geo-seepage models for solving seepage problems of large dam's foundations, on an example of ANSYS Mechanical APDL // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1079–1080. Pp. 198–201.

14. Shestakov V.M. Filtration calculation of earth dams and cofferdams with fluctuating pools. Hydrotechnical construction. 1953. No. 7. Pp. 36–39.

Качаев Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, зав. кафедрой строительного производства, doctor_cement@mail.ru (Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета); науч. сотрудник отдела водоснабжения (ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна); **Турапин Сергей Сергеевич**, канд. техн. наук, врио директора, rgraduga@yandex.ru (ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна).

УДК 626.826

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-12-17

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОПРОВОДЯЩЕЙ СЕТИ КАНАЛОВ И СООРУЖЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ КАЛМЫКИЯ

В. Ф. ТАЛАЛАЕВА, О. А. БАЕВ, А. В. КОЛГАНОВ

Ключевые слова: техническое состояние, гидравлический расчет, канал, гидротехническое сооружение, реконструкция, оросительная система, обследование, фильтрация.

Keywords: hydraulic calculations, canal, reconstruction, irrigation system, surveys, filtration, water resistance.

Аннотация. Цель работы: оценка технического состояния и определение гидравлических характеристик каналов различного порядка водопроводящей сети Сарпинской и Черноземельской обводнительно-оросительных систем с учетом их современного состояния. По результатам натурных исследований установлено, что основные магистральные

и распределительные каналы находятся в неудовлетворительном техническом состоянии. Наблюдаются заиление, зарастание кустарниковой и древесной растительностью, а также значительные фильтрационные потери и деформации русел, в результате чего, объемы воды в отдельные периоды поливного сезона не соответствуют паспортным значениям. Определено среднее расчетное значение коэффициента шероховатости для магистрального канала Р-1, которое превышает допустимое нормативное значение в 1,66 раза с отклонением, составляющим порядка 65,8%. При этом расчетные значения коэффициента шероховатости канала Р-1 на участке от ПК603+00 до ПК1145+76 колеблется в пределах 0,0270...0,0599 и увеличиваются при уменьшении расхода пропускаемого по каналу. Также выявлено, что по каналу ВР-1 среднее расчетное значение коэффициента шероховатости превышает нормативное значение в 2,09 раза. Такое значительное превышение вызвано не только зарастанием русла канала вдоль берегов и отложением наносов, но и особенностью формы поперечного сечения, которое на участке с ПК245+70 по ПК847+24 канала ВР-1 имеет значительную ширину по дну (17...20 м).

Abstract. The purpose of the work is to assess the technical condition and determine the hydraulic characteristics of the channels of various orders of the Sarpinsk and Chernozemelskaya water supply network of irrigation systems, taking into account their current state. Based on the results of field studies, it was found that the main trunk and distribution channels are in poor technical condition. Siltation, overgrowth of shrubby and woody vegetation, as well as significant filtration losses and deformations of riverbeds are observed, as a result, the volume of water in certain periods of the irrigation season does not correspond to the passport values. The average calculated value of the roughness coefficient for the main channel P-1 has been determined, which exceeds the permissible standard value by 1.66 times with a deviation of about 65.8%. At the same time, the calculated values of the roughness coefficient of the P-1 channel in the section from PK603+00 to PK1145+76 range from 0.0270–0.0599 and increase with a decrease in the flow rate passed through the channel. It was also revealed that the average calculated value of the roughness coefficient in the ВР-1 channel exceeds the standard value by 2.09 times. Such a significant excess is caused not only by the overgrowth of the channel bed along the banks and sediment deposition, but also by the peculiarity of the shape of the cross-section, which in the section from PK245+70 to PK847+24 of the ВР-1 channel has a significant width along the bottom (17–20 m).

Введение. Республика Калмыкия относится к самым вододефицитным регионам Российской Федерации, т. к. не имеет в достаточной мере необходимого количества собственных источников водных ресурсов и обеспечивается из бассейнов сопредельно расположенных рек: Волги, Кубани, Кумы, Терека, а также Чограйского водохранилища. Ввиду ограниченности в водных ресурсах, сокращение их потерь, восстановление изношенной оросительной сети, предотвращение деградации земель являются приоритетными задачами в рассматриваемом регионе для сохранения и развития сельскохозяйственного производства [1].

Существенное снижение площадей посевов риса в период 2019–2022 гг. орошаемых в Республике Калмыкия, подтверждают необходимость производства данной культуры за счет организации рационального и эффективного водопользования рассматриваемых обводнительно-оросительных систем. Ввиду этого комплексная оценка эффективности действующих оросительных систем, и в т. ч. определение пропускной способности водопроводящей сети, объемов фильтрационных потерь и КПД каналов является важной задачей на пути к организации водосберегающего орошения в Республике Калмыкия [2].

Сотрудниками «РосНИИПМ» в период с 2022 и 2023 г. выполнен ряд исследований мелиоративных систем Республики Калмыкия, в частности Сарпинской и Черноземельской ООС. Цель работ – определение текущего технического состояния оросительных каналов вышеупомянутых обводнительно-ороситель-

ных систем, а также определение гидравлических характеристик водопроводящих сетей [3].

Материалы и методы исследования. Получены данные от эксплуатирующей мелиоративный объект организации, выполнены натурные обследования гидротехнических сооружений и элементов на выбранных участках [4].

При проведении натурных исследований был выбран наиболее проблемный участок трассы магистрального канала ВР-1 Сарпинской ООС, который находится на границе Республики Калмыкия и Волгоградской области. Участок имеет протяженность 8489 м, где наблюдался размыв и разрушение дамбы канала. Ширина выхода оросительной воды за пределы дамбы канала составляет порядка 70 м. В экологическом аспекте с началом поливного сезона приканальная зона заболачивается и интенсивно зарастает мелколесьем и камышовой растительностью по всей ширине рассматриваемой зоны [5].

Ввиду зафиксированных деформаций отсутствует возможность подъезда к данному участку. Эксплуатационные дороги размыты и затоплены. Скорости движения водного потока на данном участке не соответствуют проектным. Имеются деформации русла от трапециoidalного сечения канала в сторону к полигональному. Происходят процессы заиления дна канала по причине снижения скорости транспортирования водных ресурсов. Выполненные исследования на участке канала ВР-1 позволяют сделать вывод, что он находится в ограниченно-работоспособном состоянии, требуется восстановление проектной пропускной способности, устройство противоточных покрытий для снижения потерь и предотвращения аварийных ситуаций.

Наряду с этим был выбран участок на ПК 332+00 магистрального канала ВР-1 (в районе сельского муниципального образования (СМО) Хонч-Нур). На момент проведения обследований русло канала ВР-1 не подвержено интенсивному зарастанию; на поворотном участке трассы канала наблюдается интенсивная фильтрация воды из канала с образованием участков подтопления приканальной территории площадью на момент проведения обследований (май 2022 г.) – 1201,07 м² и 866,53 м².

По результатам выполненных натурных обследований на поворотном участке оросительного канала можно сделать вывод, что рекомендуется проведение противоточных мероприятий в целях предотвращения развития фильтрационных деформаций грунтовых дамб и гидротехнических сооружений [5].

Наряду с обследуемыми объектами Сарпинской ООС также рассмотрены и обследованы оросительные каналы Черноземельской ООС. Так, например, одним из объектов выбран водовыдел на Яшкульском РК, его проектная пропускная способность составляла 3 м³/с. На момент проведения обследований (Республика Калмыкия, Яшкульский район, 2023 г.) текущее техническое состояние сооружений водовыдела приведено на рис. 1.

Выполнено обследование водовыдела четырехочкового с переездом на ПК1400 Черноземельского маги-



а



б

Рис. 1. Входной оголовок (а) и нижний бьеф сооружения (б) водовыдела с переездом в Яшкульский РК



а



б

Рис. 2. Нижний бьеф (а) и русло канала (б) одноочкового водовыдела канала УС-4

стрального канала. Перед сооружением зафиксировано засорение и заиливание приемной камеры значительным количеством плавающего сора и ила, что ухудшает пропускную способность сооружения. Металлические затворные элементы отсутствуют (сняты службой эксплуатации в целях облегчения очистки верхнего бьефа от периодически скапливающегося мусора). Из четырех ниток трубопроводов водовыдела на момент обследования функционировали три, т. е. сооружение не работает в проектом режиме, что значительно сказывается на пропускной способности.

В нижнем бьефе установлена бетонная облицовка, которая служит для закрепления откосов, как показали натурные обследования, она деформирована, на ее поверхности имеются крупные сколы, выбоины и повреждения. Русло на головном участке канала подвержено интенсивному зарастанию растительностью, что негативно влияет на пропускную способность самого распределителя.

Водовыдел одноочковый с переездом на ПК72+30 канала УС-4 (сброс в оз. Бузга) находится в нормативном состоянии. В рамках выполнения противопаводковых мероприятий, запланированных в 2022 г. сооружение отремонтировано, его техническое состояние на момент обследования характеризуется как работоспособное (рис. 2). На подходном и отводном участках к сооружению зафиксировано зарастание русла, деформации откосов земляного русла сбросного канала.

По результатам натурных обследований Сарпинской и Черноземельской обводнительно-ороситель-

ных систем следует сделать вывод, что основные магистральные и распределительные каналы находятся в неудовлетворительном техническом состоянии, заилены и заросли кустарниковой и древесной растительностью, наблюдаются значительные фильтрационные потери и деформации русел, в результате чего, объемы водных ресурсов в отдельные периоды поливного сезона не достигают и не соответствуют паспортным значениям, что сказывается на пропускной способности и КПД сооружения.

Результаты исследования и их обсуждение. На основании вышеописанных фактов, актуальным становится вопрос определения гидравлических характеристик рассматриваемых систем. Для этого проведены гидравлические расчеты [6, 7] для участков магистральных, межхозяйственных и сбросных каналов (Р-1 и ВР-1, «Обводной» «Водоподающий», ВР-1-3, ВР-1-4, 18ХС-3) Сарпинской ООС.

В целях определения коэффициента шероховатости n при максимальном Q_{\max} и нормальном Q_n расходах воды в канале Р-1, ширине канала по основанию b , гидравлическом уклоне на участке i_0 , коэффициенте заложения откосов канала m , глубине наполнения h , определены гидравлические характеристики: площадь поперечного сечения ω , м²; смоченный периметр χ , м; гидравлический радиус R .

Ввиду того, что полученное расчетное значение гидравлического радиуса находится в пределах $R = 1...3$ м, показатель степени λ у принимается приближенно равным 0,2, следовательно:

• при Q_{\max} , м³/с:

$$n = \frac{\omega R^y \sqrt{Ri_0}}{Q_{\max}} = \frac{39 \cdot 1,7^{0,2} \sqrt{1,7 \cdot 1,15 \cdot 10^{-5}}}{7,1} = 0,0270;$$

• при Q_n , м³/с:

$$n = \frac{\omega R^y \sqrt{Ri_0}}{Q_{\max}} = \frac{39 \cdot 1,7^{0,2} \sqrt{1,7 \cdot 1,15 \cdot 10^{-5}}}{6,0} = 0,0319.$$

Аналогичные расчеты значений коэффициента шероховатости были выполнены для остальных участков канала Р-1 и для ряда других каналов Сарпинской ООС, в том числе и для магистрального канала ВР-1 для значений максимальных и нормальных расходов воды в начале каждого участка канала [7]. Полученные расчетные значения представлены в табл. 1.

в пределах 0,0270...0,0599 и увеличиваются при уменьшении расхода пропускаемого по каналу.

По полученным расчетным данным канала ВР-1 среднее расчетное значение коэффициента шероховатости превышает нормативное значение в 2,09 раза. Такое значительное превышение вызвано не только зарастанием русла канала вдоль берегов и отложением наносов, но и особенностью формы поперечного сечения, которое на рассматриваемом участке ПК245+70 по ПК847+24 канала ВР-1 имеет значительную ширину по дну, которая составляет до 17...20 м.

Необходимо также отметить, что при пропуске по каналу (на головном участке) сниженных расходов, значение коэффициента шероховатости возрастает до значения 0,0655 и обуславливается зарастанием откосов канала мелколесьем и водной растительностью, что зафиксировано в процессе натурных обследований.

Таблица 1

Гидравлические параметры каналов Сарпинской ООС

Расчетный створ	Расчетные значения					Нормативное значение n_n [8]	$\frac{n_{\text{ср. вэв}}}{n_n}$	Отклонение $\frac{n_{\text{ср. вэв}} - n_n}{n_n} 100, \%$
	ω , м ²	χ , м	R	$n_{\text{расч}}$	$n_{\text{ср. вэв}}$			
Магистральный и межхозяйственный канал Р-1								
ПК603+00— ПК1145+76	39	22,97	1,7	0,0270	0,0373	0,0225	1,66	65,8
				0,0319				
ПК1145+76— ПК1177				0,0304				
Магистральный и межхозяйственный канал ВР-1								
ПК245+70— ПК332+00	116	42,3	2,7	0,0655	0,0471	0,0225	2,09	109,3
ПК332+00— ПК397+53	68,75	35,81	1,92	0,0303				
ПК397+53— ПК668+62	116	42,30	2,74	0,0735				
ПК668+62— ПК847+24				0,0564				
Магистральный и межхозяйственный канал ВР-1—3								
ПК0—ПК87+30	26,25	18,81	1,4	0,0363	0,0363	0,0225	1,61	61,3
ПК87+30— ПК116								
Межхозяйственный канал ВР-1—4								
ПК0—ПК161	28,75	19,81	1,45	0,0246	—	0,0225	1,1	9,3

Согласно рекомендациям СП 100.13330.2016 [8] использовались нормативные значения коэффициента шероховатости оросительных каналов в земляном русле [8], составляющий $n = 0,0225$ (см табл. 1). Для сбросного канала 18ХС-3 нормативное значение коэффициента n определено за счет повышения на 10 % величины коэффициента шероховатости для оросительных каналов с округлением до ближайшего принятого в таблице М.1 значения [8].

Таким образом, среднее расчетное значение коэффициента шероховатости для магистрального канала Р-1 превышает допустимое нормативное значение в 1,66 раза с отклонением, которое составляет порядка 65,8 %. При этом расчетные значения коэффициента шероховатости на рассматриваемом участке от ПК603+00 до ПК1145+76 канала Р-1 колеблется

в процессе натурных обследований. Для контрольного створа на канале ВР-1 на основании данных измерений глубин (на скоростных вертикалях), построен поперечный профиль канала (рис. 3), который свидетельствует о заилинии его русла наносами вдоль одного из откосов.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что влияние наносов в контрольном створе данного канала на значение коэффициента шероховатости минимально, основной причиной повышенного среднего значения коэффициента шероховатости в данном створе ($n_{\text{ср}} = 0,0445$) является зарастаемость откосов в вегетационный период [8].

Гидравлические расчеты [9—13] основных элементов живого сечения Гашунского и Яшкульского каналов Черноземельской ООС выполнялись с использованием данных паспортов (2023 г.) и результатов натурных обследований рассматриваемых каналов с учетом СП 100.13330.2016. Полученные результаты расчетов приведены в табл. 2.

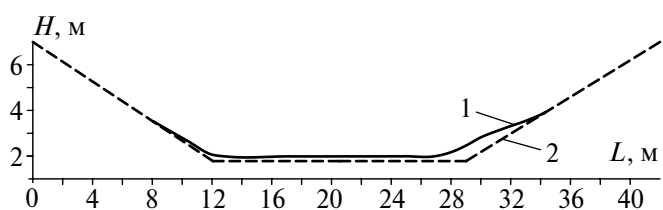


Рис. 3. Поперечный профиль магистрального канала ВР-1 в контрольном створе (участок 1): 1 — фактическое русло; 2 — проектное русло

Таблица 2

Гидравлический расчет расхода и средней скорости

Параметр	Значение параметра при разных уровнях						
Гашунский РК							
Элемент потока	Земляное русло						
Уклон i_0	0,09						
Заложение откосов m	1:1,5						
Расход Q , м ³ /с	1,89	4,2	5,3	8,0	11,0	15,0	
Глубина h , м	0,74	1,5	1,75	2,4	2,8	3,0	
Ширина B , м	8,22	10,5	11,25	13,2	14,4	15,0	
Ширина по дну b , м	6,0						
Средняя скорость v_{cp} , м/с	0,23	0,33	0,36	0,44	0,46	0,48	
Средняя глубина h_{cp} , м	0,64	1,18	1,34	1,75	1,98	2,1	
Гидравлический радиус R , м	0,61	1,09	1,23	1,57	1,78	1,87	
Коэффициент Шези C , м ^{0,5} /с	30,66	33,82	34,51	36,60	36,70	37,01	
Коэффициент шероховатости n	0,030						
Смоченный периметр χ , м	8,67	11,4	12,3	14,64	16,08	16,82	
Площадь поперечного сечения ω , м ²	5,26	12,38	15,09	23,04	28,56	31,5	
Яшкульский РК							
Уклон i_0	0,001						
Заложение откосов m	1:1,5						
Расход Q , м ³ /с	0,71	1,0	1,25	1,61	2,13	3,0	
Глубина h , м	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,9	
Ширина B , м	4,8	5,4	6,0	6,6	7,5	8,7	
Ширина по дну b , м	3,0						
Гидравлический радиус R , м	0,45	0,57	0,68	0,79	0,94	1,13	
Коэффициент Шези C , м ^{0,5} /с	29,21	30,36	31,26	32,02	32,97	34,02	
Смоченный периметр χ , м	5,16	5,88	6,61	7,33	8,41	9,85	
Средняя скорость v_{cp} , м/с	0,62	0,73	0,82	0,90	1,01	1,14	
Коэффициент шероховатости n	0,030						
Площадь поперечного сечения ω , м ²	2,34	3,36	4,5	5,76	7,88	11,12	
Средняя глубина h_{cp} , м	0,49	0,62	0,75	0,87	1,05	1,28	

Для контрольного створа Гашунского канала установлено, что заиливание русла канала в расчетном створе будет происходить при расходе водного потока $Q < 2,75$ м³/с и наполнении канала $h < 1$ м, т. к. при данных значениях средняя скорость водного потока будет меньше минимальной допускаемой (незаиляющей) скорости равной 0,27 м/с. При оценке русла Гашунского канала на подверженность размыву, определено, что канал на участке контрольного створа не может пропускать заданные расходы не подвергаясь размыву. Проверка русла Яшкульского канала в контрольном створе на заиливание и размыв показала, что его русло будет подвергаться размыву и заиливанию в рассмотренном диапазоне скоростей составляющие от 0,62...1,14 м/с.

Заключение

1. При проведении визуальных натуральных обследований отмечена необходимость проведения текущих ремонтов и реконструкции всех основных каналов систем, а также сооружений на водораспределительной и сбросной сети. Необходимо осуществить ряд мероприятий, направленных на сокращение объемов потерь воды за счет устройства защитных облицовок. В целях сокращения непроизводительных потерь в рассматриваемых ООС, узлы водораспределения и точки водовыделов в хозяйства необходимо оборудовать водомерными

устройствами, позволяющими замерять расходы (объемы) подаваемой потребителям.

2. Среднее расчетное значение коэффициента шероховатости для магистрального канала Р-1 превышает допустимое нормативное значение в 1,66 раза, при этом, расчетные значения изменяются в пределах 0,0270...0,0599 и увеличиваются при уменьшении расхода пропускаемого по каналу. Среднее расчетное значение коэффициента шероховатости канала ВР-1 превышает нормативное значение, что вызвано зарастанием русла канала вдоль берегов, отложением наносов, а также особенностью формы поперечного сечения.

3. В результате гидравлических расчетов Гашунского канала было установлено, что заиливание русла канала в расчетном створе будет происходить при расходе водного потока $Q < 2,75$ м³/с и наполнении канала $h < 1$ м. При оценке русла Гашунского канала на подверженность размыву было определено, что канал на участке контрольного створа не может пропускать заданные расходы, не подвергаясь размыву. Проверка русла Яшкульского канала в контрольном створе на заиливание и размыв показала, что его русло будет подвергаться размыву и заиливанию в рассмотренном

диапазоне скоростей водного потока.

ЛИТЕРАТУРА

- Сангаджиев М.М., Онкаев В.А. Вода Калмыкии – экология и современное состояние // Вестник Калмыцкого университета. 2012. № 3(15). С. 18–25.
- Дедова Э.Б., Шабанов Р.М., Дедов А.А. Пути повышения эффективности функционирования рисовой оросительной системы на территории Сарпинской низменности // Colloquium-journal. 2019. № 5(29). С. 41–43.
- Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации [Электронный ресурс]: утв. Постановлением Правительства РФ от 14 мая 2020 г. № 731. Доступ из справ. правовой системы «Консультант-Плюс».
- Бородычев В.В., Дедова Э.Б., Сухарев Ю.И. Ресурсно-экологическая оценка рисовых агроландшафтов Сарпинской низменности // Природообустройство. 2016. № 2. С. 55–61.
- Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. М.: Колос, 1979. 255 с.
- Косиченко Ю.М. Гидравлические и экологические аспекты эксплуатации каналов. Новочеркасск: НГМА, 2000. 230 с.
- Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: Колос С, 2007. 655 с.
- Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03–85 (с изм. № 1): СП 100.13330.2016: введ. в действие с 17.06.17. М.: Стандартинформ, 2017. 231 с.
- Косиченко Ю.М., Бакланова Д.В. Расчет фильтрации через дамбу канала в насыпи и оценка риска аварийных ситуаций // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. № 4(168). С. 77–81.

10. Михневич Э.И. Новые способы гидравлического расчета каналов // Мелиорация. 2016. № 3. С. 7–12.

11. Косиченко Ю.М. Оценка достоверности расчетов удельного фильтрационного расхода через насыпную дамбу необлицованного канала // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2022. № 2(86). С. 135–142.

12. Бакланова Д.В. Расчет фильтрации через земляные дамбы на проницаемом основании // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1(21). С. 196–208.

13. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Особенности гидравлических и фильтрационных расчетов осушительно-оросительной системы // Природообустройство. 2021. № 4. С. 90–98. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-90-98.

REFERENCES

1. Sangadzhiev M.M., Onkaev V.A. Voda Kalmykii – jekologija i sovremennoe sostojanie // Vestnik Kalmyckogo universiteta. 2012. No 3(15). Pp. 18–25.

2. Dedova Je.B., Shabanov R.M., Dedov A.A. Puti povyshenija jeffektivnosti funkcionirovanija risovoj orositel'noj sistemy na territorii Sarpinskoj nizmennosti // Colloquium-journal. 2019. No 5(29). Pp. 41–43.

3. Gosudarstvennaja programma jeffektivnogo вовлечения в оборот zemel' sel'skohozjajstvennogo naznachenija i razvitija meliorativnogo kompleksa Rossijskoj Federacii [Jelektronnyj resurs]: utv. Postanovleniem Pravitel'stva RF ot 14 maja 2020 g. No 731. Dostup iz sprav. pravovoj sistemy «Konsul'tant-Pljus».

4. Borodychev V.V., Dedova Je.B., Suharev Ju.I. Resursno-jekologicheskaja ocenka risovoj agrolandshaftov Sarpinskoj nizmennosti // Prirodobustrojstvo. 2016. No 2. Pp. 55–61.

