ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-40

FACTOR ANALYSIS OF DATA ON EARLY POTATO YIELD IN THE FIELD EXPERIMENT AND PROCESSING OF SIMULATION RESULTS

V. V. Borodychev¹, Yu. P. Dobrachev², A. A. Buber², S. A. Menshikova²

¹*Volgograd Branch of the All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering
and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Volgograd*

²*Federal State Budget Science Center «All-Russian Scientific Research Institute of Hydrotechnics and
Land Reclamation named after A. N. Kostyakov», Moscow*

Received 17.01.2020

Submitted 25.05.2020

*This work was part of the RFBR grant “Development of irrigation management technology based
on simulation of the hydrothermal regime of agrocenosis” (No. 19-416-343004 r_mol_a)
with financial support from the Volgograd region*

Summary

The article presents information about the conduct of a multi-factor field experiment, on the basis of which the digital simulation program "POTATO" construction and verification was performed. Performed the statistical processing of the field studies results in comparison with calculated on the simulation model.

Abstract

Introduction. The increase in crop production is necessary to provide the population with food, as well as to further increase the volume of exports. Growing potatoes, as one of the main food crops, is a strategically important task for the markets and the agricultural sector development and regulation. Relevance of the irrigation management technology using the agrocenosis simulation model development is due to the need to create a new generation of irrigation systems that allow using the achievements of scientific and technological progress and new knowledge in related fields of science for the highly efficient agriculture practical implementation on irrigated lands. **Object** of the research is to study the practical hydrothermal agrocenosis regime managing aspects and develop computerized technology algorithms using an agrocenosis simulation model operation. **Materials and methods.** Based on the analysis of literature data, the authors developed an algorithm for modeling the culture development process in agrocenosis and compiled a mathematical model block diagram. In the course of field research, we collected and analyzed phenological parameters for the phases of crop development, soil and climate characteristics, agro-technical parameters, and evaluated drip and combined irrigation methods in order to determine the advantages for growing potatoes in the climatic conditions of the Volgograd region. During the experiments, two methods of watering early potatoes were studied: drip and combined (drip irrigation and fine sprinkling) with three combinations of soil moisture maintenance levels and three levels of mineral nutrition for the planned yield of 40, 50 and 60 tons per hectare. To determine the indicators of photosynthetic potatoes activity used a results of biometric accounting for the experiment variants. The potatoes photo-synthetic potential was calculated by summing the daily values of the leaf area. The growth dynamics of tubers was determined during the growing season, starting from the budding phase of plants. To determine the yield of potatoes as criteria that characterize the efficiency of production, the results of accounting for the weight of tubers in the phase of biological ripeness were selected. Mathematical processing and statistical analysis of experimental data was performed using dispersion and regression analyses based on Microsoft Office application programs. Next, a database was formed for simulation (meteorological elements, water-physical and agrochemical properties of the soil, agricultural engineering), followed by numerical experiments on experimental data to identify the model and improve its accuracy. The development of the «POTATO» dynamic model was performed in Excel using standard operators and the Visual Basic for Applications programming language. **Results and conclusions.** Accumulated over a three-year period of experimental data from multi-factor field experience combined to identify the biological parameters of the model and conduct its verification. Based on the statistical processing, we

can conclude that the model is functioning properly and is suitable for predicting and managing the potato development process. The results of a multi-factor field experiment have shown that under the same conditions of soil irrigation, the use of fine sprinkling provides an increase in the yield of early-maturing potatoes by 10% compared to the drip irrigation method. An increased dose of mineral fertilizers increases the growing season duration by 1-2 days. In the phase of early potato development "sprouts - the beginning of budding" with drip irrigation, it is necessary to maintain the threshold of preseeding humidity in the layer of 0.5 m at the level of 70 % of the lowest moisture capacity. With combined irrigation, it is also advisable to maintain the pre-sowing humidity at the level of 70% of the lowest moisture capacity. In the "beginning of budding - flowering" phase with drip and combined irrigation, it is necessary to maintain the threshold of preseeding humidity in the same layer at the level of 70 % of the lowest moisture capacity. In the phase of "flowering-the end of growth" with drip irrigation it is necessary to maintain the threshold seedbed moisture at 80 % of the smallest moisture capacity, and the combined method of irrigation is recommended to maintain seedbed moisture threshold at 80 % of the lowest moisture capacity. At the same time, the maximum dose of mineral fertilizers does