5. Altunin V.S. Meliorativnye kanaly v zemljanyh ruslah. M.: Kolos, 1979. 255 p.

6. Kosichenko Ju.M. Gidravlicheskie i jekologicheskie aspekty jekspluatacii kanalov. Novoherkassk: NGMA, 2000. 230 p.

7. Shterenliht D.V. Gidravlika. M.: Kolos S, 2007. 655 p.

8. Meliorativnye sistemy i sooruzhenija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.06.03–85 (s izm. № 1): SP 100.13330.2016: vved. v dejstvie s 17.06.17. M.: Standartinform, 2017. 231 p.

9. Kosichenko Ju.M., Baklanova D.V. Raschet fil'tracii cherez dambu kanala v nasyp i ocenka riska avarijnyh situacij // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehniceskie nauki. 2012. No 4(168). Pp. 77–81.

10. Mihnevich Je.I. Novye sposoby gidravlicheskogo rascheta kanalov // Melioracija. 2016. No 3. Pp. 7–12.

11. Kosichenko Ju.M. Ocenka dostovernosti raschetov udel'nogo fil'tracionnogo rashoda cherez nasypnuju dambu neoblicovannogo kanala // Puti povyshenija jeffektivnosti oroshaemogo zemledelija. 2022. No 2(86). Pp. 135–142.

12. Baklanova D.V. Raschet fil'tracii cherez zemljanye damby na pronicaemom osnovanii // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii. 2016. No 1(21). Pp. 196–208.

13. Kosichenko Ju.M., Baev O.A. Osobennosti gidravlicheskih i fil'tracionnyh raschetov osushitel'no-orositel'noj sistemy // Prirodobustrojstvo. 2021. No 4. Pp. 90–98. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-90-98.

Талалаева Виктория Федоровна, науч. сотр. гидротехнического отдела, vika-silchenko@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2541-204X; **Баев Олег Андреевич**, доктор техн. наук, доц., вед. науч. сотрудник, нач. гидротехнического отдела, Oleg-Baev1@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0142-4270; **Колганов Александр Васильевич**, доктор техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник отдела РВП в АПК, kolganov49@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0234-0079 (Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, г. Новочеркасск).

УДК 631.6:631.47

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-17-24

ПОЧВЕННЫЕ ВОДОХРАНИЛИЩА

Н.Н. ДУБЕНОК, В.Н. МАРКИН, А.Д. СОЛОШЕНКОВ, В.В. ШАБАНОВ

Ключевые слова: catena, ценность почвенной влаги, требования биотического сообщества к водному режиму почв, депонирование углерода, точная мелиорация.

Keywords: catena, soil moisture capacity, soil reservoirs, requirements of the biotic community to the water regime of soils, carbon sequestration, precise hydro amelioration.

Аннотация. В статье для точного мелиоративного регулирования обоснована целесообразность введения «нового» научного понятия – почвенные водохранилища. Рассмотрение почвенных водохранилищ как самостоятельных объектов точного мелиоративного управления, в которых обитает почвенное биотическое сообщество, позволит дифференцировать управление водным режимом между сельскохозяйственными растениями и почвенной биотой, требования которых к условиям внешней среды во многих случаях не совпадают. Областью применения данной разработки может быть оптимизация мелиоративных режимов сельскохозяйственной культуры и почвенной биоты, что очень важно для обоснования режимов депонирования углерода при мелиорации земель. В результате проведенных исследований, создан определенный методологический подход и получены конкретные рекомендации, которые могут быть использованы не только в области мелиорации земель, но и в гидрологических расчетах. Предлагается рассматривать почвенные водохранилища, со всеми атрибутами, присущими наземным водохозяйственным системам. Обсуждается возможность увеличения объема почвенных водохранилищ, за счет увеличения свободной пористости, т. е. улучшения структуры почвы. Рассматривается возможность прогнозирования весеннего поверхностного стока с использованием линейной связи объемов почвенных вод перед замерзанием почвы осенью и перед оттаиванием весной. Информирование о наличии зарегистрированных баз данных продуктивных влагозапасов на различных элементах ландшафтных катен, по которым возможно определить объемы почвенных водохранилищ на территориях различных стран (территория бывшего Советского Союза).

Abstract. The expediency of introducing the concept of «soil reservoirs» is considered in the article. Water in the soil plays an important role both in the

process of harvesting and carbon sequestration by the soil biota. Quantitative and qualitative assessment of soil water resources is necessary because the intensity of sequestration significantly depends on the volume of water in the soil. To consider soil reservoirs similarly to reservoirs on rivers is proposed. The Top of surcharge storage for soil reservoirs corresponds a full moisture capacity. The normal retaining level for soil ones does a maximum field moisture capacity. The optimal volume of soil reservoirs does a field moisture capacity. Dead storage of a reservoir – wilting moisture. The boundary of soil biota life (this is the capacity of water in which life is possible) is a maximum molecular moisture capacity or hygroscopic one, depending on the type of soil microorganisms. This approach makes it possible to quantify the value of various water forms for the activities of terrestrial and soil ecosystems and to determine their role in the deposition of the carbon footprint. In this case, one is able to calculate the economic efficiency of various types of land reclamation for carbon sequestration. The possibility of increasing the volume of soil reservoirs by increasing free porosity, i.e. improving the soil structure, is discussed. As one of the practical applications, to predict spring high water using a linear function of soil water capacity before and after freezing of the soil during the cold season is considered. The information about availability of registered databases of productive moisture capacity on various elements of landscape catenae is given. It allows you to determine volumes of soil reservoirs on the territories of various countries (the territory of the former Soviet Union).

Введение. Существующие глобальные «вызовы» (повышение концентрации углерода в атмосфере, изменение климата, рост численности населения) [10] повышают роль почвенных вод в создании оптимальных (для человека) условий жизни на Земле. Представляется, что сейчас почвенным водам в водном балансе Земли уделяется недостаточное внимания в связи с их «незначительным» абсолютным объемом (с гидрологической точки зрения – 10...25% от осадков). Однако роль, кото-

рую играют почвенные воды в создании биосферы Земли, огромна. Практически все органическое вещество суши, а это основная часть органики на Земле, создана на основе почвенных вод. Кроме того, нарушение биосферного (заложенного природой в данном географическом месте) режима почвенных вод приводит к уничтожению порового пространства (объемов почвенных водохранилищ) и деградации почв. Создание человеком искусственных почв, столь же эффективных, как природные, пока невозможно, но управление структурой и функционированием почв природоподобными методами не только экологически, но экономически целесообразно. Тем более что в настоящее время такие методы (ландшафтное земледелие, комплексная мелиорация, точное земледелие, органическое земледелие и др.) получили достаточно широкое распространение. Однако для дифференцированного управления почвенными водами, существующие методы не всегда дают ожидаемый эффект. В первую очередь это связано со стохастичностью распределения почвенных пор в пространстве и во времени, а также с существенной неоднородностью порового пространства в мезо- и микромасштабах [13].

Поскольку вода в почве играет основную роль при создании биомассы (депонировании углерода), количественная и качественная оценка почвенных вод весьма актуальна. Это связано с тем, что интенсивность депонирования углерода существенно зависит не только от объемов воды в почве, но и от распределения ее по глубине в соответствии с динамическим развитием растений и почвенной биоты. Отсюда важны не только интегральные характеристики, такие как декадные влагозапасы в метровом слое почвы, но и послойная (0...10, 10...25, 25...50, 50...100 см) динамика изменения запасов.

Есть еще один аспект рассматриваемой проблемы — экономико-правовой. На протяжении десятилетий во всем мире тратятся большие ресурсы на «восстановление плодородия», однако деградация почвенного покрова с каждым годом увеличивается. Причиной такого положения, как нам представляется, является неполная формулировка термина плодородие почвы. Существующее определение термина «плодородие почвы»: «Способность почвы создавать благоприятные условия для роста растения», предлагается в [17] заменить на: «Способность почвы создавать благоприятные условия для жизнедеятельности растения и почвенной биоты». В этом случае будет учтена почвенная биота как объект управления, и правовая неурегулированность действий относительно уничтожения почвенной боты (неоптимальные режимы, ядохимикаты и пр.) будет урегулирована. Создание оптимальных условий почвенной биоте, в том числе и по водному режиму, сейчас делается по остаточному принципу. По умолчанию считается, что требования сельскохозяйственной культуры совпадают с требованиями почвенного биотического сообщества. Но это, в большинстве случаев, не так. Большинство сельскохозяйственных культур «переселены» из других географических (климатических) зон. Требования биоты в местах происхождения сельскохозяйственных растений существенно отличаются от требований биоты в местах современного возделывания культур. Это относится

в первую очередь и к водному режиму. Поэтому введение понятия «почвенные водохранилища» связано с необходимостью обратить особое внимание на «многоцелевое» использование почвенных водных ресурсов. Все это позволит не только получать высокие урожаи и повышать (по крайней мере, сохранять) плодородие, но и максимизировать депонированием углерода.

Реализация такого подхода возможна при использовании положительного опыта, который накоплен при управлении наземными водохозяйственными системами. Хотя система почвенных водохранилищ и методы управления ими будут намного сложнее.

Почвенные водохранилища можно рассматривать, со всеми атрибутами, присущими наземным водохозяйственным системам. *Форсированный объем*, для почвенных водохранилищ — *полная влагоемкость*. *Нормальный подпорный уровень*, для почвы — *предельная полевая влагоемкость*. *Оптимальный уровень* почвенного водохранилища — *наименьшая влагоемкость*. *Мертвый объем* — *влажность завядания*. *Граница жизни почвенной биоты* (объем воды, при котором возможна жизнь) — *максимально молекулярная или гигроскопическая влажность*, в зависимости от вида почвенных микроорганизмов.

Такой подход дает возможность количественно установить *ценность различных форм воды* для деятельности наземных и почвенных экосистем и определить их роль в создании биомассы (депонировании углеродного следа). Это позволяет сделать расчет экономической эффективности различных видов мелиорации почв, для депонирования углерода. Кроме того, путем создания оптимальных условий в системе растение — почвенная биота, интенсифицируется их взаимодействие и запускается процесс «структурообразования» почвы. Это дает возможность увеличить объем почвенных водохранилищ, за счет увеличения свободной пористости, т. е. улучшения структуры почвы.

Следует отметить, что информация о продуктивных влагозапасах под разными культурами, на различных ландшафтных элементах накапливалась в течение десятков лет в системе агрометеорологической службы. В настоящее время она структурируется в виде зарегистрированных баз данных в четырехстах точках территории бывшего Советского Союза [7].

Таким образом, предлагаемый подход может существенным образом повлиять не только на экономическую заинтересованность сельхозтоваропроизводителя получать продукцию, но и экономить воду и, самое главное, сохранять или повышать почвенное плодородие, т. к. в этом случае объемы почвенных водохранилищ увеличиваются, режимы становятся более благоприятными и экономически выгодными. Учитывая, что наземная и подземная биомасса линейно связана с количеством депонированного углерода, управление почвенными водохранилищами, можно использовать в качестве инструмента минимизации углеродного следа.

Объекты и методы. Водные ресурсы почвы составляют 0,004 % от общих запасов воды на Земле (80 тыс. км³), в том числе 0,02 % пресных вод. При этом сток рек, как наиболее широко используемого источника воды, составляет 0,0002 % (1,2 тыс. км³) от общих запасов воды,

или 0,006% от общих запасов пресной воды, но благодаря круговороту воды реки несут в мировой океан 40 тыс. км³ в год. Однако и этот объем намного меньше почвенных вод. Площадь распространения почвенных вод оценивается в 82 млн км² (при площади суши 149 млн км²). Это означает, что средняя мощность влагосодержащего слоя составляет 0,98 м. Однако объемы почвенных вод неравномерно распределены по территориям и в ряде в ряде регионов, влага лимитирует продуктивность живых организмов. Так, аридизация в мире захватывает 28% территории суши, а избыток влаги наблюдается на площади 10% [12].

Орошение и осушение позволяют управлять влагозапасами, в соответствии с требованиями живых организмов (растений и почвенной биоты) [16], подобно тому, как это делается при регулировании речного стока водохранилищами для целей водообеспечения населения и отраслей экономики.

Итак, «почвенное водохранилище» — природно-антропогенная емкость порового пространства почвы, воды которой поддерживают жизнедеятельность растений и почвенной биоты. Потенциальная емкость почвенного водохранилища и объемы воды в нем, регулируются специальными биотехнологическими, агротехническими и мелиоративными мероприятиями.

«Почвенные влагозапасы» располагаются в почвенных водохранилищах, режимы которых можно регулировать. Такое регулирование необходимо для решения следующих задач:

- получение стабильных и высокие урожаи с сохранением почвенного плодородия;
- регулирование «углеродного следа» на Планете (сельскохозяйственные растения и почвенная биота связывают углерод из атмосферы, создавая большое количество органической биомассы).

Управление почвенными водохранилищами позволит решать данные вопросы в рамках стратегии Зеленой экономики [6, 20]. Управление возможно осуществлять пассивными и активными методами.

Пассивные — регулируют влагосодержание в почве косвенным путем с помощью агро-, лесо-, снеготехнических мероприятий (например, распашка поперек склона, рыхление почвы, устройство лесополос, уплотнение снега и снегозадержание). Эти мероприятия способствуют накоплению влаги в почве. Однако объемы и распределение влаги в системе растения—почвенная биота не контролируются, а это не гарантирует повсеместного создания оптимальных условий для растения и (или) почвенной биоты.

Активные методы — позволяют регулировать влагозапасы в соответствии с потребностью растений и (или) почвенной биоты. Основным механизмом служит **комплексная мелиорация**. Она позволяет на количественном уровне осуществлять подачу воды из почвенных водохранилищ (W) для достижения ряда целей:

- получение высоких планируемых урожаев $Y_{пл}$; для этого влага регулируется в соответствии с требованиями растений (например, при выращивании дорогостоящих культур, выращивание которых в конкретном регионе обусловлено целым комплексом благоприятных природно-климатических факторов):

$$Y = f_y(W) \rightarrow Y_{пл} \dots Y_{макс};$$

- сохранение и даже повышение почвенного плодородия; для этого влага регулируется в соответствии с требованиями почвенной биоты B , что может привести к некоторому снижению урожайности растений, но направлено на сохранение плодородия почв:

$$B = f_B(W) \rightarrow 0,8B \dots B_{макс};$$

- депонирование углерода в растениях D_y и почве D_B ; для этого почвенные влагозапасы регулируются для максимизации поглощения углерода системой почва—растение. Например, для условий орошения оптимальный вариант управления может определяться областью Парето, располагающейся между оптимальными влагозапасами для почвенной биоты $B_{макс}(W_{опт}^B)$ и растений $Y_{макс}(W_{опт}^Y)$:

$$D_{\Sigma} = D_y + D_B \rightarrow f_{y,B}(W) \rightarrow B_{макс} \dots Y_{макс}.$$

Таким образом, целевое использование почвенных водохранилищ может быть направлено не только на достижение конкретной цели, но имеется возможность и «комплексного» многоцелевого использования. В определенные моменты времени, управление водохранилищами направляется на достижение конкретной цели (получение высоких урожаев растений; сохранение почв путем повышения биопродуктивности почвенной биоты или максимальное снижение углеродного следа) так, чтобы максимизировать суммарный эффект. Однако, если при оценке урожая и штрафов за углеродный след, денежные оценки законодательно установлены, то оценка «стоимости» почвенной биоты, как самостоятельного объекта управления в законах не прописана, поэтому «избыточное» использование ядохимикатов слабо регламентируется и тем более не оплачивается сохранение и преумножение плодородия.

«Углеродный след» деятельности человека (повышение содержания CO_2 в атмосфере) породил «углеродную стратегию» в мире. Механизмы стратегии направлены на создания технологий, снижающих выбросы углерода, т. е. перехода на более высокие «углеродные стандарты», за счет мероприятий позволяющих более интенсивно поглощать углекислый газ из атмосферы. Это возможно при создании оптимальных условий не только для роста и развития растений, но и при создании условий для почвенного биотического сообщества.

Защита экспортеров сельскохозяйственной продукции России может быть основана на *зеленом сельском хозяйстве*, к методам которого относятся [3, 8]:

- карбоновое земледелие (аккумуляция углерода в почве за счет его поступлений с органическими удобрениями и сидератными культурами, а так же снижение темпов потерь углерода из почвы в результате дыхания и эрозии почвы);
- регенеративное сельское хозяйство (совокупность неразрушающих методов ведения сельского хозяйства, обеспечивающих восстановление почв, в процессе хозяйствования).

При этом применение любого метода ведения сельского хозяйства направляется на поглощение атмосферного углерода растениями и почвой, что позволяет

снизить углеродный след производства сельскохозяйственной продукции, повысить плодородие почв при получении экономически приемлемой урожайности.

Одним из путей снижения углеродного следа является оптимизация условий произрастания растений и жизнедеятельности почвенной биоты. Мобильным инструментом в этом случае служит точная мелиорация [17], которая, с одной стороны, учитывает требования растений и почвенной биоты [16], а с другой стороны, учитывает пространственно-временную неоднородность почв, в том числе почвенных влагозапасов на мезо- и микроуровнях [15]. Управление почвенными влагозапасами на мезоуровне, пространственной неоднородности, подразумевает рассмотрение территории ландшафтной катены.

В настоящее время пахотные земли на планете увеличились до 1,87 млрд га. Средняя урожайность зерновых составляет 3,96 т/га. Доля с.-х. сектора в общем количестве глобальных антропогенных выбросов парниковых газов составляет, приблизительно, 13% (5...6 Гт экв. CO₂ в год) [1]. Сельское хозяйство способствует значительному уменьшению парниковых газов, поглощая 10% выбросов парниковых газов, в том числе 32% выбросов CO₂.

Секвестрация углерода (сохранение в твердой устойчивой форме посредством прямой или опосредованной фиксации атмосферной двуокиси углерода) биологическими системами, рассматривается как способ консервации углерода. Улавливание углерода в сельскохозяйственном производстве связано с урожайностью растений и является одним из лучших способов сохранения углерода в биологической системе. Повышение урожайности путем внесения удобрений позволяет улавливать 0,3 т С/га в год, а орошение еще – 0,2 т С/га в год [20]. Можно полагать, что увеличение биомассы почвенной биоты путем создания оптимальных условий по водному режиму позволит увеличить депонирование углерода еще на 10...20%.

Нерациональные способы ведения сельского хозяйства привели к деградации трети территории мировых почв, что вызвало огромный выброс углерода в атмосферу. Восстановление этих почв может привести к поглощению до 63 млрд т углерода, что в значительной степени будет способствовать смягчению последствий изменения климата [5].

Управление процессами почвообразования, путем оптимизации режимов почвенных водохранилищ, позволит производить на 58% больше продовольствия. В этом случае почвы смогут поглотить около 800 Мт углерода в год, т. е. более 0,4% выбросов парниковых газов. А лесотехнические мероприятия позволят дополнительно поглощать 24 Мт углерода (учитывая, что лесополоса шириной 5 м составляет 5% площади поля и 2,5 га поглощают 1 т углерода в год) [3].

Таким образом, еще одной целью работы является определение возможности использования почвенных водохранилищ для снижения углеродного следа, путем управления продукционными процессами растений и жизнедеятельностью почвенной биоты (почвенным плодородием).

Результаты и обсуждение. Запасы влаги в почвенных водохранилищах неоднородны в пространстве и во времени, изменяются в соответствии с почвенной неоднородностью, например на мезоуровне, т. е. на уровне катены. Катены отражают закономерную последовательность размещения типов почв на склонах [21], формируя агрогидрологические районы. Их влагозапасы и представляют своего рода почвенные водохранилища. На европейской части России выделяются девять агрогидрологических районов (рис. 1) [14]: ОБВ (обводнение); МКУ (максимального капиллярного увлажнения); ПКУ (периодического капиллярного увлажнения); ВИУ (временно-избыточного увлажнения); КППВ (увлажнения капиллярно-подвешенной и капиллярно-подперто-подвешенной влагой); ПВП (полного весеннего промачивания); УВП (умеренного весеннего промачивания); СВП (слабого весеннего промачивания); ОСВП (очень слабого весеннего промачивания).

Вверх по склону влагозапасы закономерно уменьшаются, вследствие оттока воды с вышерасположенных участков в пониженные элементы рельефа местности. Переток оценивается в 170...280 мм (рис. 2) от района ОСВП до ОБВ или примерно 56...93 мм составляют перетоки между тремя районами (верхняя часть склона, средняя и нижняя). Это сопоставимо с величиной оросительной нормы.

Например, на территории европейской части России для кормовых культур средняя оросительная норма составляет 192 мм (изменяясь в пределах 77...555 мм), а для многолетних трав – 266 мм (89...747 мм). Для условий степной зоны величина коэффициента водопотребления капусты изменяется от 55 до 114 м³/т [2]. Для травосмеси люцерны и злаковых трав данный коэффициент составляет 67...133 м³/т [4]. В данном случае учет объемов почвенных водохранилищ позволяет экономить водные ресурсы, размещая культуры в соответствии с емкостью водохранилищ. При этом почвенные водохранилища работают как бы в каскаде.

Каждому водохранилищу каскада, соответствуют определенные запасы воды, что и позволяет сделать

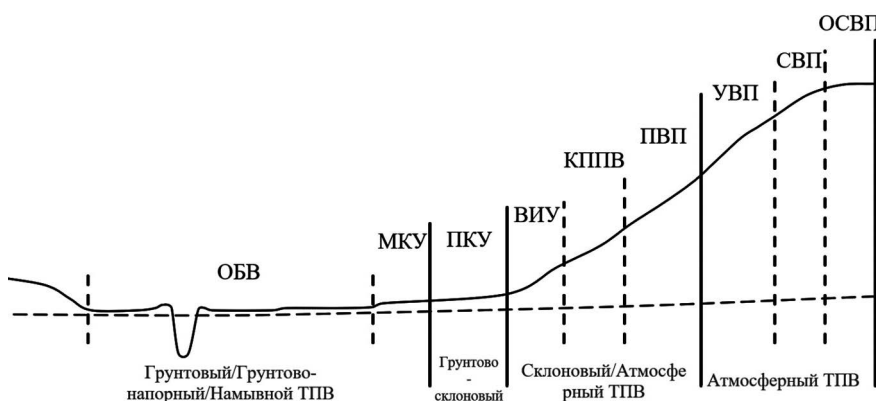


Рис. 1. Расположение агрогидрологических районов и типов водного питания (по Брудастову) на катене [15]

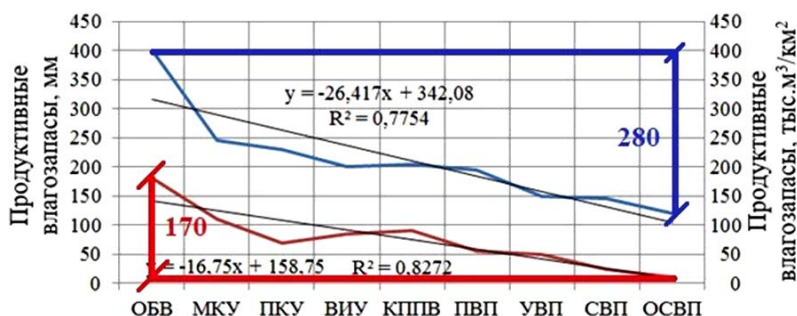


Рис. 2. Изменение размаха продуктивных почвенных влагозапасов в слое 0...100 см по агрогидрологическим районам [15]

выбор культур, чьи требования наилучшим образом соответствуют фактическим продуктивным почвенным влагозапасам.

На примере Воронежской области (рис. 3), где выделяются пять агрогидрологических районов [9], многолетние травы наилучшим образом соответствуют району УВП.

Хорошее соответствие наблюдается и для районов: ПВП; УВП и СВП. В отношении капусты наилучшие условия соответствуют району КППВ. Хорошее соответствие наблюдается и для района ПВП.

Влагозапасы в почвах Воронежской области накапливаются в марте и расходуются до октября включительно (рис. 4). Наблюдается закономерное снижение влагозапасов за период вегетации растений, которое описывается полиномиальной зависимостью с коэффициентом достоверности не ниже 0,93. Минимум зависимости приходится на август месяц с последующим незначительным повышением влагозапасов, что согласуется с количеством атмосферных осадков за теплый период года (снеготаяние приводит к накоплению влаги в почве в конце марта).

Для почвенных водохранилищ Воронежской области в слое почвы 0...100 см наблюдается зависимость между влагозапасами на начало (конец марта) и конец холодного периода (конец октября) (рис. 5).

Зависимость практически линейная, что показывает достаточно высокий «коэффициент связности». Потери воды оцениваются в 3%. Данная зависимость определяет несколько стратегий управления гидромелиоративным режимом:

- оптимизация условий выращивания растений (чем меньше накоплено влагозапасов, тем больше потребуются вегетационных поливов и большей оросительной нормы);
- оптимизация условий почвообразования (увеличение активности почвенных организмов), это позволит увеличить поглощение углерода из атмосферы в период слабой активности посевов;
- снижение паводковой опасности – меньшая влагонасыщенность почв весной, позволит большую часть талой (поверхностной) воды перевести в грунтовую, снижая объем поверхностного стока, а значит, снижая максимальные расходы в водоприемнике. (Паводок 2024 г. показал необходимость учета данной составляющей).

Рассмотрим указанные стратегии применительно к вопросам снижения углеродного следа. Первая

стратегия подразумевает проведение влагозарядковых поливов и эффективна для создания оптимальных условий произрастания многолетних трав и озимых растений (весной растения активно вегетируют). Растения фотосинтезируют и поглощают атмосферный углерод.

В случае выращивания яровых культур следует оптимизировать условия для почвенных организмов, повышая почвенного плодородия. В этом случае управление почвенными влагозапасами (водохранилищами)

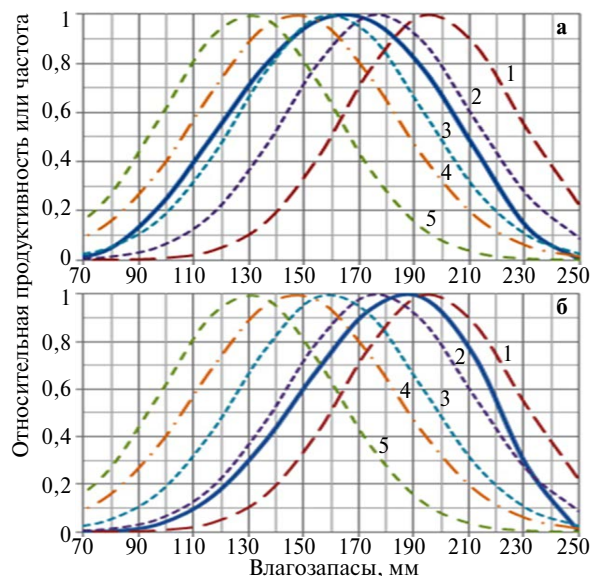


Рис. 3. Соответствие требований многолетнего злакового травостоя (а) и капусты (б) кривым распределения почвенных влагозапасов в слое 0...50 см: 1 – КППВ; 2 – ПВП; 3 – УВП; 4 – СВП; 5 – ОСВП

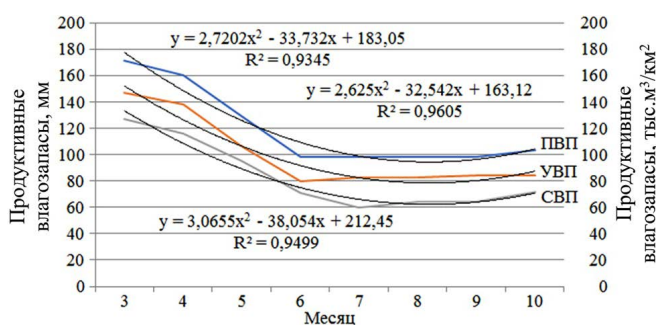


Рис. 4. Изменение продуктивных почвенных влагозапасов (слой 0...100 см) в течение теплого периода года

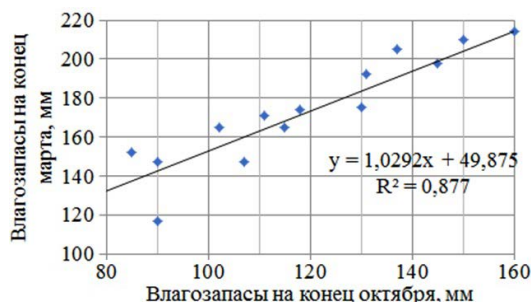


Рис. 5. Зависимость влагозапасов на конец марта от влагозапасов на конец октября

осуществляется в соответствии со второй стратегией, для активизации почвенной биоты. Это позволит депонировать углерод.

По мере роста растительности, приоритет оптимизации водного режима изменяется в сторону создания оптимальных условий для растений (первая стратегия). Это позволит повысить продуктивность и максимизировать поглощение углерода. К концу теплого периода, после уборки урожая, приоритет опять переходит к почвенной биоте (вторая стратегия). Таким образом, в течение всего теплого периода года, максимизируется суммарная биомасса системы растение–почва. Суммарная биомасса включает надземную и подземную части растений. Количество поглощенного углерода можно оценить, зная, что в среднем, содержание углерода в растениях составляет 45% их массы.

На примере Воронежской области, проведена оценка поглощения углерода растениями, с учетом

оптимизации условий произрастания растений и деятельности почвенной биоты на катене. При этом выбираются растения, которые наилучшим образом соответствуют условиям, формирующимся в разных частях катены (агрогидрологических районах) – влаголюбивые и малотребовательные к влаге культуры (табл. 1).

Эти параметры входят в уравнение продуктивности [18], которое в безразмерном виде выглядит так:

$$S = \left(\frac{\varphi}{\varphi_{opt}} \right)^{\gamma_{opt}} \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{\varphi_{max} - \varphi_{opt}} \right)^{\gamma(\varphi_{max} - \varphi_{opt})}$$

где S – относительная продуктивность; φ – относительные влагозапасы. Величина параметра γ зависит от вида растения или почвенной биоты.

Требования биоты почв учитываются на основе «Закона оптимальности» и «Закона адаптации», в которых говорится, что система оптимальным образом развивается в определенных пространственно-временных пределах и наилучшим образом приспособлена к условиям ее исторического и эволюционного развития [11], поэтому они могут быть описаны уравнением, приведенным выше [18]. В связи с тем, что формирование почвенной биоты происходит в природных условиях формирования почв, вид кривых требований почвенной биоты должен совпадать с кривыми распределения вероятности основных факторов, в частности влагозапасов [9]. Кривая распределения почвенных влагозапасов в слое 0...50 см хорошо соответствует закону нормального распределения. Для параметризации его используются среднеемноголетние влагозапасы и их среднеквадратическое отклонение (табл. 2).

На рис. 6 показано соответствие требований растений (кривая 1) кривым распределения влагозапасов. Последние отражают условия произрастания растений в конкретных агрогидрологических районах Воронежской области (по В.Н. Маркину) и характеризуют требования почвенной биоты.

Наилучшее соответствие условий среды и требований зерновых наблюдается для района СВП. Картофелю и капусте лучше соответствуют условия района УВП и ПВП, а многолетним злаковым травам – УВП (табл. 3). Выращивая данные культуры в соответствующих районах катены, получим урожайность растений на уровне продуктивности не менее 0,8, а степень оптимальности условий почвообразования более 0,8. В табл. 3 выделены районы, где условия для растения и почвенной биоты наиболее благоприятны для получения высокого урожая при сохранении плодородия.

Высокие значения относительной продуктивности соответствую-

Характеристика растений: оптимальные влагозапасы в долях от полной продуктивной влагоемкости w_{opt} , коэффициент саморегулирования растений γ , максимальная урожайность Y_{max}

Вид растений	w_{opt}	γ	Y_{max} , ц/га	Соотношение надземной и подземной части
Зерновые (яровая пшеница)	0,65	5,0	106	1,5/1,5*
Овощи (капуста)	0,67	5,3	600	1,0/0,5
Картофель	0,54	5,6	400	0,6/1,0
Многолетние травы	0,57	6,2	190	1,0/3,0

Примечание. *Солома и корни по отношению к массе зерна.

Таблица 1

Среднеемноголетние влагозапасы w_{cp} в слое 0...50 см и их среднеквадратическое отклонение σ за период вегетации

Тип почвы	ВЗ	ПВ	Агрогидрологические районы					
			СВП		УВП		ПВП	
			w_{cp} , мм	σ , мм	w_{cp} , мм	σ , мм	w_{cp} , мм	σ , мм
Суглинок	60	250	130	33	165	33	185	45

Примечание. ВЗ – влажность завядания; ПВ – полная влагоемкость.

Таблица 2

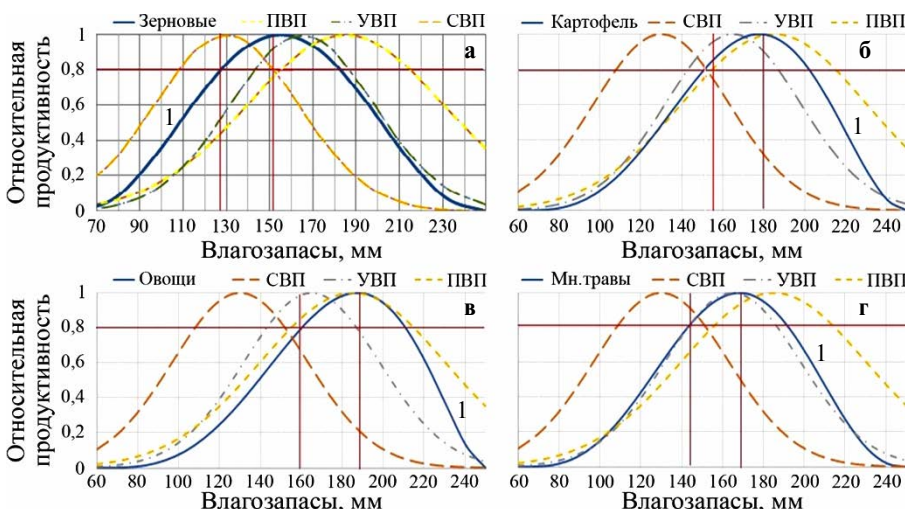


Рис. 6. Соответствие требований растений (кривая 1) кривым распределения влагозапасов в слое 0...50 см

ют значительной массе поглощенного углерода, в надземной и подземной частях растений (табл. 4). Наибольшее депонирование углерода зерновыми культурами отмечается в районах СВП и ПВП. В отношении картофеля и многолетних трав таким районом является УВП. Капуста дает наибольшее поглощение углерода в районах УВП и ПВП.

Заключение. Управление ресурсами почвенных вод в эпоху зеленой экономики является актуальной задачей, которую невозможно решить без целенаправленного управления внутрипочвенным пространством.

1. Целенаправленное управление емкостью водосодержащего порового пространства почвы позволяет одновременно решать две задачи: экономическую и экологическую. Но для создания законодательной базы и оплаты экологической составляющей целесообразно введение понятия «почвенные водохранилища».

2. Неправильный режим управления почвенной влагой (объемами почвенных водохранилищ) приводит к снижению биомассы растения и почвенной биоты.

3. Снижение биомассы растений и почвенной биоты на водосборе реки снижает общий объем депонирования углерода, приводит к разрушению порового пространства (уменьшению емкости почвенного водохранилища) и смыву почв.

4. В целях разработки количественных методов управления водными ресурсами почв целесообразно рассматривать влагозапасы почвы как воды «почвенных водохранилищ», а пространство доступной биотическому сообществу почвенной влаги – как «емкость почвенного водохранилища».

5. Емкость почвенного водохранилища может меняться по глубине в зависимости от механического состава почвы, методов воздействия на почву и деятельности в системе почвенная биота–растение.

6. «Ценность» водных ресурсов почвы для продукционного процесса различна по глубине почвы и во времени, что необходимо учитывать при регулировании водного режима в системе растение–почвенная биота.

7. Требования почвенной биоты и сельскохозяйственного растения к водному режиму могут не совпадать. Это необходимо учитывать при разработке мелиоративных систем управления.

8. При разработке режимов управления почвенными водохранилищами максимизация целевой функции – суммарной биомассы сельскохозяйственного растения и почвенной биоты, дает возможность максимизировать объем депонирования углерода.

9. Максимизация урожая сельскохозяйственной культуры может привести к созданию неоптимальных условий для почвенной биоты и снижению суммарно-

Таблица 3

Урожайность растений, биомасса надземной и подземной части, относительная характеристика продуктивности почвенной биоты

Растение	У, ц/га	Биомасса, ц/га		Агрогидрологический район**		
		Надземная	Подземная	СВП	УВП	ПВП
Зерновые	80	200*	120	0,98/0,8	0,5/0,99	0,4/0,75
Картофель	320	192	320	0,8/0,3	0,9/0,9	0,85/1
Капуста	480	480	240	0,7/0,2	0,98/0,8	0,8/1
Многолетние травы	152	152	456	0,9/0,5	0,8/1	0,65/0,97

Примечание. *Урожай зерна + солома; **относительная биомасса растения (числитель) и почвенной биоты (знаменатель) на уровне продуктивности растений $0,8 \leq S \leq 1$.

Таблица 4

Суммарная масса углерода, депонированная в биомассе растений в разных агрогидрологических районах, т/га

Растение	Агрогидрологический район			Максимум по культуре
	СВП	УВП	ПВП	
Зерновые	14	12	14	14
Картофель	14	25	22	25
Капуста	24	32	32	32
Многолетние травы	20	27	24	27
Максимум по катене	24	32	32	

го эффекта: [(стоимость урожая) + (стоимость плодородия)] – (штрафы за углеродный след).

10. Почвенные водохранилища содержат огромные запасы воды, связанные между собой, которые могут управляться с помощью агротехнических, лесотехнических и мелиоративных мероприятий. Наибольшую мобильность обеспечивают гидромелиоративные мероприятия, что позволяет их выделить как основные.

11. Учет разнообразия почвенных водохранилищ на катене позволяет: решать задачи сохранения почвенного плодородия и повышать продуктивность почвенной биоты; определять оптимальное размещение культуры для выращивания на конкретном элементе катены в соответствии с требованиями растений к условиям среды; планировать дифференциацию использования элементов катены для снижения углеродного следа.

Благодарность. Авторы признательны кафедре гидромелиорации и проблемной лаборатории РГАУ-МСХА за предоставленные материалы для проведения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологии для смягчения последствий изменения климата. Сельскохозяйственный сектор / Д.С. Апети, Субаш Дхар, Донг Хонгмин, Брюс А. Кимбал, Амит Гарг, Джикшиша Ападхиэй. UNEP, 2012 166 с. URL: <https://unepdtu.org/wp-content/uploads/sites/2/2019/06/5-technologies-for-climate-change-mitigation-agriculture-russian-final-2.pdf>.
2. Ахмедов А.Д., Абдуова Р.Ю. Продуктивность использования влаги белокочанной капустой при орошении в Волго-Донском междуречье // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 2(62). С. 32–41. DOI 10.32786/2071-9485-2021-02-03. EDN LUWDIU.
3. Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России: экспертный доклад / Под ред. А.Ю. Иванова, Н.Д. Дурманова (рук. авт. кол.); М.П. Орлов, К.В. Пиксендеев, Ю.Е. Ровнов и др. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 120 с.
4. Великандь Н.Т., Желтопузов В.Н., Хонина О.В. Урожайность и водопотребление агрофитоценозов многолетних трав // Вестник АПК Ставрополя. 2017. № 2(26). С. 181–184. EDN YULJID.

5. ФАО: Выпущена самая полная в мире карта запасов углерода в почве [Электронный ресурс]. URL: <https://agroexpert.md/rus/v-mire/fao-vypushchena-samaya-polnaya-v-mire-karta-zapasov-ugleroda-v-pochve>

6. О Федеральной научно-технической программе в области экологического развития российской федерации и климатических изменений на 2021–2030 гг. [Электронный ресурс]. URL: <http://science.gov.ru/media/files/file/wJgekXcVWebxcQmGATo4C8EHE2ZFjBh9.pdf> (дата обращения 27.07.2022).

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620353 РФ. Подекадная продуктивность озимых зерновых культур на почвах глинистого и суглинистого механических составов по агрогидрологическим районам Саратовской области: № 2021620248: заявл. 20.02.2021; опубл. 01.03.2021 / Н.Н. Дубенок, А.Д. Солошенко, В.В. Шабанов; заявитель ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». EDN IVQEJY.

8. Ковалев Ю.Ю., Поршнева О.С. Страны БРИКС в международной климатической политике // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Международные отношения. 2021. Т. 21. № 1. С. 64–78.

9. Маркин В.Н., Шабанов В.В. Обоснование орошения с учетом сохранения условий естественного почвообразования в Воронежской области // Актуальные проблемы землеустройства, кадастра и природообустройства: материалы III Международной научно-практической конференции факультета землеустройства и кадастров ВГАУ. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. С. 348–356.

10. О стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года: указ Президента РФ от 19.04.2017 № 176 // СЗ РФ. 24.04.2017. № 17. Ст. 2546.

11. Реймерс Н.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). М.: Журнал «Россия молодая», 1994. 368 с.

12. Романова Э.П., Куракова Л.И., Ермаков Ю.Г. Природные ресурсы мира. М.: Изд-во московского университета, 1993. 304 с.

13. Сковрцова С.Б. Строение порового пространства естественных и антропогенноизмененных почв: дис. ... д-ра с.-х. наук: 03.00.27. М., 1999. 387 с.

14. Средние многолетние запасы продуктивной влаги под озимыми и ранними яровыми зерновыми культурами по областям, краям, республикам и экономическим районам: Европейская часть СССР: справочник. Л.: Гидрометеоздат, 1986. Т. 1. 122 с.

15. Шабанов В.В., Солошенко А.Д. Дифференциация типов увлажнения по катене для рационального размещения сельскохозяйственных культур и планирования мелиоративных воздействий // Природообустройство. 2016. № 3. С. 104–109. EDN WJLCRX.

16. Шабанов В.В., Маркин В.Н., Солошенко А.Д. Оценка требований почвенной биоты к гидротермическим условиям внешней среды // Доклады ТСХА, Москва, 3–5 декабря 2019 г. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. С. 173–178. EDN JLEAZR.

17. Шабанов В.В., Голованов А.И. Некоторые аспекты точной мелиорации // Природопользование. 2019. № 1.

18. Шабанов В.В. Биоклиматическое обоснование гидротермических мелиораций. Л.: Гидрометеоздат. 1973.

19. Экологический словарь (2001) [Электронный ресурс]. URL: <http://bio.niv.ru/doc/dictionary/ecological/index.htm>

20. Conant R.T., Paustian K. and Elliott E.T. (2001): Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. Ecological Applications, 11, pp. 343–355.

21. United Nations Environment Programme (2020). Greening the Blue Report 2020: The UN System's Environmental Footprint and Efforts to Reduce it. Geneva: UNEP.

REFERENCES

1. Aprit D.S., Subash Dhahr, Dong Hongmin, Bruce A. Kimball, Amit Garg, Jikisha Apadhye. Technologies for Climate Change Mitigation – Agricultural Sector. UNEP, 2012. P. 166. URL: <https://unepdtu.org/wp-content/uploads/sites/2/2019/06/5-technologies-for-climate-change-mitigation-agriculture-russian-final-2.pdf>.

2. Akhmedov A.D. Water Use Productivity of Cabbage under Irrigation in the Volga-Don Interfluvium / A.D. Akhmedov, R.Yu. Abduova // Izvestiya of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2021. No. 2(62). Pp. 32–41. DOI 10.32786/2071-9485-2021-02-03. EDN LUWDIU.

3. Battle for Climate: Carbon Farming as Russia's Bet [Text]: Expert Report / Ed. A.Yu. Ivanov, N.D. Durmanov (Head of the Author's Team); M.P. Orlov, K.V. Piksenedev, Yu.E. Rovnoy et al.; National Research

University «Higher School of Economics». Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics, 2021. 120 p.

4. Velikdany N.T. Yield and Water Consumption of Agroecosystems of Perennial Grasses / N.T. Velikdany, V.N. Zheltopuzov, O.V. Khonina. // Bulletin of the Agricultural Complex of Stavropol. 2017. No. 2(26). Pp. 181–184. EDN YULJD.

5. The Most Comprehensive Carbon Stock Map in Soil Released [Electronic Resource]. URL: <https://agroexpert.md/rus/v-mire/fao-vypushchena-samaya-polnaya-v-mire-karta-zapasov-ugleroda-v-pochve>

6. On the Federal Scientific and Technical Program in the Field of Ecological Development of the Russian Federation and Climate Change for 2021–2030 [Electronic Resource]. URL: <http://science.gov.ru/media/files/file/wJgekXcVWebxcQmGATo4C8EHE2ZFjBh9.pdf> (accessed July 27, 2022).

7. Dubenok N.N. Certificate of State Registration of Database No. 2021620353, Russian Federation. Decadal Productivity of Winter Cereals on Clay and Loamy Soils by Agro-Hydrological Districts of Saratov Region: No. 2021620248: filed 20.02.2021; published 01.03.2021 / N.N. Dubenok, A.D. Soloshenkov, V.V. Shabanov; Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy». EDN IVQEJY.

8. Kovalev Yu.Yu., Porshneva O.S. BRICS Countries in International Climate Policy // Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: International Relations. 2021. Vol. 21. No. 1. Pp. 64–78.

9. Markin V.N., Shabanov V.V. Justification of Irrigation Considering the Preservation of Natural Soil Formation Conditions in Voronezh Region // Materials of the III International Scientific and Practical Conference of the Faculty of Land Management and Cadastre of VSAU. Current Problems of Land Management, Cadastre, and Environmental Management. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2021. Pp. 348–356.

10. On the Strategy for Environmental Security of the Russian Federation for the Period up to 2025: Decree of the President of the Russian Federation No. 176 of April 19, 2017 // Collection of Legislation of the Russian Federation. April 24, 2017. No. 17. Art. 2546.

11. Reimers N.F. Ecology: Theories, Laws, Rules, Principles, and Hypotheses. Moscow: Journal «Young Russia», 1994. 368 p.

12. Romanova E.P. Natural Resources of the World / E.P. Romanova, L.I. Kurakova, Yu.G. Ermakov. Moscow: Moscow University Press, 1993. 304 p.

13. Skvortsova S.B. Structure of Pore Space in Natural and Anthropogenically Altered Soils // Dissertation for the Degree of Doctor of Agricultural Sciences: 03.00.27. Moscow, 1999. 387 p.

14. Average Long-Term Productive Moisture Reserves under Winter and Early Spring Grain Crops by Regions, Territories, Republics, and Economic Areas: European Part of the USSR: Reference Book. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. Vol. 1. 122 p.

15. Shabanov V.V. Differentiation of Moisture Types along the Catena for Rational Placement of Agricultural Crops and Planning of Meliorative Impacts / V.V. Shabanov, A.D. Soloshenkov // Nature Management. 2016. No. 3. Pp. 104–109. EDN WJLCRX.

16. Shabanov V.V. Assessment of Soil Biota Requirements for Hydrothermal Conditions of the External Environment / V.V. Shabanov, V.N. Markin, A.D. Soloshenkov. // Reports of the Timiryazev Russian State Agrarian University, Moscow, December 3–5, 2019. Moscow: Timiryazev Russian State Agrarian University, 2020. Pp. 173–178. EDN JLEAZR.

17. Shabanov V.V. Some Aspects of Precision Melioration / V.V. Shabanov, A.I. Golovanov. // Nature Management, 2019, No. 1.

18. Shabanov V.V. Bioclimatic Justification of Hydrothermal Meliorations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973.

19. Ecological Dictionary (2001) [Electronic Resource]. URL: <http://bio.niv.ru/doc/dictionary/ecological/index.htm>

20. Conant R.T., Paustian K., and Elliott E.T. (2001): Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. Ecological Applications, 11, pp. 343–355.

21. United Nations Environment Programme (2020). Greening the Blue Report 2020: The UN System's Environmental Footprint and Efforts to Reduce it. Geneva: UNEP.

Дубенок Николай Николаевич, зав. кафедрой сельскохозяйственных мелиораций; <https://orcid.org/0000-0002-9059-9023>; **Маркин Вячеслав Николаевич**, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, SPIN-код: 8019-0920, AuthorID: 378128; **Шабанов Виталий Владимирович**, науч. руководитель проблемной лаборатории, <https://orcid.org/0000-0001-9798-519X> (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва); **Солошенко Александр Дмитриевич**, науч. сотрудник лаборатории сравнительной генетики животных, aleso@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4601-9140> (Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Москва).

ПРОЕКТНАЯ УРОЖАЙНОСТЬ В СИСТЕМЕ ОЦЕНКИ АГРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ

В.А. ТАРБАЕВ, В.М. ЯНЮК, П.В. ТАРАСЕНКО

Ключевые слова: агроэкологический потенциал, лимитирующий фактор, параметры, коэффициент, эффективный ресурс влаги, нормативная урожайность.

Keywords: agroecological potential, limiting factor, parameters, coefficient, effective moisture resource, standard yield.

Аннотация. В статье предлагается развитие понятия в отношении категории «проектная урожайность» (ПУ), на орошаемых почвах как методологической основы измерения агропроизводительной способности орошаемых почв, отвечающей требованиям норматива в решении задач агроэкономического обоснования. В оценке ПУ учитываются только неуправляемые в технологическом этапе производства растениеводческой продукции природные и инженерно-технические факторы, с которыми связаны условия формирования эффективного ресурса влаги, как лимитирующего фактора продуктивности культур. При этом совокупность управляемых технологических факторов, характеризующих индивидуальные условия производства растениеводческой продукции, не должна учитываться в качестве лимитирующего фактора эффективного использования агроэкологического потенциала, по величине которого рассчитывается ПУ.

Обоснования параметров ПУ включает этапы: а) оценка агроэкологического потенциала территории как характеристику обеспеченности территории тепловыми и водными ресурсами; б) установление по результатам сортоиспытательных станций связи урожайности культур, выращиваемой по интенсивной технологии, с параметрами агроэкологического потенциала; в) оценка влияния характеристик агрофизического состояния почв, гидромелиоративных систем, технических средств и способов полива на условия формирования эффективного ресурса влаги.

Для основных подтипов почв ирригационного фонда Саратовской области приведены результаты определения проектной урожайности культур на основе предлагаемой методологии.

Abstract. The article proposes the development of the concept in relation to the category of «project yield» (PU) on irrigated soils as a methodological basis for measurement of the agricultural productivity of irrigated soils that meets the requirements of the standard in solving problems of agroecological justification. In the assessment of PU, only natural and engineering factors that are uncontrollable at the technological stage of crop production are taken into account, which are associated with the conditions for the formation of an effective moisture resource as a limiting factor of crop productivity. At the same time, the set of controlled technological factors characterizing the individual conditions of crop production should not be taken into account as a limiting factor for the effective use of agroecological potential, the value of which is calculated by PU.

The substantiation of the parameters of the PU includes the following stages: а) assessment of the agroecological potential of the territory as a characteristic of the provision of the territory with thermal and water resources; б) establishment, based on the results of variety testing stations, of the yield of crops grown using intensive technology with the parameters of agroecological potential; в) assessment of the influence of characteristics of the agrophysical state of soils, hydro-reclamation systems, technical means and irrigation methods on conditions for the formation of an effective moisture resource.

For the main subtypes of soils of the irrigation fund of the Saratov region, the results of determining the project crop yield based on the proposed methodology are presented.

Введение. Важнейшей целью государственного управления сельскохозяйственного землепользования является повышение эффективности использования и охраны сельскохозяйственных угодий. Для регионов с засушливым климатом на первый план в последние годы выходит проблема восстановления мелиоративно-водохозяйственного комплекса. В частности, в Приволжском федеральном округе по состоянию на 2014 г. из общей площади орошаемых земель 891,2 тыс. га проведение реконструкции требуется на 453,4 тыс. га [2]. За период реализации федераль-

ной целевой программы «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национально-государственного достояния России на 2006–2010 годы и на период до 2013 года» работами по реконструкции гидромелиоративных систем охвачено не более 10% от необходимой площади [2]. Проведение реконструкции сдерживается не только отсутствием финансовых ресурсов, но и несовершенной нормативно-методической базой по обоснованию эколого-экономической эффективности реконструкции объектов мелиоративно-водохозяйственного комплекса. В первую очередь это относится к научной обоснованности нормативов прироста продуктивности угодий, обусловленных изменяющимися параметрами влагообеспеченности посевов культур в связи с совершенствованием показателей технического состояния гидромелиоративных систем, улучшением эколого-мелиоративной обстановки.

Анализ существующих подходов оценки проектной урожайности (ПУ). До настоящего времени для установления ПУ использовалось два подхода:

- путем определения прибавок урожайности при орошении по фактическим данным в представительных хозяйствах (в основном опытных хозяйств НИИ);
- на основе расчетных формул, учитывающих характеристики почвенно-климатических условий, параметры проектируемых гидромелиоративных систем, агротехнические и организационно-экономические особенности производства.

При использовании в качестве ПУ данных фактической урожайности непременно возникают вопросы о возможности их интерполяции в условия, отличающиеся от условий их определения.

К недостаткам существующих расчетных методов можно отнести отсутствие обоснованности включения тех или иных параметров или условий их определения в установлении проектной урожайности, что связано с неразработанностью понятийного аппарата категории «проектная урожайность» как норматива в системе агроэкономического обоснования.

В методике оценки продуктивности орошаемых земель ВНИОЗ [3] планируемая урожайность рассчитывается по определенной доле (4...5%) прихода фотосинтетической активной радиации (ФАР) за период вегетации с корректировкой исключительно на агротехнические и организационно-экономические условия. Последние задаются с помощью 5 индексов интенсификации продуктивности посевов: режима орошения, качества посевного материала, нормы минеральных удобрений, энерговооруженности и фондообеспеченности. Значение любого из индексов определяется по соотношению фактических и оптимальных элементов интенсификации продуктивности посевов.

В методике расчета проектной урожайности, предложенной ФГБНУ ВНИИ «Радуга» [2], в корректировке потенциальной урожайности, рассчитываемой также по ФАР, наряду с параметрами организационно-хозяйственных условий производства добавлен широкий спектр почвенно-мелиоративных и экологических характеристик. В результате для установления ПУ необходимо обосновать 10 параметров, ряд из которых, в свою очередь, являются производными от условий управления производственными процессами, что приводит к большим сомнениям о возможности реализации данного метода.

Цель работы – на основе системного анализ применимости существующих методов агроэкологической оценки орошаемых земель, как природно-техногенного комплекса, обосновать содержание понятия категории «проектная урожайность на орошаемых землях» используемой в качестве норматива для агроэкономического обоснования проектирования строительства и реконструкции.

Обоснование понятийного аппарата «проектная урожайность». Орошение, как дополнительный источник водных ресурсов, создает лишь потенциальную возможность оптимизации водопотребления культур, на которое влияют наряду со свойствами почв и сам технологии управления использованием дополнительного ресурса влаги в биопродукционных процессах. Большие капитальные вложения в строительство ирригационных сооружений и освоение мелиорированных земель однозначно предполагает их последующее использование при высоком уровне интенсивности земледелия. Сам факт отнесения проектной урожайности к разряду нормативов предопределяет определенные условия его установления. Норматив как экономическая категория может быть определен только при соблюдении условий рационального использования всех видов ресурсов и совершенствования управления производством. В этом случае он отражает общественные требования к результатам деятельности и характеризует необходимый уровень эффективности использования ресурса.

Разработка понятийного аппарата категории «проектная урожайность», в первую очередь, связана с обоснованием состава факторов, на основе которых ведется определение урожайности, отвечающей требованию норматива для технико-экономических расчетов.

Процесс прогнозирования урожайности культур, как известно, интегрирует количественное описание множества факторов. На урожайность культур на мелиорированных землях влияет большое количество факторов, которые можно разделить на три группы:

- природные, включающие характеристики климата, рельефа и гидрологии, которые в значительной мере отражаются и в характеристиках почвенного покрова;
- технические характеристики гидромелиоративной системы, обуславливающие параметры дополнительной водоподдачи (гидромодуль), и характеристики техники полива, с которыми связаны условия поступления и усвоения дополнительного ресурса влаги при поливах (интенсивность и равномерность дождя);

- технологические условия производства растениеводческой продукции и воспроизводства плодородия почв, которые в обобщенном виде можно обозначить, как показатель культуры земледелия.

Для формализации учета влияния фактора культуры земледелия в земельно-оценочных работах модель нормативной урожайности разрабатывается на основе данных по урожайности культур в сортоиспытательных станциях [1, 12]. В этом случае продуктивность привязывается к определенным (стандартным) условиям и технологическим процессам, установленным типовой технологической картой производства культуры. Одновременно такой подход дает возможность установления однозначной связи результатов производства с затратами, как одного из обязательных условий для измерения норматива. В этом случае урожайность становится количественным измерением агро-ресурсного потенциала, включающего характеристику неуправляемых в самом технологическом этапе производства растениеводческой продукции природных ресурсов (климатических, почвенных), но при заданном нормативном уровне использования агро-ресурсного потенциала. В частности, при разработке моделей нормативной урожайности этот нормативный уровень устанавливался по зерновому колосовому, выращиваемых по интенсивной зональной технологии в сортоиспытательных станциях, с коэффициентом эффективности 0,7...0,8.

Принимая на вооружение, разработанную авторами методологию установления нормативной урожайности [9], при ее оценке на орошаемых землях учитываются только неуправляемые в технологическом этапе производства растениеводческой продукции природные и инженерно-технические факторы, с которыми связаны условия формирования эффективного ресурса влаги, как лимитирующего фактора продуктивности культур. При этом совокупность управляемых технологических факторов, характеризующих культуру земледелия, не должны служить лимитирующим фактором эффективного использования в биопродукционных процессах агро-ресурсного потенциала, устанавливаемого неуправляемыми природно-техническими факторами. Вклад управляемых технологических факторов находит отражение в интегральном показателе оценки орошаемых земель по величине нормативного чистого дохода через величину всех затрат, необходимых на реализацию агро-ресурсного потенциала с учетом его прироста, обусловленного дополнительным ресурсом влаги.

Результаты реализации метода установления проектной урожайности. Задачи обоснования параметров проектной урожайности культур на орошаемых землях предлагается решать:

- на оценке биоклиматического потенциала территории, включающего характеристику обеспеченности территории тепловыми и водными ресурсами;
- на установленной в сортоиспытательных станциях связи урожайности культур, выращиваемой по интенсивной технологии, с параметрами биоклиматического потенциала.

Характеристика биоклиматического потенциала территории используется в формуле почвенно-экологического индекса (ПЭИ) для сравнительной оценки уровня потенциального плодородия почв [1, 12]. В том же самом виде, но под названием агроэкологического потенциала (АП) она включается в модель нормативной урожайности зерновых, на основе которой должна определяться нормативная продуктивность угодий при кадастровой оценке земельных участков, расположенных на сельскохозяйственных угодьях [6]:

$$АП = \frac{\sum t \geq 10^\circ (K_y - P)}{K_K + 100},$$

где $\sum t \geq 10^\circ \text{C}$ – сумма биологически активных температур выше 10°C ; K_y – коэффициент годового увлажнения (отношение количества осадков к испаряемости) с поправкой P ; K_K – коэффициент континентальности климата.

Определение проектной урожайности i -й культуры Y_{pi} в предлагаемой методике задается в виде функции, преобразованной при дополнительном увлажнении агроэкологического потенциала $АП_{OP}$ в нормативную урожайность с учетом характеристик, влияющих на эффективность использования агресурсного потенциала в биопродукционных процессах:

$$Y_{pi} = Ц_{АП_{Уi}} \cdot АП_{OP} \cdot K_{MC} \cdot K_{AF} \cdot K_{ГМС} \cdot K_{ТСП}, \quad (1)$$

где $Ц_{АП_{Уi}}$ – цена агроэкологического потенциала в нормативной урожайности i -й культуры; K_{MC} – коэффициент на мелиоративное состояние; K_{AF} – коэффициент на агрофизические свойства почв; $K_{ГМС}$ – коэффициент на параметры гидромелиоративной системы; $K_{ТСП}$ – параметры технических средств и способов полива.

При этом принимается условие, что в отличие от богарных условий, на нормативную урожайность орошаемых земель из характеристик почвенного покрова влияют только агрофизические свойства, с которыми связаны условия формирования водно-воздушного режима корнеобитаемого слоя почв.

Цена агроэкологического потенциала в нормативной урожайности отдельных культур, в соответствии с моделью нормативной урожайности [4], функционально связана с аналогичным базовым показателем зерновых колосовых $Ц_{АПЗ}$ при его измерении в т/га, равным 0,4648. Цена агроэкологического потенциала в нормативной урожайности других культур орошаемого севооборота $Ц_{АП_{Уi}}$ определяется с помощью коэффициентов K_{zi} , устанавливаемых в зависимости от условий увлажнения в агроклиматической подзоне [8]:

$$Ц_{АП_{Уi}} = Ц_{АПЗ} \cdot K_{zi}.$$

Для условий орошения целесообразно использование K_{zi} агроклиматических подзон с коэффициентом увлажнения близким к интервалу 1...1,1.

Остальные коэффициенты в формуле (1) отражают относительное снижение нормативной урожайности, обусловленные:

- K_{MC} – нарушением гидрохимического режима, связанные с проявлением процессов засоления, переувлажнения, осолонцевания почв;

- K_{AF} – ухудшением агрофизических свойств пахотного слоя почв;

- $K_{ГМС}$ – параметрами гидромелиоративной системы, ограничивающими оптимальное водопотребление;

- $K_{ТСП}$ – параметрами технических средств и способов полива, определяющих, наряду с режимом водоподдачи, условия преобразования оросительной нормы в ее эффективную часть, непосредственно участвующую в биопродукционных процессах.

Количественная оценка влияния природных и технических факторов на проектную урожайность (ПУ) предполагает, с одной стороны, строго количественную оценку потребности культур во влаге для оптимизации биопродукционных процессов, с другой стороны, аналогичный учет влияния природных и технических факторов на формирование водного режима почв и водопотребление культур. Причем, адекватность учета во многом определяется корректной оценкой эффектов не стационарности, как климатических условий в сезонном и многолетнем аспектах, так и самой потребности во влаге у растений в течение вегетационного периода [5]. Именно на фоне этой не стационарности формирования дефицита водопотребления необходимо получить количественную оценку отклонения условий водопотребления культур от оптимальных в виде указанных коэффициентов K_{AF} , $K_{ГМС}$, $K_{ТСП}$ под влиянием параметров гидромелиоративных систем и, агрофизические свойства почв.

Количественными характеристиками агрофизического состояния почв служат: плотность почв, г/см^3 ; общая пористость, %; основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) – зависимость всасывающего давления от объемной влажности F_p ; зависимость коэффициента влагопроводности от объемной влажности F_v ; коэффициент фильтрации, м/сут. Кривые ОГХ в неявном виде содержат информацию о почвенно-гидрологических константах (наименьшей влагоемкости, влажности разрыва капиллярной связи и влажности завядания) используемых для оценки доступности почвенной влаги.

В составе параметров агрофизического состояния в явном виде не используются такие базовые характеристики уровня плодородия почв как: гранулометрический состав, содержание и запасы гумуса. Их влияние на процессы водопотребления культур в интегральном виде отражаются через изменения параметров гидрофизических функций, которым в последнее время дают более общее название – «педотрансферные функции» [11].

Интегральной количественной характеристикой гидромелиоративной системы, учитывающей стохастичность процессов формирования дефицита водопотребления, является средневзвешенный срок задержки полива, определяемый гидромодулем орошаемого участка.

Интегральной количественной характеристикой параметров технических средств и способов полива служит дисперсия усвоенной поливной нормы в виде коэффициента вариации, на которую наряду с показателем равномерности слоя поливной нормы влияют ее величина, скорость ветра при поливе дождеванием, диспер-

сия предполивных влагозапасов балансового слоя почвы в масштабе поля.

Инструментарием решения задачи определения параметров оценки ПУ служит модель формирования эффективного ресурса влаги (ЭРВ). Под ЭРВ понимается только та часть ресурса влаги, которая непосредственно участвует в биопродукционных процессах (транспирация растительного покрова), обеспечивая прирост агропроизводительной способности почв. Явно выраженная в многолетнем и сезонном аспектах неравномерность климатических факторов интенсивности водопотребления культур и его дефицита, делают необходимым определение не только абсолютных, но и относительных (приведенных) значений ЭРВ ($E_{АГТ}$):

$$E_{АГТ} = E_{Ф} / E_{О}, \quad (2)$$

где $E_{Ф}$ – фактическая величина транспирации i -й культуры с учетом влияния комплекса природных и технических характеристик, $E_{О}$ – оптимальная величина транспирации i -й культуры для задаваемых климатических условий.

Соответствующие индексы у значений транспирации означают, что в определении объема влаги, непосредственно участвующей в биопродукционных процессах, учтено влияние лимитирующих факторов: А – агрофизические свойства почв; Г – гидромелиоративных систем по обеспечению оптимального режима водоподачи; Т – параметры технических средств и способов полива, которые в совокупности с агрофизическими свойствами почв преобразуют поливную норму в дополнительный эффективный ресурс влаги.

Учет большого числа факторов, влияние которых носит нелинейный и, как правило, вероятностный характер, вынуждает при оценке влияния конкретного фактора на конечный результат рассматривать всю систему «климат–почва–растение–проводящая сеть–техника полива». Функция отклика этой системы на пове-

дение отдельного фактора будет иметь индивидуальный характер и может быть получена на основе прямого расчета, то есть путем решения прогнозной задачи. Общая схема взаимодействия факторов формирования ЭРВ в модели имитационного эксперимента, приведена на рис. 1. В качестве блока описания влагопереноса используется модифицированная программа WAS-61 [7].

С помощью адаптированной модели ЭРВ можно в виде функции отклика в имитационном эксперименте строго количественно оценивать влияние параметров технического состояния гидромелиоративной системы и агрофизических свойств почв на приведенный к оптимальным условиям водопотребления эффективный ресурс влаги (формула (2)). Решение этой задачи осуществляется путем моделирования водно-воздушного режима почв и определения статьи водного баланса под посевами культур за 25...30-летний период метеонаблюдений.

Варьируя одним из параметров АФ, ГМС, ТСП при фиксации остальных на уровне, обеспечивающем условия оптимальности водопотребления, рассчитывается $E_{Ф}$ и соответствующее ему значение $E_{АГТ}$, которое и является численным значением для коэффициентов $K_{АФ}$, $K_{ГМС}$, $K_{ТСП}$ в формуле (1).

Пример расчета функции отклика ЭРВ (формула (2)) на посевах яровой пшеницы в зависимости интегральных характеристик: гидромелиоративных систем (минимальный срок возобновления полива – T_m , сут), технических средств и способов полива (коэффициент вариации усвоенного почвой поливной нормы W , %) для темно-каштановых тяжелосуглинистых почв показан на рис. 2.

В имитационном эксперименте задавались климатические параметры метеостанции г. Пугачева, характеризующая 3-ю агроклиматическую подзону Саратовской области [10].



Рис. 1. Схема взаимодействия факторов в имитационном эксперименте по оценке эффективного ресурса влаги в орошаемых почвах

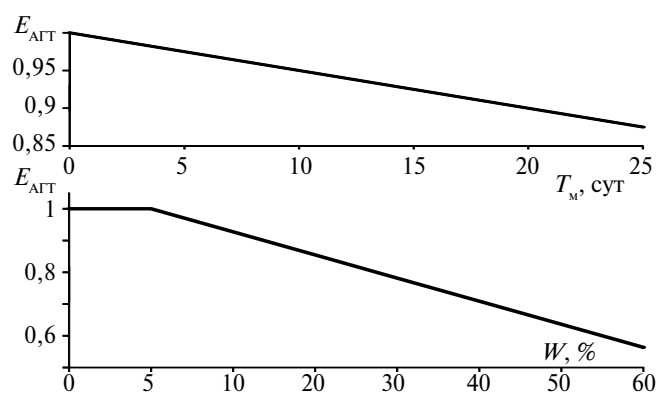


Рис. 2. Оценка влияния интегральных показателей технического состояния на приведенный эффективный ресурс влаги E_{AGT}

предпосылки увеличения проектной урожайности зерновых при орошении, обусловленные увеличением обеспеченности тепловыми ресурсами в агроклиматических подзонах Саратовской области. Во всех агроклиматических подзонах она принимается стандартной – 4,59 т/га. Соответственно, относительный прирост урожайности зерновых значительно ниже, чем на травах: от 2,1 в подзоне черноземов до 3,3 на каштановых почвах.

Отсутствие показателей нормативной урожайности кукурузы на зерно в 4-й и 5-й агроклиматических подзонах обусловлено принимаемыми при агроклиматическом оценочном зонировании [8] ограничениями по влагообеспеченности, в соответствии с которыми эта культура не включена в структуру посевов без орошения.

Таблица 1

Нормативная без орошения (H_B) и проектная при орошении (Π_O) урожайность культур, т/га

Почвы	АКП*	Σt	K_y	Использование почв	АЭП**	Зерновые	Многолетние травы на сено	Однолетние травы на сено	Кукуруза на зерно
Черноземы обыкновенные и южные	2	2600	0,61	H_B	4,63	2,22	2,89	2,60	2,67
				Π_O	9,53	4,59	6,83	6,38	7,48
Темно-каштановые	3	2800	0,51	H_B	4,13	1,92	2,34	2,24	2,17
				Π_O	10,27	4,59	7,11	6,63	7,77
Темно-каштановые	4	2800	0,45	H_B	3,69	1,71	2,02	1,99	–
				Π_O	10,27	4,59	7,11	6,63	–
Каштановые	5	2950	0,40	H_B	3,40	1,39	1,64	1,62	–
				Π_O	10,82	4,59	7,49	6,98	–

Примечание. * – агроклиматическая подзона Саратовской области [10]; ** – агроэкологический потенциал.

Результаты определения нормативной урожайности культур без орошения, по методике проведения кадастровой оценки [6], и проектной урожайности культур при орошении для основных подтипов почв ирригационного фонда Саратовской области приведены в табл. 1. В табл. 2 показано скорректированное агроклиматическое зонирование [10] с отражением подзон, характеристики которых используются в определении проектной урожайности.

Проектная урожайность, определяемая по формуле (1), рассчитывалась для условий, когда значения всех корректирующих коэффициентов K_{MC} , K_{AF} , $K_{ГМС}$, $K_{ТСП}$ равны единице, то есть отсутствуют факторы, снижающие эффективность использования дополнительного ресурса влаги. Значение коэффициента увлажнения в условиях орошения, в соответствии с методологией оценки агроэкологического потенциала [12], для оптимальных условий увлажнения принимается равным 1,1.

Агропроизводительная способность почв в максимальной степени возрастает в соответствии с изменениями при орошении агроэкологического потенциала на культурах с наиболее длительными сроками вегетационного периода.

На многолетних и однолетних травах, требующих более высокие оросительные нормы, при переходе от черноземов в степной зоне к каштановым почвам в сухостепной зоне, прирост агропроизводительной способности почв возрастает с 2,4 до 4,5 раз. Для зерновых культур (без кукурузы) достаточной для реализации биологического потенциала является сумма биологически активных температур 1900 °С. В этой связи отсутствуют

Таблица 2

Агроклиматическое оценочное зонирование Саратовской обл.

№ подзоны	Район	Среднее АП без корректировки	Среднее АП с корректировкой
1	Аркадакский, Аткарский, Базарно-Карабулакский, Балашовский, Балтайский, Вольский, Екатериновский, Петровский, Романовский, Ртищевский, Турковский, Хвалынский	5,98	4,96
2	Воскресенский, Духовницкий, Калининский, Лысогорский, Новобурасский, Самойловский, Саратовский, Татищевский	5,57	4,63
3	Балаковский, Ивантеевский, Красноармейский, Марковский, Пугачевский, Советский, Энгельский	4,75	4,13
4	Ершовский, Краснопартизанский, Перелобский, Пугачевский, Ровенский, Федоровский	4,23	3,69
5	Дергачевский, Краснокутский, Новоузенский, Озинский, Питерский	3,89	3,40
6	Александрово-Гайский	3,46	3,01

Таблица 3

Влияние орошения на изменение агропроизводительной способности почв

Почвы	АКП	Оценка АП	Прирост урожайности культур при орошении, т/га			
			Зерновые	Многолетние травы на сено	Однолетние травы на сено	Кукуруза на зерно
Черноземы обыкновенные и южные	2	1*	2,37	3,94	3,77	4,81
		2**	1,97	2,97	3,31	4,33
Темно-каштановые	3	1	2,67	4,77	4,38	5,61
		2	2,38	3,76	4,05	5,13
Темно-каштановые	4	1	2,88	5,08	4,64	—
		2	2,52	3,94	4,21	—
Каштановые	5	1	3,20	5,84	5,37	—
		2	2,86	4,73	4,95	—

Примечание. 1* — с корректировкой АП [10]; 2** — без корректировки АП [8].

Проведенная в работе авторов [10] корректировка параметров агроэкологического потенциала территории Саратовской области, связанная с некорректностью учета вклада тепловых ресурсов на продуктивность при ограниченности водных, не оказывает влияние на значения проектной урожайности орошаемых земель. Однако адекватность оценки агроэкологического потенциала существенно влияет на корректность установления прироста агропроизводительной способности при орошении (табл. 3).

При скорректированной оценке АП прирост урожайности при орошении, в зависимости культуры, возрастает на 15...27%, что может стать весьма существенным фактором при технико-экономическом обосновании целесообразности строительства и реконструкции объектов орошения.

Заключение. Проектная урожайность орошаемых земель это нормативная урожайность, лимитируемая неуправляемой в технологическом процессе производства растениеводческой продукции величиной агроэкологического потенциала, в котором показателем влагообеспеченности посевов служит приведенный эффективный ресурс влаги (ЭФР), оцениваемый по соотношению фактической и оптимальной величины транспирации для задаваемых условий комплекса природных и технических характеристик.

В качестве интегральных природных и технических характеристик при оценке ЭРВ используются параметры:

- агрофизического состояния почв, отражающие условия доступности почвенной влаги для водопотребления культур, в интегральном виде описываемые через основные гидрофизические функции (ОГХ);
- гидромелиоративной системы, отражающие стохастичность процессов формирования дефицита водопотребления, обусловленного гидромодулем орошаемого участка, в виде средневзвешенного срока задержки полива;
- технических средств и способов полива, отражающие дисперсию усвоенной поливной нормы в виде коэффициента вариации.

Используя уточненные характеристики агроэкологического потенциала определены параметры про-

ектной урожайности культур для основных подтипов почв ирригационного фонда Саратовской области. Агропроизводительная способность орошаемых почв при отсутствии процессов засоления и переувлажнения возрастает под зерновыми (без кукурузы) на обыкновенных и южных черноземах в 2,1 на каштановых почвах в 3,3 раза, под многолетними травами в 2,4 и 4,6 раз, соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карманов И.И. Методика и технология почвенно-экологической оценки и бонитировки почв для сельскохозяйственных культур. М.: ВАСХНИЛ, 1990. 114 с.
2. Красношееков В.Н., Ольгаренко Д.Г. Методика оценки экономической эффективности мероприятий по реконструкции мелиоративных систем с учетом технического состояния гидромелиоративных объектов, вероятностного характера изменения природно-климатических условий, хозяйственных, экологических и социальных условий функционирования мелиорируемых агроландшафтов, экологической ценности природных экосистем, степени эрозии, структуры природных ландшафтов и ущерба здоровью человека / Под общ. ред. д-ра с.-х. наук, профессора Г.В. Ольгаренко. Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015. 116 с.
3. Методика оценки продуктивности орошаемых земель (рекомендации). М.: Росагропромиздат, 1991. 16 с.
4. Методические рекомендации по оценке качества и классификации земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве. М.: «Гоземкодастрсъемка» ВИСХАГИ, «РосНИИземпроект» 2003. 169 с.
5. Методические указания по нормированию орошения с учетом корректировки биологических коэффициентов, дифференциации почвенно-климатических условий и пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических факторов: метод. указ. М., 2022. 80 с.
6. Об утверждении Методических указаний о государственной кадастровой оценке: приказ Росреестра от 04.08.2021 № П/0336 [Электронный ресурс]. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online>
7. Рекс Л.М., Кирейчева Л.В., Якиревич А.М. Методика расчета водно-солевого режима орошаемых земель. М.: ВНИИГиМ, 1984. 112 с.
8. Справочник агроклиматического оценочного зонирования субъектов Российской Федерации: учебно-практическое пособие / Под ред. С.И. Носова. Отв. исп.: А.К. Оглезнев. М.: Маросейка, 2010. 208 с.
9. Тарбаев В.А., Янюк В.М., Липидина Г.О. Методология учета и оценки плодородия почв для регламентации использования земель сельскохозяйственного назначения // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2019. № 11 (178). С. 40–49.
10. Зонирование агроэкологического потенциала территории для оценки сельскохозяйственных угодий Саратовской области / В.А. Тарбаев, В.М. Янюк, А.А. Дорогобед, Ю.И. Шадау, Т.В. Кузниченкова // Аграрный научный журнал. 2020. № 4. С. 37–43.
11. Шеин Е.В., Архангельская Т.Е. Педотрансферные функции: состояние, проблемы, перспективы // Почвоведение. 2006. № 10. С. 1205–1217.
12. Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв / Л.Л. Шишов, Д.И. Дурманов, И.И. Карманов, В.В. Ефремов. М.: Агропромиздат, 1991. 304 с.
13. Янюк В.М., Фалькович А.С. Учет пространственного варьирования влагозапасов в почве при агроэкологической оценке средств полива // Мелиорация и водное хозяйство. 2002. № 5. С. 29–31.
14. Янюк В.М. Совершенствование агроэкологической оценки и мониторинга мелиоративного состояния орошаемых земель сухостепной зоны Поволжья: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Саратов, 2007. 44 с.

REFERENCES

1. Karmanov I.I. Metodika i tehnologiya pochvennoe`kologicheskoy ocenki i bonitirovki pochv dlya sel'skoxozyajstvenny'x kul'tur. M.: VASXNIL, 1990. 114 s.

2. Metodika ocenki e'konomicheskoj e'fektivnosti meropriyatij po re konstrukcii meliorativny'x sistem s uchetoм texnicheskogo sostoyaniya gidromeliorativny'x ob'ektov, veroyatnostnogo haraktera izmeneniya prirodno-klimaticheskix uslovij, xozyajstvenny'x, e'kologicheskix i social'ny'x uslovij funkcionirovaniya melioriruemy'x agrolandshaftov, e'kologicheskoy cennosti prirodny'x e'kosistem, stepeni e'rozii, struktury' prirodny'x landshaftov i ushherba zdorov'yu cheloveka. Kolonna: IP Vorob'ev O.M., 2015. 116 s.

3. Metodika ocenki produktivnosti oroshaemy'x zemel' (rekommendacii). M.: Rosagropromizdat, 1991. 16 s.

4. Metodicheskie rekomendacii po ocenke kachestva i klassifikacii zemel' po ix prigodnosti dlya ispol'zovaniya v sel'skom xozyajstve. M.: «Gozemkodastrs'yomka» VISXAGI, «RosNIzemproekt» 2003. 169 s.

5. Metodicheskie ukazaniya po normirovaniyu orosheniya s uchetoм korrekcirovanija biologicheskix koefficientov, differenciacii pochvenno-klimaticheskix uslovij i prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti gidrometeorologicheskix faktorov: metod. ukaz. M., 2022. 80 s.

6. Ob utverzhenii Metodicheskix ukazanij o gosudarstvennoj kadastronoy ocenke. Prikaz Rosreestra ot 04.08.2021 № P/0336 [Elektronny'j resurs]. <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online>

7. Reks L.M., Kirejcheva L.V., Yakirevich A.M. Metodika rascheta vodno-solevogo rezhima oroshaemy'x zemel'. M.: VNIIGiM, 1984. 112 s.

8. Spravochnik agroklimaticheskogo ocenochного zonirovaniya sub'ektov Rossijskoj Federacii. Uchebno-prakticheskoe posobie / Pod red. S.I. Nosova. Otvetstvenny'j ispolnitel' A.K. Ogleznev. M.: Marosejka, 2010. 208 s.

9. Tarbaev V.A., Yanyuk V.M., Lipidina G.O. Metodologiya uchota i ocenki plodorodiya pochv dlya reglamentacii ispol'zovaniya zemel' sel'skoxozyajstvennogo naznacheniya // Zemleustrojstvo, kadastr i monitoring zemel'. 2019. № 11 (178). S. 40–49.

10. Zonirovanie agroekologicheskogo potenciala territorii dlya ocenki sel'skoxozyajstvenny'x ugodij Saratovskoj oblasti / V.A. Tarbaev, V.M. Yanyuk, A.A. Dorogobed, Yu.I. Shadau, T.V. Kuznichenkova // Agrarnyj nauchny'j zhurnal. 2020. № 4. S. 37–43.

11. Shein E.V., Arxangel'skaya T.E. Pedotransferny'e funkcii: sostoyanie, problemy, perspektivy // Pochvovedenie. 2006. № 10. S. 1205–1217.

12. Teoreticheskie osnovy i puti regulirovaniya plodorodiya pochv / L.L. Shishov, D.I. Durmanov, I.I. Karmanov, V.V. Efremov. M.: Agropromizdat, 1991. 304 s.

13. Yanyuk V.M., Fal'kovich A.S. Uchet prostranstvennogo var'irovaniya vlagozapasov v pochve pri agroekologicheskoy ocenke sredstv poliva // Melioracija i vodnoe xozyajstvo. 2002. № 5. С. 29–31.

14. Yanyuk V.M. Sovershenstvovanie agroekologicheskoy ocenki i monitoringa meliorativnogo sostoyaniya oroshaemy'x zemel' suxostepnoj zony Povolzh'ya: avtoref. dis. ... d-ra s.-x. nauk. Saratov, 2007 44 s.

Тарбаев Владимир Александрович, канд. с.-х. наук, зав. кафедрой; **Янюк Вячеслав Михайлович**, доктор с.-х. наук, профессор; **Тарасенко Пётр Владимирович**, доктор с.-х. наук, профессор, кафедра «Землеустройство и кадастры», tarbaev1@mail.ru, (Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов).

УДК 631.432.4

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-31-34

ТЕХНОЛОГИЯ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ БАКЛАЖАН ПРИ КАПЕЛЬНОМ ОРОШЕНИИ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ

Н.Н. ДУБЕНОК, А.В. ГЕМОНОВ, Д.А. ЛЕБЕДЕВ

Ключевые слова: баклажан, капельное орошение, тоннельные укрытия, предполивная влажность, технология возделывания, доза удобрений, урожайность.

Keywords: eggplant, drip irrigation, tunnel shelters, pre-irrigation moisture, cultivation technology, fertilizer dose, productivity.

Аннотация. В статье рассмотрена технология выращивания ранних баклажан в тоннельных укрытиях при капельном орошении в условиях юга Московской области. В ходе проведенного полевого опыта было изучено взаимодействие водного режима почвы и минерального питания на рост, развитие и продуктивность баклажан сорта «Черный опал», выращиваемых с использованием тоннельных укрытий для раннего получения продукции. Опыт проведен по двухфакторной схеме, где фактор А касался условий водного режима, а фактор В – минерального питания. В ходе эксперимента было проведено от 11 до 28 поливов, что привело к существенным различиям в расходе оросительной воды. Наиболее выраженный расход воды за вегетацию наблюдался в варианте с ППВ 90% НВ и дозой удобрений $N_{140}P_{70}K_{50}$: в 2022 г. он составил 1720 м³/га, в 2023 – 1220 м³/га, а в 2024 – 1490 м³/га. Определены и обоснованы преимущества систем капельного орошения для культур, предъявляющих высокие требования к водному режиму. Определены оптимальные условия водного и минерального питания ранних баклажан, позволяющие получить продукцию плодов не менее 40 т/га стандартного качества. Исследования, проведенные на землях ООО «Сергиевское» и в лаборатории ФГБНУ ВНИИ «Радуга», подтвердили обоснованность технологии, направленной на получение ранней продукции. Сочетание капельного орошения и тоннельных укрытий оказывает комплексное позитивное влияние: повышает эффективность использования воды, улучшает микроклимат для растений, ускоряет сроки созревания и снижает трудозатраты благодаря автоматизации полива. Результаты показывают, что применение современных агротехнических методов, таких как капельное орошение и тоннельные укрытия, позволяет значительно повысить эффективность производства ранних овощей.

Abstract. The article discusses the technology of growing early eggplants in tunnel shelters with drip irrigation in the conditions of the south of the Moscow region. During the field experiment, the interaction of the soil water regime and mineral nutrition on the growth, development and productivity of eggplants of the «Black Opal» variety, grown using tunnel shelters for early production, was

studied. The experiment was carried out according to a two-factor scheme, where factor A related to water conditions, and factor B related to mineral nutrition. During the experiment, from 11 to 28 irrigations were carried out, which led to significant differences in irrigation water consumption. The most pronounced water consumption during the growing season was observed in the variant with a water consumption rate of 90% NV and a dose of fertilizer $N_{140}P_{70}K_{50}$: in 2022 it was 1720 m³/ha, in 2023 – 1220 m³/ha, and in 2024 – 1490 m³/ha. The advantages of drip irrigation systems for crops that have high demands on the water regime have been identified and substantiated. The optimal conditions for water and mineral nutrition of early eggplants have been determined, allowing to obtain fruit production of at least 40 t/ha of standard quality. Research conducted on the lands of Sergievskoye LLC and in the laboratory of the Federal State Budget Research Institution All-Russia Scientific and Research Institute for Irrigation and Farming Water Supply Systems «Raduga», confirmed the validity of the technology aimed at obtaining early products. The combination of drip irrigation and tunnel shelters has a complex positive effect: it increases water use efficiency, improves the microclimate for plants, accelerates ripening time and reduces labor costs due to irrigation automation. The results show that the use of modern agricultural practices, such as drip irrigation and tunnel shelters, can significantly improve the efficiency of early vegetable production.

Введение. Производство ранней овощной продукции экономически оправданно, несмотря на дополнительные материальные и трудовые затраты. Такая продукция может быть реализована по более высоким ценам, что позволит компенсировать начальные инвестиции. Кроме того, ранние овощи могут занять свою нишу на рынке, удовлетворяя спрос потребителей на свежую продукцию. Формирование водного и питательного режима почвы имеет ключевое значение для успешного производства ранней овощной продукции, особенно в зависимости от региональных почвенно-климатических условий [5].

Капельное орошение представляет собой эффективный метод обеспечения растений необходимым ко-

личеством влаги и питательных веществ, что особенно важно для баклажанов, которые имеют высокие требования к водному режиму [2]. Использование капельного орошения в сочетании с временными тоннельными укрытиями позволяет эффективнее использовать поливную воду, вследствие более точечного прикорневого распределения, способствует ускорению сроков сбора урожая благодаря использованию тоннельных укрытий, создающих благоприятные микроклиматические условия, что в свою очередь потенциально может способствовать экономической выгоде [7]. Также капельное орошение уменьшает объем ручного полива и обеспечивает автоматизацию процесса, что позволяет снизить трудозатраты и увеличить производительность [3].

Материалы и методика. Полевые исследования по обоснованию технологии выращивания баклажан в открытом грунте с использованием тоннельных укрытий при капельном орошении проводились в 2022–2024 гг. на землях общества с ограниченной ответственностью «Сергиевское» Коломенского района, Московской области. Лабораторные исследования проводились в ФГБНУ ВНИИ «Радуга». Цель исследований – совершенствование агротехники выращивания баклажан при капельном орошении с использованием тоннельных укрытий в условиях юга Московской области для получения ранней продукции плодов не менее 40 т/га стандартного качества.

Опыт заложен методом расщепленных делянок, в трехкратной повторности, площадь одной делян-

ки 22 м². Схема посадки – 60 см (междурядье) × 30 см (между саженцами). Способ посадки – вручную.

Расчетный слой почвы 0,4 м в период «высадка рассады–бутонизация–начало цветения» и 0,6 м в период «начало цветения–плодоношение–последний сбор». Для орошения использовалась система капельного орошения с эмиттерной капельной лентой NEO-DRIP со встроенным через 0,4 м капельницами с расходом воды 1,8 л/ч. Рабочее давление 0,6...1,2 атм. При подборе переносных тоннельных укрытий определены оптимальные параметры: высота тоннелей 1,4 м, ширина – 1,8 м, длина – 6 м, каркас из проволоки толщиной 8 мм, укрывной материал с плотностью 30 г/м², расстановка дуг через 1,5...2 м (рисунок). Предложенная схема способствует эффективному укрытию растений с минимальными затратами и обеспечивает удобные условия для их ухода. Кроме того, она оптимизирует доступ техники, а также упрощает процессы прополки и сбора урожая.

Высадка рассады в годы исследований проводилась в период с 12 по 18 мая в зависимости от погодных условий. Определяющим критерием служила утренняя температура почвы на глубине 8...10 см, которая должна быть не ниже 15 °С.

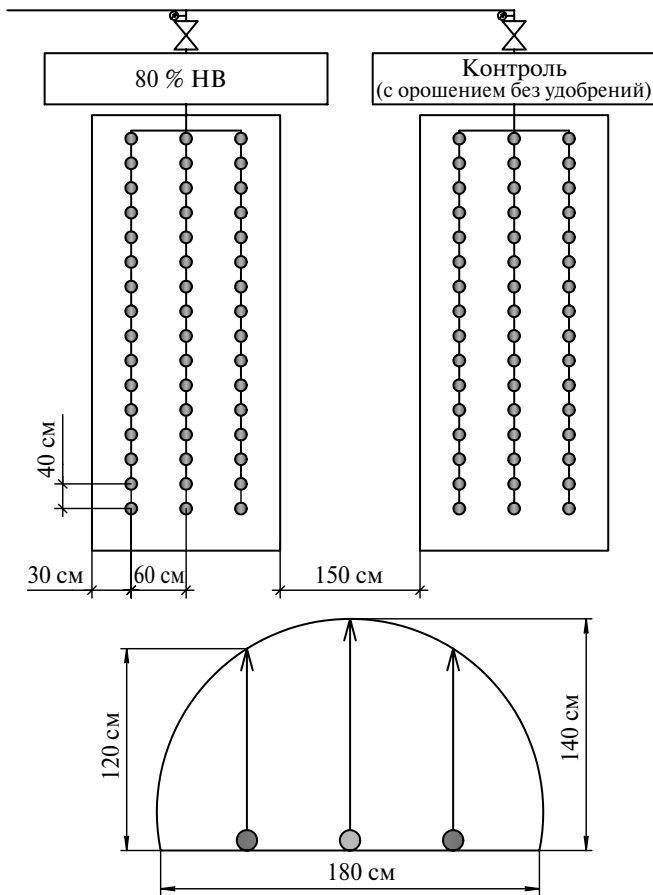
После 25–30 мая, когда угроза заморозков проходит, пленочное покрытие снималось. Ключевым моментом перед этим является адаптация растений к сухому воздуху с относительно высокими дневными температурами. Для этого в тоннелях проделывались 2...3 отверстия диаметром 4...6 см для каждого растения. На следующий день площадь этих отверстий увеличивается вдвое. Вечером третьего дня пленка снимается, и дуги убираются. После этого выполнялась культивация с окучиванием, затем незамедлительно осуществлялось профилактическое опрыскивание против болезней и вредителей. В дальнейшем профилактические обработки повторялись каждые 10 дней.

Полевой опыт проводили по двухфакторной схеме, включающей в себя изучение влияния условий водного режима почвы (фактор А) и минерального питания (фактор В) на рост, развитие и продуктивность баклажан сорта «Черный опал», выращиваемых для получения ранней продукции с использованием тоннельных укрытий (внесение дозы удобрений (N₁₄₀P₇₀K₅₀) рассчитано согласно методики и химического анализа почвы).

Схема опыта по водному режиму при капельном орошении включала три варианта: А1, А2, А3 – поддержание предполивного порога влажности (ППВ) почвы соответственно на уровне 70, 80 и 90 % НВ. Глубина увлажнения расчетного слоя почвы в период «высадка рассады–бутонизация» составляла 0,4 м, в период «бутонизация–последний сбор» – 0,6 м [4].

В схеме опыта по изучению пищевого режима растений (фактор В) было предусмотрено внесение минеральных удобрений без вариаций по дозировкам.

Дозы внесения минеральных удобрений по вариантам опыта рассчитывали по общепринятой методике методом элементарного баланса. При расчете доз внесения удобрений учитывали планируемую урожайность баклажан, содержание азота, фосфора, калия в почве, вынос питательных веществ на единицу урожая [1].



Применяемые тоннельные укрытия и схема посадки

Результаты и обсуждения. Расчет поливной нормы проводили по общепринятой формуле с учетом водно-физических свойств почвы и особенностей развития корневой системы растений. Для поддержания порога предполивной влажности почвы на уровне 70 % НВ в слое 0,4 м полив требуется проводить нормой 90 м³/га, в слое 0,6 м – нормой 160 м³/га. Для поддержания в расчетном слое 0,4 м предполивного уровня влажности почвы 80 % НВ полив необходимо проводить нормой 70 м³/га, в слое 0,6 м – нормой 110 м³/га. Для поддержания предполивного уровня 90% НВ в слое 0,4 м – 40 м³/га, а в слое 0,6 м – нормой 70 м³/га. Поливы проводились по достижению влажности расчетного слоя почвы заданного уровня предполивной влажности, в результате чего на каждом варианте формировался уникальный фактический режим орошения баклажан [6].

Для поддержания нижнего ППВ почвы по вариантам опыта было проведено от 11 до 28 поливов оросительной нормой от 1160 до 1720 м³/га. Самый высокий расход оросительной воды за вегетацию отмечен на варианте с ППВ 90 % НВ и дозой удобрений N₁₄₀P₇₀K₅₀, который составлял в 2022 г. – 1720 м³/га, в 2023 – 1220 м³/га, в 2024 – 1490 м³/га (табл. 1).

Исследования показали, что структура водопотребления баклажанов существенно зависит от метеорологических условий, складывающихся в период вегетации. Данные указывают на то, что доля использования растениями осадков в зависимости от различных режимов водного обеспечения варьировалась на протяжении исследуемого периода в пределах от 28,9 до 31,5%, в то время как использование почвенных влагозапасов не превышало 2,8...4,9%, а использование оросительной воды составляло 63,6...69,3%.

Максимальная площадь листьев баклажанов наблюдалась в начале плодоношения. В разные годы в зависимости от изучаемых факторов и метеорологических условий года она колебалась в пределах 1,4...33,2 тыс. м²/га. В условиях более жесткого режима орошения (70% НВ) в среднем этот показатель агроценоза не превышал 29,4 тыс. м²/га. По мере улучшения влагообеспеченности (на вариантах с более интенсивным поливным ре-

жимом – 90% НВ) площадь листьев увеличивалась до 33,2 тыс. м²/га.

В начале вегетационного периода фотосинтетический потенциал посадок баклажанов был низким, что объяснялось незначительной листовой массой. Однако по мере увеличения листовой поверхности этот потенциал возрастал, достигая максимальных значений в фазах «цветение–начало плодообразования» и «плодообразование–последний сбор». В первом периоде ключевую роль играла интенсивность нарастания площади листьев, тогда как во втором – продолжительность данного периода. Процесс накопления сухого вещества совпадал с уровнем развития ассимиляционного аппарата, что является вполне логичным.

Наибольшие значения максимальной за вегетационный период площади листьев (33,2 тыс. м²/га), а также массы накопленного посадками органического вещества (10,11 т/га) формировались на участках, где порог предполивной влажности почвы поддерживали на уровне 90% НВ при внесении N₁₄₀P₇₀K₅₀. На этом варианте получено 44,6 т баклажанов стандартного качества с 1 га. Статистически достоверная прибавка урожая (с учетом питательного режима почвы) в сравнении с вариантом, где влажность почвы поддерживалась на уровне 70 % НВ, составила 21,3 %. Минимальная урожайность получена на варианте без внесения удобрений (б/у). В среднем за годы исследований в зависимости от режима водного питания урожайность плодов баклажанов изменялась от 23,5 до 44,6 т/га; планируемая урожайность 40 т/га в опытах получена при

Таблица 1

Расход оросительной воды, м³/га

Период роста и развития	Уровень предполивной влажности почвы, % НВ								
	70			80			90		
	Год исследований								
	2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024
Высадка–бутонизация	340/3	340/3	250/3	350/5	280/4	430/5	320/8	240/6	310/7
Бутонизация–цветение	320/2	320/2	320/2	440/4	330/3	220/2	420/6	280/4	280/4
Цветение–начало плодоношения	480/3	320/2	320/2	220/2	220/2	220/2	420/6	280/4	420/6
Начало плодоношения–последний урожай	320/2	480/3	640/4	550/5	330/3	440/4	560/8	420/6	480/7

Таблица 2

Урожайность баклажанов сорта «Черный опал» при капельном орошении, т/га

Повторность	Уровень предполивной влажности почвы, % НВ	Год исследований									
		2022		2023		2024		Среднее У			
		б/у	N ₁₄₀ P ₇₀ K ₅₀ , кг д.в./га	б/у	N ₁₄₀ P ₇₀ K ₅₀ , кг д.в./га	б/у	N ₁₄₀ P ₇₀ K ₅₀ , кг д.в./га	б/у	ΔУ	N ₁₄₀ P ₇₀ K ₅₀ , кг д.в./га	ΔУ
1	70	23,8	31,4	25,2	32,5	27,5	34,5	25,5	–	32,8	–
	80	28,6	38,8	29,3	39,7	31,9	40,9	29,9	4,5	39,8	7,0
	90	35,7	42,3	35,7	43,2	38,9	44,4	36,8	6,8	43,3	3,5
2	70	24,3	31,9	26,1	33,1	28,4	35,1	26,3	–	33,4	–
	80	27,9	38,9	30	40,7	32,7	43,1	30,2	3,9	40,9	7,6
	90	33,5	41,6	36,3	44,3	39,6	44,6	36,5	6,3	43,5	2,6
3	70	23,5	30,1	24,5	31,6	26,7	33,5	24,9	–	31,7	–
	80	28,9	36,9	29,6	38,2	32,3	40,5	30,3	5,4	38,5	6,8
	90	34,1	39,7	34,9	41,4	38,0	43,9	35,7	5,4	41,7	3,1

поддержании предполивной влажности почвы на уровне 90 %, а также при внесении расчетной дозы удобрений $N_{140}P_{70}K_{50}$ (табл. 2).

Выводы. В результате статистического анализа, полученного в опытах, установлена значимость влияния на уровень продуктивности баклажан условий водного и минерального питания, которые в опытах определялись внесением минеральных форм удобрений и проведением поливов в течение вегетационного периода.

Выращивание ранних баклажанов на суглинистых почвах в условиях юга Московской области с использованием тоннельных пленочных укрытий позволяет получать более 40 т плодов стандартного качества с гектара при капельном поливе, поддержании предполивной влажности почвы на уровне 90 % НВ, и дозах удобрений $N_{140}P_{70}K_{50}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородычев В.В., Гуренко В.М., Шенцева Е.В. Минеральное питание овощных культур при капельном орошении // Материалы научно-практической конференции «Повышение эффективности использования орошаемых земель Южного федерального округа (Шумаковские чтения). 30 сентября 2005 г. г. Новочеркасск. Вып. 4. Т. 1. Новочеркасск, 2005. С. 35–39.
2. Дубенок Н.Н., Гемонов А.В., Лебедев А.В. Влияние капельного орошения на рост и развитие саженцев сливы в питомнике в условиях Центрального Нечерноземья России // Мелиорация и водное хозяйство. 2020. № 4. С. 6–11.
3. Бородычев В.В. Современные технологии капельного орошения овощных культур: научное издание. Коломна: ВНИИ «Радуга», 2010. 241 с.
4. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1988.
5. Дубенок Н.Н., Шенцева Е.В. К вопросу совершенствования технологии возделывания ранних баклажан // Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. ФГБОУ ВПО РГАТУ; под ред. Н.В. Бышова. Рязань, 2011. С. 102–112.
6. Рекомендации по методике комплексных воднобалансовых наблюдений на орошаемых землях. М.: Наука, 1978. Вып. 1. 70 с.

7. Терпигорев А.А., Грушин А.В., Гжибовский С.А. К вопросу развития капельного орошения в России // Экол. состояние природ. среды и науч.-практ. аспекты соврем. ресурсосберегающих технологий в АПК. Рязань: Рязан. гос. агротехнол. ун-т им. П.А. Костычева, 2017; Ч. 2. С. 289–295.

REFERENCES

1. Borodychev V.V., Gurenko V.M., Shentseva E.V. Mineral nutrition of vegetable crops under drip irrigation // Materials of the scientific and practical conference «Increasing the efficiency of use of irrigated lands of the Southern Federal District (Shumakov Readings). September 30, 2005 Novocherkassk. Issue 4. Volume 1. Novocherkassk, 2005. P. 35–39.
2. Dubenok N.N., Gemonov A.V., Lebedev A.V. The influence of drip irrigation on the growth and development of plum seedlings in a nursery in the conditions of the Central Non-Black Earth Region of Russia // Melioration and water management. 2020. No. 4. P. 6–11.
3. Borodychev V.V. Modern technologies of drip irrigation of vegetable crops: scientific publication. Kolomna: All-Russian Scientific Research Institute «Raduga», 2010. 241 p.
4. Dosphehov B.A. Field experiment methodology. M.: Kolos, 1988.
5. Dubenok N.N., Shentseva E.V. On the issue of improving the technology of cultivating early eggplants. Modern energy- and resource-saving, environmentally sustainable technologies and agricultural production systems: collection of articles scientific tr. FSBEI HPE RGAU; edited by N.V. Byshova. Ryazan, 2011. P. 102–112.
6. Recommendations on the methodology of complex water balance observations on irrigated lands. M.: Nauka, 1978. Issue. 1. 70 s.
7. Terpigorev A.A., Grushin A.V., Grzhibovsky S.A. On the issue of development of drip irrigation in Russia // Ekol. state of nature environment and scientific-practical modern aspects resource-saving technologies in the agro-industrial complex. Ryazan: Ryazan. state agrotechnol. University named after P. A. Kostycheva, 2017. Part 2. Pp. 289–295.

Дубенок Николай Николаевич, академик РАН, профессор, зав. кафедрой сельскохозяйственных мелиораций, ndubenok@rgau-msha.ru; **Гемонов Александр Владимирович**, канд. с.-х. наук, доцент кафедры землеустройства и лесоводства, agetonov@yandex.ru (Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева); **Лебедев Денис Андреевич**, аспирант РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, denislebedev992@gmail.com (Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна).

УДК 626.824

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-34-40

ФУНКЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ИТ-ТЕХНОЛОГИЙ

В.И. ОЛЬГАРЕНКО, И.В. ОЛЬГАРЕНКО, И.В. КОРЖОВ, В.И. ОЛЬГАРЕНКО

Ключевые слова: средства информационно-технологической поддержки, эксплуатация оросительных систем, водопользование, водораспределение, водопотребитель, управленческие задачи, эффективность водопользования.

Keywords: information technology support tools, operation of irrigation systems, water use, water distribution, water consumer, management tasks, water use efficiency.

Аннотация. Цель: разработка научно-методического и инженерно-технического обеспечения для создания и практического применения комплекса средств информационно-технологической поддержки задач планирования водопользования на мелиоративных системах. Материалы и методы: задачи, связанные с организацией и проведением водопользования на гидромелиоративных системах, должны быть, с одной стороны, сопоставлены с задачами, решаемыми аграрными хозяйствами, а с другой стороны – с целями всего водохозяйственного комплекса региона. В современных условиях эффективность выполнения этих задач можно значительно повысить, применяя передовые средства и технологии, использовать вариантное моделирование и оптимизацию процессов планирования и управления, а также автоматизировать трудоемкие и повседневные операции.

Результаты: в ходе исследований, проведенных в 2024 г. на Лаишевской оросительной системе в Республике Татарстан в рамках Государственного контракта № 173/20-ГК, внедрен «Информационно-вычислительный комплекс для планирования водопользования при работе с мелиоративно-водохозяйственными системами». В рамках проекта разработана методика и алгоритм использования водных ресурсов с применением ИТ-технологий, а также создана уникальная структура информационного обеспечения и правила взаимодействия с этими инструментами. Данный комплекс предоставляет интерактивный интерфейс, который наглядно отображает схему оросительной системы и позволяет пользователям оперативно взаимодействовать с ее элементами. Автоматизация работ, связанных с водопользованием, позволила обеспечить системный подход к проблеме, повысить качество и оперативность принимаемых решений, использовать более точные методики расчета и обработки результатов измерений. Все это позволило повысить эффективность эксплуатации мелиоративной системы и ее элементов, в целом. Вывод: алгоритм, разработанный для моделирования планирования водопользования, учитывает существующую технологию планирования на оросительных системах и позволяет решать задачи, которые ранее были невозможны

без информационной и технологической поддержки. На Лайшевской оросительной системе в Республике Татарстан была проведена проверка этих инструментов планирования, подтвердившая их перспективность и необходимость дальнейшего усовершенствования и развития.

Abstract. Goal: implementation of scientific research related to modeling of water resources management processes, as well as substantiation of the importance of developing and applying information technology support tools to solve problems related to water use planning in irrigation and drainage systems. Materials and methods: tasks related to the organization and implementation of water use in irrigation and drainage systems should be, on the one hand, correlated with the tasks solved by agricultural enterprises, and on the other hand – with the goals of the entire water management complex of the region. In modern conditions, the efficiency of these tasks can be significantly increased by applying advanced tools and technologies, using variant modeling and optimization of planning and management processes, as well as automating labor-intensive and routine operations. Results: during the research conducted in 2024 at the Laishevskaya irrigation system in the Republic of Tatarstan under State Contract No. 173/20-GK, the «Information and computing complex for planning water use when working with melioration and water management systems» was implemented. Within the framework of the project, a methodology and algorithm for using water resources using IT technologies were developed, and a unique structure of information support and rules for interacting with these tools were created. This complex provides an interactive interface that clearly displays the irrigation system diagram and allows users to quickly interact with its elements. Automation of actions related to water use planning provided a systematic approach to solving problems, improved the quality and speed of decision-making. This, in turn, increased the efficiency of the melioration system. Conclusion: the algorithm developed for modeling water use planning takes into account the existing planning technology in irrigation systems and allows solving problems that were previously impossible without information and technological support. These planning tools were tested on the Laishevskaya irrigation system in the Republic of Tatarstan, confirming their potential and the need for further improvement and development.

Введение. Функционирование гидромелиоративных систем значительной мерой опирается на процессы водопользования. Именно водопользование определяет набор эксплуатационных, технических, финансово-экономических и других мероприятий, необходимых для оптимальной работы системы. Оно во многом формирует состав мероприятий, которые должны быть осуществлены для поддержания эффективного функционирования системы. При этом задачи, стоящие перед организацией и реализацией водопользования, неоднозначны и сложны. Они требуют принятия научно обоснованных управленческих и инженерных решений, а также оперативного их выполнения, автоматизации сложных и рутинных процессов. Современные технологии, особенно информационные технологии, способны значительно повысить эффективность выполнения этих задач в современных условиях [1].

Организация водопользования в рамках гидромелиоративной системы должна, с одной стороны, соответствовать целям агропроизводителей, а с другой – задачам водного комплекса региона. Это требует принятия обоснованных решений на основе научных и технических знаний и их быстрой реализации. В современных условиях важной задачей повышения эффективности функционирования мелиоративных систем является разработка мер по созданию информационно-технологической поддержки для их эксплуатации. Для создания таких средств необходимо привлечь широкий круг специалистов. Их усилия следует направить на разработку научного, инженерного и методического сопровождения задач эксплуатации мелиоративных систем [2].

План по водопользованию служит основным инструментом, определяющим порядок извлечения воды

из источника орошения и ее распределение между пользователями. Кроме того, он охватывает все аспекты работы мелиоративной системы и взаимодействующих с ней организаций. На самом деле, этот документ не только регулирует процесс забора и распределения воды для орошения, но также затрагивает все аспекты деятельности гидромелиоративной системы и связанных с ней учреждений и служб. Разработка системных планов водопользования, во многом, определяется теми техническими, ресурсными, научными и другими возможностями, которые фактически имеются на гидромелиоративных системах на момент проведения работ. В то же время должны учитываться и те особенности, которые, так или иначе, могут повлиять на процесс планирования [3].

Основу системного плана водопользования составляют внутрихозяйственные планы полива, разрабатываемые на основе информации о проектных режимах орошения сельскохозяйственных культур для данного региона. Такой подход дает лишь общее представление о проведении поливов в течение вегетационного периода, не отражает истинной динамики влагозапасов в почве, не учитывает реально складывающихся агроклиматических условий и связанных с ним эксплуатационных режимов орошения.

Составление внутрихозяйственных планов водопользования требует дополнительных усилий со стороны водопользователей. Но в настоящее время их, в первую очередь, интересуют вопросы получения прибыли от производства продукции на орошаемых землях, а не технологии обеспечения этих земель оросительной водой. Поэтому, зачастую, возникает проблема достоверности и достаточности данных, требуемых для разработки научно обоснованного системного плана водопользования.

Материалы и методы. В соответствии с действующей методикой составления системного плана водопользования, хозяйства должны подавать в организации, обеспечивающие эксплуатацию гидромелиоративной систем, рассчитанные внутрихозяйственные планы водопользования. Однако на практике внутрихозяйственные планы полива, чаще всего, рассчитываются в управлениях оросительных систем на основе сложившегося опыта работы и полученной от хозяйств информации о структуре посевных площадей.

Комплектование системного плана водопользования осуществляется на основе информации о внутрихозяйственных планах водопользования. При формировании системного плана водопользования его обязательно увязывают с пропускной способностью межхозяйственных каналов и сооружений, с водообеспеченностью источника орошения. При этом хозяйственные планы полива могут подвергаться корректировке.

Для увязки внутрихозяйственных планов с пропускной способностью каналов и сооружений, лимитом забора воды и технической возможностью головного сооружения рассчитываются требуемые объемы водоподдачи по всем перегораживающим сооружениям в *i*-й интервал времени, которые затем проверяются на возможность их реализации. В случае если один из лимити-

рующих факторов не позволяет обеспечить подачу расчетного объема воды, внутриводхозяйственные планы полива сельскохозяйственных культур корректируются [4].

Баланс распределения воды по системе считается установленным, если в любой момент времени для каждого перегораживающего сооружения и главного водозабора выполняется требование:

$$(L_{m,i} - 0,05L_{m,i}) \leq V_{m,i} \leq (L_{m,i} + 0,05L_{m,i}), \quad (1)$$

где $L_{m,i}$ – максимально возможный объем воды, м³, пропущенный через сооружение m за i -й период времени, который определяется либо пропускной способностью сооружения, либо ограничением на забор воды из источника орошения.

Как уже отмечалось, в процессе эксплуатации оросительных систем может возникнуть целый комплекс причин, приводящих к необходимости корректировки системных планов водопользования. Среди основных из них можно выделить:

- вероятностный характер метео- и природно-климатических прогнозов;
- неточность прогноза водоносности источника орошения;
- изменения в структуре посевных площадей;
- изменения эксплуатационных характеристик оросительной сети и сооружений;
- изменения уровня грунтовых вод;
- возникновение аварийной или нештатной ситуации на системе.

В связи с этим, при планировании водопользования должно предусматриваться решение задачи оперативной корректировки плана водопользования. Пересчет системного плана водопользования и обновление всех выходных документов должны выполняться по запросу пользователя после того, как он внесет нужные изменения в исходные данные.

Оценка современных требований к водопользованию, с одной стороны, и научно-технических воз-

можностей, обеспечивающих управление им, с другой, позволяют уточнить существующие и сформулировать новые требования к управлению водопользованием на гидромелиоративных системах, которые требуют учета при разработке планов водопользования.

Отмечается также, что реализация задач, входящих выше приведенную функциональную структуру требует больших объемов вычислений, имитационного и оптимизационного математического моделирования. На практике таких расчетов практически не производят из-за отсутствия или несовершенства соответствующих средств информационно-технологической поддержки задач планирования водопользования [5]. Функциональная структура формирования планов водопользования в современных условиях приведена на рис. 1.

Моделирование является одним из способов обеспечения эффективности управления разного рода технологическими процессами, техническими средствами, сооружениями, системами. В настоящее время, с появлением современных средств информационно-технологической поддержки, технические возможности моделирования значительно расширились. Что же касается самих моделируемых процессов, то они, в своей основе, остаются теми же, определяются теми же физическими законами, зависимостями, особенностями. А это значит, что состав задач, решаемых с использованием моделирования, как правило, должен соответствовать тем правилам и методикам, которые определены на исходном объекте в данный момент времени [6].

В соответствии с этим имитационное моделирование процессов планирования водопользования на этих стадиях должно обеспечивать его алгоритмическую, информационную и программную поддержку, а также предоставлять дополнительные возможности, которые связаны с согласованием режима источника орошения с планом водопользования, с оперативной корректировкой плана, с оптимизацией плана при дефиците водных ресурсов [7].

Вдобавок к этому создание модели должно позволять гибкое формирование и настройку информационной базы системы в зависимости от организации оросительной сети. Это включает автоматизацию процессов управления, хранения и обработки данных о состоянии каналов, сооружений, поливного оборудования и структуре орошаемых территорий, автоматизированный учет планируемых и фактических показателей водохозяйственной деятельности на оросительной системе, возможность информационного взаимодействия с другими аналогичными системами и системами более высокого уровня, используемыми в отрасли, регионе, стране [8].

Помимо ключевых требований, моделирование процессов управления водными ресурсами должно соответствовать ряду общих условий, характерных для средств ин-



Рис. 1. Функциональная структура формирования планов водопользования

формационно-технической поддержки. Это обеспечение точности, надежности и полноты данных на всех этапах обработки, унификация применяемых интерфейсов, возможность восстановления данных в случае их случайной утраты или технических неисправностей.

Результаты и обсуждение. В процессе выполнения научных исследований в рамках Государственного контракта № 173/20-ГК на выполнение прикладных научных исследований проведен анализ решения задач планирования водопользования на гидромелиоративных системах в Российской Федерации. Выявлены особенности решения этих задач в современных условиях. Определены перспективы повышения эффективности использования водных, энергетических и других ресурсов на гидромелиоративных системах за счет использования средств имитационного моделирования процессов планирования и управления водопользованием на них. Сформулированы цели и задачи планирования в условиях использования современных ИТ-средств и технологий [9].

В процессе выполнения научных исследований разработаны исходные требования к моделированию процессов планирования водопользования на гидромелиоративных системах. Определен состав информационного обеспечения моделирования. Разработана схема и методика использования средств и технологий моделирования при проведении планирования. Проведена апробация разработанных средств планирования водопользования на гидромелиоративных системах Приволжского Федерального округа, доказавшая перспективность их применения и дальнейшего совершенствования и развития [10]. Схема использования моделирования при планировании водопользования на гидромелиоративной системе может быть представлена в виде, приведенном на рис. 2.

Разработанные в процессе исследований методики были использованы для решения практических задач по расчету и формированию внутрихозяйственных планов водопользования, составляющих информационную базу для формирования системного плана водопользования по Лаишевской оросительной системе (северный участок) находящиеся в федеральной собственности и на праве оперативного управления в ФГБУ «Управление «Татмелиоводхоз».

Оросительная система находится в умеренном климатическом поясе с отчетливо выраженными сезонами года, умеренно суровой снежной зимой и жарким летом. По количеству осадков данный район относится к зоне умеренного увлажнения, их годовое количество, в среднем, составляет 566 мм. На рис. 3 представлена топологическая схема водопользования на Лаишевской

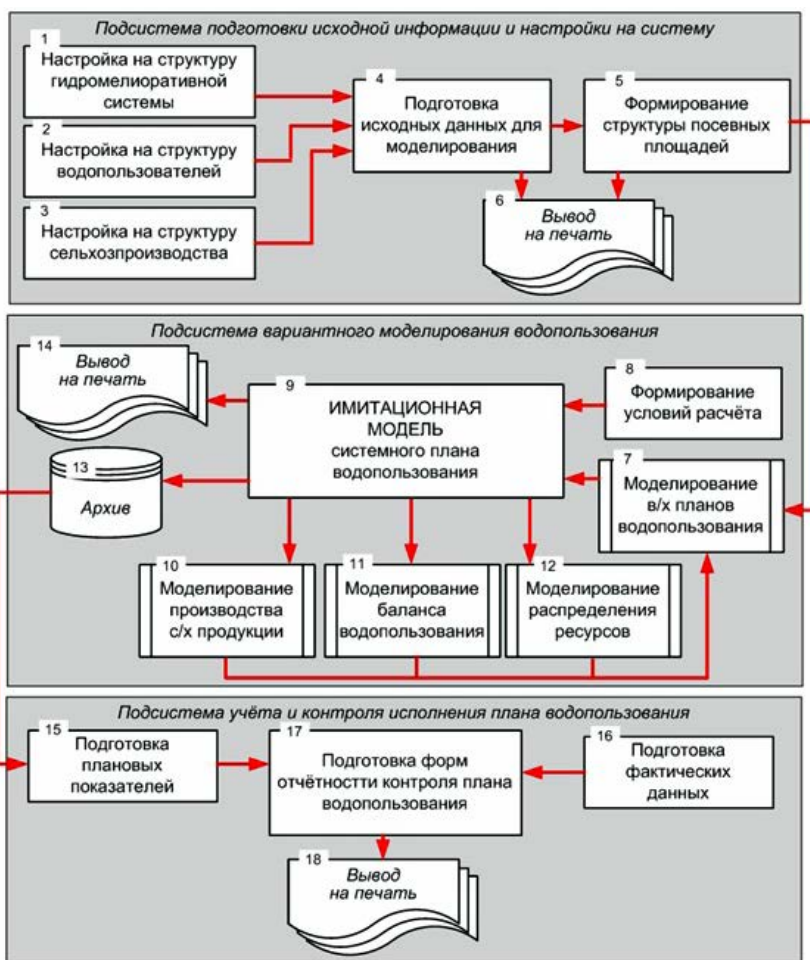


Рис. 2. Схема использования моделирования при планировании водопользования на гидромелиоративной системе

оросительной системе, созданная в составе информационно-вычислительного комплекса [11].

Создание топологической схемы гидромелиоративной системы является необходимым и очень важным этапом для дальнейшего правильного функционирования комплекса. Рекомендуется последовательное создание элементов системы, начиная с элемента основного водозабора. Так как расчеты суммарных расходов воды и прочих параметров системы могут вычисляться только последовательно, создание топологической схемы должно быть проведено таким образом, чтобы каждый последующий элемент примыкал к предыдущему. Расчет в системе ведется по ее элементам в целом. После создания всех элементов топологической схемы необходимо внести данные в справочники и задать параметры элементов оросительной системы определяющих настройку на конкретную оросительную систему. Справочники являются исходной информацией для проведения расчетов и формирования последующих документов.

Внесение сведений о внутрихозяйственных планах водопользования для каждого конкретного водопользователя осуществляется в несколько этапов, внесение основных и суммарных значений, внесение детализированных значений по декадам, расчет детализированных

Сводная ведомость по оросительным системам

Наименование ОС	Суммарные показатели				Показатели	Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			
	Физическая площадь	га-полив	Водопоглощение	Водоподача		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
																								га
Итого по филиалу	501,74	4870,0	1864,6	1883,4	га				45,87	676,40	419,25	676,40	45,87	716,33	45,87	716,33	45,87	716,33	107,32	220,19	174,27			
					га-полив				45,87	676,67	419,25	676,67	45,87	716,33	45,87	716,33	45,87	716,33	107,32	220,19	174,27			
					водопотр.				11,47	263,84	104,81	263,84	11,47	316,24	18,35	316,24	18,35	316,24	42,93	88,08	87,14			
					водоподача				11,58	265,83	105,87	265,83	11,58	319,43	18,53	319,43	18,53	319,43	43,36	88,97	88,02			
					водозабор				11,70	227,64	106,94	227,64	11,70	322,66	18,72	322,66	18,72	322,66	43,80	89,86	88,90			
Лаишевская ОС	501,74	4870,0	1864,6	1883,4	га				45,87	676,40	419,25	676,40	45,87	716,33	45,87	716,33	45,87	716,33	107,32	220,19	174,27			
					га-полив				45,87	676,67	419,25	676,67	45,87	716,33	45,87	716,33	45,87	716,33	107,32	220,19	174,27			
					водопотр.				11,47	263,84	104,81	263,84	11,47	316,24	18,35	316,24	18,35	316,24	42,93	88,08	87,14			
					водоподача				11,58	265,83	105,87	265,83	11,58	319,43	18,53	319,43	18,53	319,43	43,36	88,97	88,02			
					водозабор				11,70	227,64	106,94	227,64	11,70	322,66	18,72	322,66	18,72	322,66	43,80	89,86	88,90			

Рис. 5. Результаты расчета сводной ведомости плана водопользования

ческому обслуживанию и ремонту технических средств и сооружений, работ по охране окружающей среды, мониторингу. Данные о планировании использования водных ресурсов в ирригационных системах являются составной частью информации, используемой региональными, бассейновыми, отраслевыми и прочими управленческими и статистическими органами.

Оценка современных требований к водопользованию, с одной стороны, и научно-технических возможностей, обеспечивающих управление им, с другой, позволяют уточнить существующие и сформулировать новые требования к разработке планов водопользования. Однако реализация этих задач требует больших объемов вычислений, имитационного и оптимизационного математического моделирования, активного применения ИТ-средств и технологий. Для апробации функциональных и эксплуатационных возможностей разработанных средств в качестве объекта-представителя гидромелиоративных систем Приволжского ФО определена Лаишевская оросительная система Республики Татарстан. Использование разработанных средств для расчета показателей водопользования на этих системах показало эффективность их применения и адекватность полученных результатов.

Заключение. Предложенный алгоритм моделирования планирования водопользования обеспечивает выполнение существующей технологии планирования на оросительных системах и реализует задачи, ранее невыполнимые без информационно-технологической поддержки. Проведена апробация разработанных средств планирования водопользования на Лаишевской оросительной системе республики Татарстан, доказавшая перспективность их применения, а также дальнейшего совершенствования и развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Принципы применения информационных технологий при организации и проведении планирования водопользования на оросительных системах / В.И. Ольгаренко, И.В. Ольгаренко, И.В. Коржов, В.И. Ольгаренко // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 3. С. 100–115. URL: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-3-100-115>.
2. Ольгаренко В.И., Ольгаренко Г.В., Ольгаренко И.В. Оптимизация процессов водопользования на основе методологии ландшафтно-экологического подхода: монография. Новочеркасск: Лик, 2019. 623 с.
3. Правила эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений / В.Н. Шедрин, С.М. Васильев, В.В. Слабунов, О.В. Воеводин, А.Л. Кожанов, А.С. Штанько, С.Л. Жук. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. 171 с.

4. Ялалова Г.Х., Юрченко И.Ф. Ключевые направления трансформации планирования системного водораспределения // Научные подходы к современному развитию мелиорации земель: сборник научных трудов. М.: ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова, 2023. С. 152–159. DOI: 10.37738/VNIIGIM.2023.95.43.015
5. F. Arslan, A. Sawassii, B. Derardja, H. Degirmenci, N. Lamaddalena. The effects of land consolidation projects on pressurized irrigation system design and the cost: A case study from Türkiye // *Ecology & Hydrobiology*. 2023. V 82. Pp. 249–27.
6. A. Kaab, M. Khanali, S. Shadamanfar, M. Jalalvand. Assessment of energy audit and environmental impacts throughout the life cycle of barley production under different irrigation systems. 2024. V. 22. 100357.
7. M. Loo, E.C. Poyato, G. Halsema, J.A. Roudriguez Diaz. Defining the optimization strategy for solar energy use in large water distribution networks: A case study from the Valle Inferior irrigation system, Spain // *Renewable Energy*. 2024. V. 228. 120610.
8. Юрченко И.Ф. Планирование системного водораспределения: современное состояние и приоритетные направления совершенствования // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 1. С. 184–199.
9. Использование мобильных ИТ-приложений для решения задач водопользования на внутрихозяйственной оросительной сети / Е.А. Волкова, Д.А. Кудравец, В.И. Коржов, И.В. Коржов // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3.
10. Юрченко И.Ф. Приоритетные направления и мероприятия современной цифровизации в мелиорации // И.Ф. Юрченко // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 2. С. 84–100.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610178. Российская Федерация. Информационно-вычислительный комплекс планирования водопользования при эксплуатации мелиоративно-водохозяйственных систем: № 2022685654; заявл. 20.12.2022; опубл. 10.01.2023 / С.С. Турапин, И.В. Коржов, И.В. Ольгаренко, Т.А. Капустина, В.И. Ольгаренко; заявитель ФГБНУ ВНИИ «Радуга».

REFERENCES

1. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Korzhov I.V., Olgarenko V.I. Principles of using information technology in organizing and conducting water use planning in irrigation systems. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2024; 14(3): 100–115. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-3-100-115>.
2. Olgarenko V.I., Olgarenko G.V., Olgarenko I.V. Optimization of water use processes based on the methodology of landscape-ecological approach: monograph. Novocherkassk: Lik, 2019. 623 p.
3. Schedrin V.N., Vasil'ev S.M., Slabunov V.V., Voevodin O.V., Kozhanov A.L., Shtan'ko A.S., Zhuk S.L., 2014. *Pravila ekspluatatsii meliorativnykh sistem i otdel'no raspolozhennykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Rules of Operation of Land-Reclamation Systems and Separately Located Hydraulic Structures.]. Novocherkassk, 171 p., deposited in VNITI on 14.04.2014, no. 96-B2014.
4. Yalalova G.Kh., Yurchenko I.F. Key directions of transformation of planning of systemic water distribution // *Scientific approaches to modern development of land reclamation*. M.: All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 2023. P. 152–159.
5. F. Arslan, A. Sawassii, B. Derardja, H. Degirmenci, N. Lamaddalena. The effects of land consolidation projects on pressurized irrigation system design and the cost: A case study from Türkiye // *Ecology & Hydrobiology*. 2023. V 82. Pp. 249–27.

6. A. Kaab, M. Khanali, S. Shadamanfar, M. Jalalvand. Assessment of energy audit and environmental impacts throughout the life cycle of barley production under different irrigation systems. 2024. V. 22. 100357.

7. M. Loo, E.C. Poyato, G. Halsema, J.A. Roudriguez Diaz. Defining the optimization strategy for solar energy use in large water distribution networks: A case study from the Valle Inferior irrigation system, Spain // *Renewable Energy*. 2024. V. 228. 120610.

8. Yurchenko I.F. System water distribution planning: modern state and priority areas for improvement // *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023; 13(1): 184–199. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-184-199>.

9. Korzhov V.I., Korzhov I.V., Kudravets D.A., Sorokina O.V., Volkova E.A. The use of mobile IT-tools for solving of water management tasks in the operation of irrigated plots // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 5–16. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_1.

10. Yurchenko I.F., 2022. [Priority areas and activities of modern digitalization in land reclamation]. *Melioratsiya i gidrotehnika*, vol. 12, no. 2, pp. 84–100, <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1280> [accessed 01.06.2022], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-2-84-100>.

11. Certificate of state registration of computer program No. 2023610178. Russian Federation. Information and computing complex

for water use planning during operation of melioration and water management systems: No. 2022685654: declared. 20.12.2022: published. 10.01.2023/S.S. Turapin, I.V. Korzhov, I.V. Olgarenko, T.A. Kapustina, V.I. Olgarenko; applicant FGBNU VNII «Raduga».

Ольгаренко Владимир Иванович, доктор техн. наук, член-корр. РАН, профессор, nimi-info@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4399-997X>; **Ольгаренко Игорь Владимирович**, доктор техн. наук, доцент, зам. директора по научно-инновационной работе, danel77888@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4865-642> (Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, г. Новочеркасск); **Коржов Иван Викторович**, зав. отделом информационно-аналитического обеспечения комплексного использования и охраны водных объектов, ivkorzhov@yandex.by, <https://orcid.org/0009-0004-7450-7768> (Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону); **Ольгаренко Владимир Игоревич**, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, olgarenko_vi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9609-5571> (Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, г. Новочеркасск).

УДК 631.62; 338.43

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-40-44

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПУТЕМ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДРЕН В ДВА ЯРУСА

А.Б. ПОНОМАРЕВ, Ю.Г. ЯНКО, В.И. ШТЫКОВ

Ключевые слова: бесполостный дренаж, осушение, слабоводопроницаемые грунты, стоимость дренажа, закрытые собиратели.

Keywords: cavity-free drainage, drainage, poorly permeable soils, drainage cost, closed collectors.

Аннотация. Основная функция закрытого дренажа – отведение избыточной гравитационной воды из поверхностного корнеобитаемого слоя. Условия стока этой воды можно улучшить, сократив путь фильтрации воды и уменьшив фильтрационные сопротивления. Как показывают исследования, эти задачи особенно актуальны при слабоводопроницаемых грунтах и слабоокультуренных почвах. Исторический путь развития дренажных систем в зоне избыточного увлажнения шел в сторону сокращения междренних расстояний. Однако даже при междренних расстояниях 8...10 м требуемая интенсивность осушения не достигается в многоводные годы с осадками обеспеченностью 10%. В статье дается подробное описание конструкции высокоэффективной двухъярусной дренажной системы, которая позволяет увеличить расстояния между трубчатыми дренами. Эффективность осушения достигается сетью собирателей мелкого заложения, заполненных материалом с высоким коэффициентом фильтрации, расположенных над трубчатыми дренами и соединенных с ними в местах пересечения поглотительными колонками. Приведены результаты гидравлического расчета бесполостных дрен верхнего яруса. Выполнено сравнение двухъярусного дренажа с широко распространенным систематическим дренажем и экспериментальной конструкцией закрытых собирателей по потребности в материалах.

Abstract. The main function of drainage is to remove excess gravitational water from the surface root layer. The conditions for the flow of this water can be improved by shortening the water filtration path and reducing filtration resistance. As studies show, these tasks are especially relevant for low-permeability soils and poorly cultivated soils. The historical path of development of drainage systems in the zone of excess moisture went towards reducing the distances between drains. However, even with inter-drain distances of 8–10 meters, the required drainage intensity is not achieved in high-water years with precipitation of 10%. The article provides a detailed description of the design of a highly efficient two-tier drainage system, which allows increasing the distances between tubular drains. Drainage efficiency is achieved by a network of shallow collectors filled with material with a high filtration coefficient, located above the tubular drains and connected to them at the intersections by absorption columns. The results of the hydraulic calculation of cavity-free drains of the upper tier are presented. A comparison

of two-tier drainage with widespread systematic drainage and experimental design of closed collectors in terms of material requirements is made.

Вопросы повышения интенсивности осушения слабаводопроницаемых грунтов до сих пор находятся в центре внимания работников сельского хозяйства, прежде всего Нечерноземной зоны России. Можно выделить три этапа в решении этой проблемы. В тридцатые годы предыдущего столетия в России применялась разработанная в Германии система осушения в виде сочетания закрытого дренажа: расстояние между дренами 12...13 м с бороздами, которые прокладывались поперек дрен через 4...6 м. В этом случае поверхностные воды отводились бороздами, а верховодка дренами. В 50-х годах СевНИИГиМ предложил осушать слабаводопроницаемые грунты системой, состоящей из разреженной сети каналов через 60...100 м или дрен через 18...25 м в сочетании с агро-мелиоративными мероприятиями. Начиная с 70-х годов, пытались повысить эффективность действия дренажа путем сокращения расстояний между дренами до 8...10 м. Однако и при этих расстояниях между дренами системы не обеспечивали требуемую интенсивность осушения в годы с осадками 10% обеспеченности. Основная причина – низкая водопроницаемость грунтов подпахотного слоя и дренажной засыпки, хотя последняя и выполнялась в ряде случаев из грунтов пахотного слоя. История мелиоративных, в том числе осушительных, систем рассматривается рядом авторов [1–3]. В частности, показано, что на современном этапе возрастает экологическая роль дренажа. Задачей осушительных систем становится не только отвод избыточной влаги, но и в целом регулирование водного режима по-

чвы, в том числе и с целью предотвращения вымывания из нее питательных веществ, например, азота [4, 5]. Некоторые статьи посвящены совершенствованию экономического подхода к проектированию дренажных систем, предлагается выполнять многофакторный анализ экономической эффективности сельскохозяйственных мероприятий, в том числе и с учетом наблюдаемых изменений климата [6, 7]

Полевые и теоретические исследования по осушению слабопроницаемых грунтов как отечественных, так и зарубежных ученых позволяют сделать выводы:

- для отведения избыточной воды из пахотного слоя в требуемые сроки расстояние между дренами в зависимости от степени его окультуренности и мощности должны быть от 5 до 9 м. При этом даже в средние по осадкам годы поверхностным стоком отводится 40...80 % годового стока;

- многолетние наблюдения за дренажным стоком, в том числе в Ленинградской области показали, что фактические модули дренажного стока 10 % обеспеченности для периода осушения продолжительностью одни сутки равнялись 1,7...2,6 л/с·га. Засыпка должна обеспечивать надежную гидравлическую связь дрен с пахотным слоем;

- для отведения избыточной воды из пахотного слоя в требуемые сроки расстояние между дренами должно быть в среднем 5 м в зависимости от степени его окультуренности и мощности.

Если время снижения уровня до нормы осушения превысит одни сутки, то снижение урожайности картофеля составит до 10 %; при превышении двух суток уже до 20 % картофеля и до 10 % яровых зерновых. Это свидетельствует о необходимости увеличения расчетного модуля дренажного стока до 1,5...2 л/с·га.

Для отвода гравитационной воды только из пахотного слоя за одни сутки расстояние между осушителями в слабопроницаемых грунтах должно быть: в слабоокультуренных почвах 2...3 м, в среднеокультуренных – 5 м; хорошо окультуренных до 7...9 м. Практически всем этим требованиям удовлетворяют осушительные системы двухъярусного дренажа на базе бесполостного [8, 9], до разработки которых наибольшую интенсивность осушения обеспечивали закрытые собиратели. Обе конструкции не менее чем в трех повторностях построены на двух объектах в Ленинградской области: «Ленинские искры» и «Зайцево». На рис. 1 представлены конструкции двухъярусного дренажа и закрытых собирателей, построенные на опытном участке «Ленинские искры».

Из табл. 1 и рис. 2 следует, что гидрологическая эффективность действия двухъярусного дренажа выше

Таблица 1

Дренажный сток в 1988/89 гидрологическом году

Вид дренажа	Дренажный сток, мм				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Двухъярусный	72	44	—	12	128
Закрытые собиратели	52	34	—	11	97
Систематический	39	26	—	10	75

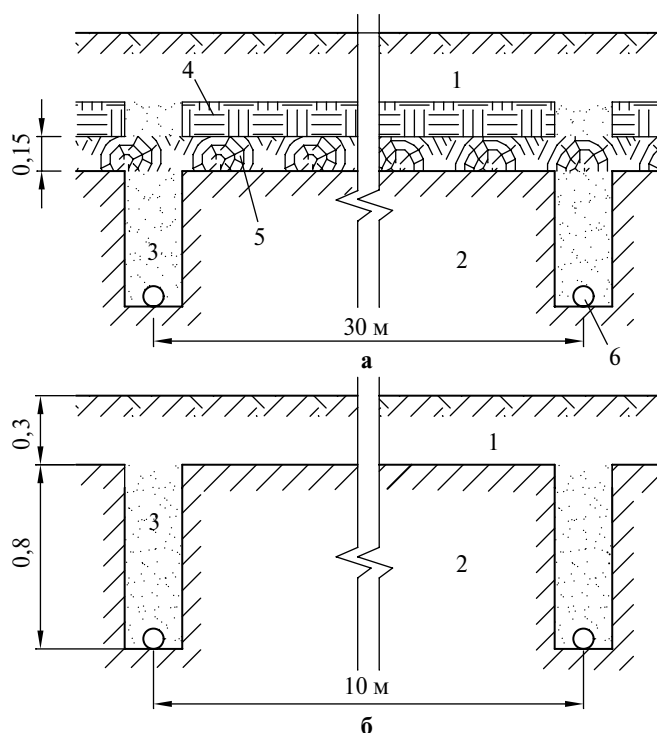


Рис. 1. Конструкции дренажных систем:

а – двухъярусный дренаж, б – закрытые собиратели; 1 – пахотный слой; 2 – слабопроницаемый грунт; 3 – засыпка песчано-гравийной смесью (ПГС), поперечный профиль сохраняется вдоль всей дрены; 4 – засыпка перемешанным (извлеченным при рытье траншей с пахотным слоем) грунтом; 5 – бесполостные дренажи; 6 – трубочатые дренажи

по сравнению с закрытыми собирателями. Так как при строительстве в этих системах используются одни и те же строительные материалы и механизмы, то затраты на их строительство будут пропорциональны объемам материалов затраченных, например, на 1 га площади каждый из систем. На участке «Ленинские искры» засыпка дрен верхнего яруса выполнялась из щепы.

Однако количество материалов при строительстве двухъярусного дренажа можно еще сократить, если полостные дренажи к нижнему ярусу подключать через плотительные колонки (рис. 3). Приведем результаты гидравлического расчета бесполостного дренажа для осушительной системы, представленной на рис. 4.

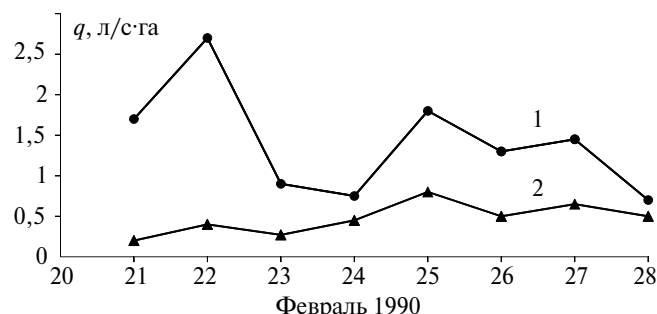


Рис. 2. Осредненные гидрографы дренажного стока на сравниваемых вариантах в период паводка:

1 – двухъярусный дренаж (3 повт.); 2 – систематический дренаж (17 повт.)

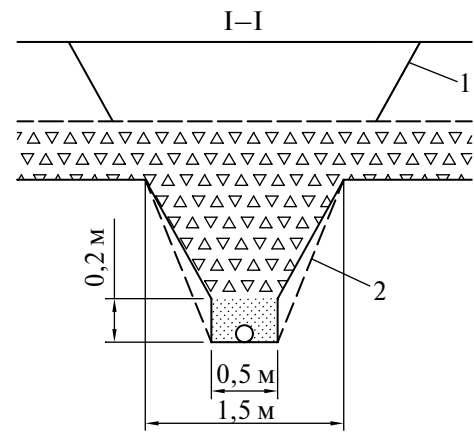
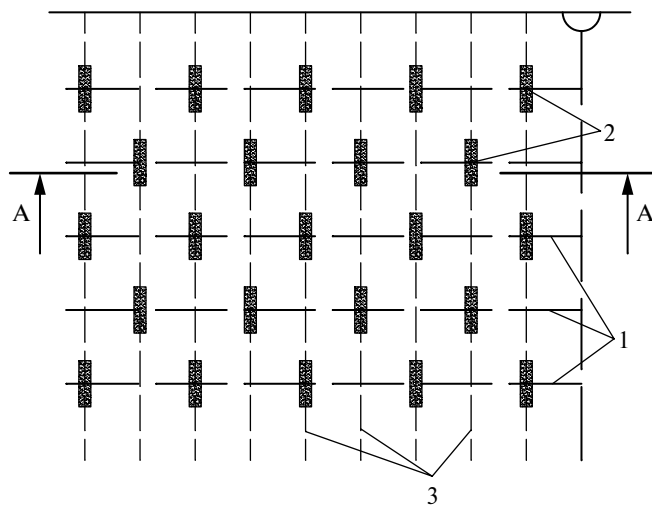


Рис. 4. Разрез 1–1 рис. 3. Поглощительная колонка (узел соединения верхнего и нижнего яруса)

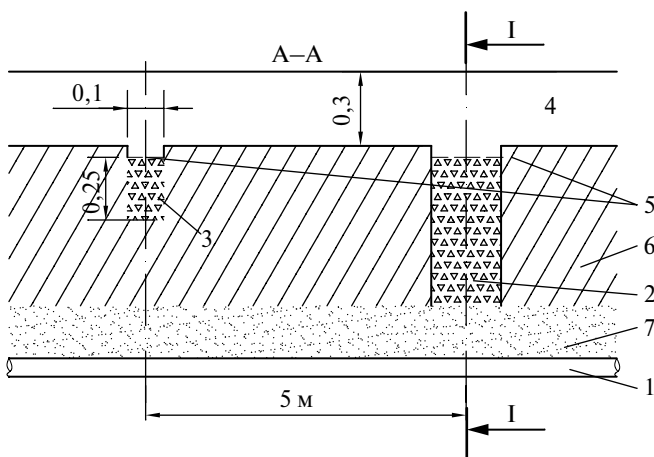


Рис. 3. Конструкция двухъярусного дренажа с поглощительными колонками:

1 – трубчатые дрены нижнего яруса; 2 – узлы сопряжений дрен верхнего яруса с трубчатыми дренами (поглощительные колонки); 3 – бесполостные дрены верхнего яруса через 5 м; 4 – пахотный слой; 5 – геотекстиль для защиты бесполостных элементов; 6 – слабопроницаемый грунт; 7 – объемный фильтр трубчатой дрены $H=0,2$ м

Принципы гидравлического расчета ранее были изложены в ряде статей, например в [8–11]. Исходные данные: наполнитель – щебень фракции 5...10 мм. Ширина бесполостных дрен по основанию 10 см. Расстояние между дренами нижнего яруса 30 м. Бесполостные дрены подключаются к дренам нижнего яруса через одну, то есть через 60 м. Бесполостные дрены прокладываются без уклона. Принимаем расчетные значения модуля дренажного стока 2 л/с/га. Принимаем также, что бесполостные дрены включаются в работу с момента оттаивания пахотного слоя и нижний ярус работает на прием только стока из дрен верхнего яруса. Расчеты показали, что практически на всей длине каждой из бесполостных дрен будет ламинарный режим движения, и максимальная расчетная глубина воды в них будет 22 см. Учитывая, что в бесполостных дренах не рекомендуется напорный режим движения, принимаем высоту наполнителя бесполостной дрены равной 25 см. Наполнитель поглощительных колонок имеет тот же состав, что и в бесполостных дренах.

В статье [11] приводятся три вида опытных конструкций, предназначенных для осушения хорошо окультуренных почв, расположенных на слабопроницаемых грунтах. На опытно-производственных участках было проведено сравнение эффективности действия экспериментальных дренажных систем с традиционной конструкцией, которая широко использовалась в практике мелиорации. Сравнение эффективности выполнено по величине урожайности четырех видов сельскохозяйственных культур. Срок наблюдения за урожайностью составлял от двух до семи лет.

Гидрологическая эффективность экспериментальных систем обусловлена улучшением гидравлической связи дренажа с пахотным слоем, по которому в основном и перемещается гравитационная вода в случае слабопроницаемого основания.

Приведем данные [11] о конструкции и урожайности на экспериментальных системах (табл. 2). Данные об урожайности капусты исключены из сводки, так как она является влаголюбивой культурой и интенсивное осушение снижает урожайность этой культуры.

Средняя строительная стоимость системы двухъярусного дренажа на участке «Зайцево» составила (в ценах 1986 г.) 7,35 тыс. руб./га. Переведем эту сумму в современные цены.

Согласно письму [12] переводной коэффициент цен для сельского хозяйства к ценам 1990 г. составляет 1,59.

Согласно письму [13] дальнейший перевод цен к уровню I квартала 2010 г. для Ленинградской области выполняется с коэффициентом 14,283.

Согласно письму [14] перевод цен I квартала 2010 г. к IV кварталу 2020 г. осуществляется с коэффициентом 8,15.

Пересчет после 2020 г. осложняется отсутствием общего переводного индекса и выполнялся по значениям инфляции трех последующих лет. В результате для приведения цены 1986 г. к цене 2023 г. использовано выражение:

$$K_{2023} = K_{1986} \cdot 241,189 = 7350 \cdot 241,189 = 1772741 \text{ руб./га.}$$

Таблица 2

Средняя урожайность сельскохозяйственных культур на участках «Ленинские искры» и «Зайцево», т/га

Вид дренажа	Материал засыпки	«Ленинские искры»			«Зайцево»
		Однолетние (1988, 1989 г.)	Свекла (1988, 1992 г.)	Морковь (1989, 1993, 1995 г.)	Однолетние (1988–1995 г.)
Систематический дренаж через 10 м (контроль)	Объемный фильтр слоем 0,2 м из ПГС, щепы, гумуса	29,4 100	26,7 100	23,0 100	15,3 100
Закрытые собиратели	Сплошная засыпка из ПГС, щепы до плужной подошвы	44,9 153	35,1 131	38,9 170	16,8 110
Двухъярусный дренаж: нижний ярус – через 30 м, верхний через 5 м	Нижний ярус: сплошная или прерывистая засыпка; верхний ярус – бесполостные дрены из ПГС, щепы	41,0 140	39,8 150	35,9 156	18,2 112

Примечание. В знаменателе проценты относительно контроля.

Таблица 3

Строительные объемы систем дренажа

Тип осушительной системы	Выемка грунта, м ³	Труба, м	Засыпка ПГС или щебнем, м ³	Засыпка щелей или щебнем, м ³	Обратная засыпка, м ³	Вывоз грунта, м ³	Количество колодцев, шт.
Двухъярусный дренаж*	416	330	65	75	274,5	141	7
Закрытые собиратели*	350	1000	200	–	150	200	20
Систематический дренаж (контроль)*	350	1000	50	–	300	50	20
Двухъярусный дренаж с параметрами по гидравлическому расчету из статьи	320	330	15,5	49	255	64,27	7

* Реальные параметры по участку «Ленинские искры».

Другая возможная оценка стоимости строительства такой системы может быть выполнена на основании письма [15], согласно которому переводной индекс для Северо-Западного федерального округа составляет в среднем 348,59. При расчете по этой методике стоимость строительства 1 га осушительной системы двухъярусного дренажа равна 2562 137 руб.

Точную стоимость строительства в современных условиях можно установить только после детальной разработки технологии, однако приведенные цифры дают представление о порядке капитальных вложений.

Сравним экспериментальные системы с контрольной по основным строительным объемам, которые в основном и влияют на их сметную стоимость. В табл. 3 приведены объемы в расчете на 1 га площади осушительной системы.

Кроме перечисленного, для защиты двухъярусного дренажа от заиления требуется 215 м²/га геотекстиля.

Выводы

1. Двухъярусный дренаж с бесполостными дренами верхнего яруса обеспечивает надежную гидравлическую связь пахотного слоя с трубчатыми дренами, благодаря чему, согласно проведенным исследованиям, обеспечивает максимальный модуль дренажного стока, что требуется в современных условиях изменения климата.

2. Двухъярусный дренаж вступает в действие сразу же после оттаивания пахотного слоя и предотвращает переувлажнение в ранневесенний период, что критически важно в посевной период в многоводные годы.

3. По объемам материала двухъярусный дренаж мало отличается от контрольного варианта (стандарт-

ный систематический дренаж), хотя стоимость его сооружения относительно велика и составляет при расчете по использованным методикам 1,8...2,6 млн р/га.

ЛИТЕРАТУРА

- Агарев А.Ф., Бузенкова О.В. Развитие мелиорации в СССР в 1965–1980-е годы (по материалам Рязанской области) // Вестник Екатеринбургского института. 2016. № 2(34). С. 3–7. EDN WXOJUB.
- Valipour M., Krasilnikof J., Yannopoulos S., Kumar R., Deng J., Roccaro P., Mays L., Grismer M.E., & Angelakis A.N. (2020). The evolution of agricultural drainage from the earliest times to the present. In *Sustainability* (Switzerland) (Vol. 12, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/SU12010416>.
- Yannopoulos S.I., Grismer M.E., Bali K. M., & Angelakis A.N. (2020). Evolution of the materials and methods used for subsurface drainage of agricultural lands from antiquity to the present. In *Water* (Switzerland) (Vol. 12, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/w12061767>.
- Shailendra Singh, Rabin Bhattarai, Lamyaa M. Negm, Mohamed A. Youssef, Cameron M. Pittelkow. Evaluation of nitrogen loss reduction strategies using DRAINMOD-DSSAT in east-central Illinois, *Agricultural Water Management*, Volume 240, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106322>
- Kielo Isomäki, Alekski Salla, Heidi Salo, Harri Koivusalo; Hydrological effects of open ditch damming and controlled subsurface drainage in a Nordic agricultural field. *Hydrology Research* 1 February 2024; 55 (2): 112–127. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2024.053>
- Shirsath P.B., Aggarwal P.K., Thornton P.K., & Dunnett A. (2017). Prioritizing climate-smart agricultural land use options at a regional scale. *Agricultural Systems*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.agy.2016.09.018>
- Akpoti K., Kobo-bah A.T., & Zwart S. J. (2019). Agricultural land suitability analysis: State-of-the-art and outlooks for integration of climate change analysis. In *Agricultural Systems* (Vol. 173). <https://doi.org/10.1016/j.agy.2019.02.013>
- Shytkov V., Ponomarev A. Drains that Provide Highly Efficient Drainage of the Subgrade and Increase of the Subgrade // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021*, Novosibirsk, 11–14 мая 2021 г. Vol. 402–1. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 314–323. DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_35. EDN FTOXWC.

9. Shtykov V., Ponomarev A. Hydraulic Design of a Component Cavity-Free Drains at Transient Water Flow in the Aggregate // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021, Novosibirsk, 11–14 мая 2021 г. Vol. 402–1. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 324–333. DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_36. EDN DRIRYN.

10. Shtykov, V., Ponomarev A., Yanko Ju. Hydraulic Analysis of a Sloped Trapezoidal Non-cavity Drain Improved by a Pipe Drainage // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 мая 2020 г. Novosibirsk, 2021. P. 768–774. DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.129. EDN QBAAMO.

11. Штыков В.И., Климов А.И. Прогрессивные конструкции дренажа для осушения слабоводопроницаемых грунтов // Мелиорация и водное хозяйство. 1997. № 1. С. 43–45.

12. Об индексах изменения стоимости строительно-монтажных работ и прочих работ и затрат в строительстве / Письмо от 6 сентября 1990 г. № 14-Д. Государственный строительный комитет СССР.

13. О рекомендуемых к применению в I квартале 2010 г. индексах изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексы изменения сметной стоимости проектных и изыскательских работ, индексы изменения сметной стоимости проектных работ и затрат, а также индексы изменения сметной стоимости оборудования: письмо от 20.01.2010 № 1289-СК/08 Министерство регионального развития Российской Федерации.

14. О рекомендуемой величине индексов изменения сметной стоимости строительства в IV квартале 2020 года, в том числе величине индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексов изменения сметной стоимости пусконаладочных работ, индексов изменения сметной стоимости проектных и изыскательских работ: письмо Минстроя России от 02.11.2020 № 44016-ИФ/09.

15. Об индексах изменения сметной стоимости строительства по Федеральным округам и регионам Российской Федерации на апрель 2023 года: письмо инженеров сметчиков от 10.04.2023 № СС/2023–04ти.

REFERENCES

1. Agarev A.F., Buzenkova O.V. Razvitiye melioratsii v SSSR v 1965–1980-e gody (po materialam Ryazanskoj oblasti) [Development of land reclamation in the USSR in 1965–1980s (based on materials from Ryazan region)] // Bulletin of the Ekaterininsky Institute. 2016. No. 2(34). P. 3–7.

2. Valipour M., Krasilnikof J., Yannopoulos S., Kumar R., Deng J., Roccaro P., Mays L., Grismer M.E., & Angelakis A.N. (2020). The evolution of agricultural drainage from the earliest times to the present. In Sustainability (Switzerland) (Vol. 12, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/SU12010416>.

3. Yannopoulos S.I., Grismer M.E., Bali K. M., & Angelakis A.N. (2020). Evolution of the materials and methods used for subsurface drainage of agricultural lands from antiquity to the present. In Water (Switzerland) (Vol. 12, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/w12061767>.

4. Shailendra Singh, Rabin Bhattarai, Lamyaa M. Negm, Mohamed A. Youssef, Cameron M. Pittelkow. Evaluation of nitrogen loss reduction strategies using DRAINMOD-DSSAT in east-central Illinois, Agricultural Water Management, Volume 240, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106322>

5. Kiello Isomäki, Alekski Salla, Heidi Salo, Harri Koivusalo; Hydrological effects of open ditch damming and controlled subsurface

drainage in a Nordic agricultural field. Hydrology Research 1 February 2024; 55 (2): 112–127. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2024.053>

6. Shirsath P.B., Aggarwal P.K., Thornton P.K., & Dunnett A. (2017). Prioritizing climate-smart agricultural land use options at a regional scale. *Agricultural Systems*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.09.018>

7. Akpoti K., Kabo-bah A.T., & Zwart S. J. (2019). Agricultural land suitability analysis: State-of-the-art and outlooks for integration of climate change analysis. In *Agricultural Systems* (Vol. 173). <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.02.013>

8. Shtykov V., Ponomarev A. Drains that Provide Highly Efficient Drainage of the Subgrade and Increase of the Subgrade // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021, Novosibirsk, 11–14 мая 2021 г. Vol. 402–1. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 314–323. DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_35. EDN FTOXWC.

9. Shtykov V., Ponomarev A. Hydraulic Design of a Component Cavity-Free Drains at Transient Water Flow in the Aggregate // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021, Novosibirsk, 11–14 мая 2021 г. Vol. 402–1. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 324–333. DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_36. EDN DRIRYN.

10. Shtykov, V., Ponomarev A., Yanko Ju. Hydraulic Analysis of a Sloped Trapezoidal Non-cavity Drain Improved by a Pipe Drainage // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 мая 2020 г. Novosibirsk, 2021. P. 768–774. DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.129. EDN QBAAMO.

11. Shtykov V.I., Klimko A.I. Progressivnye konstrukcii drenazha dlya osusheniya slabovodopronicaemykh gruntov [Advanced drainage structures for drainage of low-permeability soils] // Land Reclamation and Water Management. 1997. No. 1. P. 43–45.

12. On the indices of changes in the cost of construction and installation works and other works and costs in construction / Letter dated September 6, 1990, No. 14-Д. USSR State Committee for Construction.

13. On the recommended indices for the estimated cost of construction and installation works in Q1 2010, indices for the estimated cost of design and survey works, indices for the estimated cost of design works and expenses, as well as indices for the estimated cost of equipment / Letter dated January 20, 2010, No. 1289-СК/08 Ministry of Regional Development of the Russian Federation.

14. On the recommended indices for changes in the estimated construction cost in Q4 2020, including indices for changes in the estimated cost of construction and installation works, indices for changes in the estimated cost of commissioning works, and indices for changes in the estimated cost of design and survey works / Letter from the Russian Ministry of Construction dated November 2, 2020, No. 44016-ИФ/09.

15. On the indices of changes in the estimated construction cost by federal districts and regions of the Russian Federation for April 2023 / Letter from cost engineers dated April 10, 2023, No. СС/2023–04.

Пonomarev Андрей Борисович, канд. техн. наук, доцент, rol1nот@yandex.ru; **Штыков Валерий Иванович**, доктор техн. наук, профессор, shtikov41@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург); **Янко Юрий Григорьевич**, канд. техн. наук, зав. лабораторией агроклимата, yanko@agrophys.ru (Агрофизический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург).

АЛЕКСЕЮ СЕМЁНОВИЧУ ОВЧИННИКОВУ – 75 ЛЕТ

Алексей Семенович Овчинников родился 4 марта 1950 г. в селе Горный Балыклей Дубовского района Волгоградской области.

Окончил гидромелиоративный факультет Волгоградского сельскохозяйственного института.

В 1975 г. избран по конкурсу на должность ассистента кафедры сельскохозяйственного водоснабжения. В этом же году поступил в заочную аспирантуру (научный руководитель М.С. Григоров). Проводил исследования внутрипочвенного орошения озимой пшеницы животноводческими стоками в Белгородской области.

В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию, работал старшим преподавателем, доцентом эколого-мелиоративного факультета. Изучал вопросы режимов орошения сельскохозяйственных культур, способов полива, использования в сельскохозяйственном производстве сточных вод и сапропелевых отложений Волго-Ахтубинской поймы.

С 1992 по 1998 г. работал в должности проректора по воспитательной работе Волгоградской сельскохозяйственной академии. В 1998 г. избран заведующим кафедрой сельскохозяйствен-

ного водоснабжения и деканом эколого-мелиоративного факультета. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию, получил ученое звание профессора. В 2003 г. избран на должность ректора Волгоградской государственной сельскохозяйственной академии, которую занимал до 2020 г.

Под руководством А.С. Овчинникова академия получила государственный статус университета, а вуз стал одним из крупнейших образовательных и научных центров по подготовке высококвалифицированных кадров для АПК Нижнего Поволжья и других регионов России.

При его активном участии разработаны проекты стратегий развития мелиорированных земель в Российской Федерации до 2020 г. и развития аграрного образования в Российской Федерации до 2030 г.

А.С. Овчинников являлся руководителем проекта по разработке стратегии и программ комплексного развития сельских территорий Волгоградской области и эффективного функционирования АПК в условиях ВТО. Проект успешно внедрен в аграрном секторе экономики региона.

Научные проекты А.С. Овчинникова удостоены 5 государственных научных грантов в сфере науки и техники, 55 медалей и 58 дипломов престижных агропромышленных выставок России и зарубежья. Опубликовано 485 научных работ, в том числе в изданиях Web of Science и Scopus. А.С. Овчинников является автором 15 учебных пособий, 12 монографий и 104 патентов на изобретения. Под его руководством защищены 17 кандидатских и 3 докторские диссертации.

А.С. Овчинников руководит научной школой «Энерго-ресурсосберегающая экологически безопасная технология поверхностного, внутрпочвенного, капельного орошения и орошения дождеванием при выращивании сельскохозяйственных культур».

При непосредственном участии А.С. Овчинникова проводятся исследования по разработке новых технологий восстановления и реконструкции мелиоративных и гидротехнических сооружений и высокоэффективного и надежного оборудования для целей питьевого и хозяйственного водоснабжения, а также повышению продуктивности сельхозугодий и восстановлению почвенного плодородия на мелиорируемых землях юга России. В результате внедрения новых конструкций дождевальных машин, систем малообъемного комбинированного орошения на основе капельного и мелкодисперсного орошения, водозаборных устройств, обеспечивающих экономичную оросительную воду, повысилась эффективность работы насосного оборудования, достигну-



то снижение энергоемкости полива на 15...18 %.

При непосредственном участии А.С. Овчинникова выведен и адаптирован сорт хлопчатника ПГССХ 1 (патент № 8275), удовлетворяющий по качеству получаемой продукции потребности текстильного производства России.

По инициативе А.С. Овчинникова в соответствии с Указом Президента РФ от 21.07.2016 № 350 в 2016 г. Волгоградским ГАУ открыто новое направление по гибридизации и изучению генетического потенциала сортов томатов волгоградской селекции с целью создания новых перспективных сортообразцов.

Профессор А.С. Овчинников отмечен благодарностями, почетными грамотами Министерства сельского хозяйства РФ, губернатора Волгоградской области, Комитета по сельскому хозяйству области, Волгоградской областной Думы.

В 2004 г. А.С. Овчинникову присвоено почетное звание «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации», в 2009 г. награжден орденом Дружбы, а в 2014 г. удостоен звания «Почетный работник агропромышленного комплекса России».

В 2018 г. за большой вклад в развитие сельского хозяйства и обеспечение продовольственной безопасности региона А.С. Овчинников награжден медалью «За заслуги перед Волгоградской областью». Указом Президента России от 04.10.2019 за многолетний самоотверженный труд на благо развития отечественного образования А.С. Овчинников награжден орденом Почета.

В 2019 г. избран академиком Российской академии наук.

В настоящее время работает в должности заведующего кафедрой «Прикладная геодезия, природообустройство и водопользование» Волгоградского государственного аграрного университета.

Уважаемый Алексей Семёнович! Коллектив ВолГАУ, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, редакция журнала «Мелиорация и водное хозяйство» желают Вам крепкого здоровья, бодрости духа и вдохновения! Пусть неиссякаемый оптимизм и любовь к жизни помогают Вам творить на благо университета и российской науки еще долгие-долгие годы!

*Директор ФГБНУ «ФНЦ гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова», академик РАН, доктор с.-х. наук, профессор **В.А. Шевченко***

*Первый заместитель директора по науке НИИ фундаментальных и прикладных агробиотехнологий ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор **В.С. Бочарников***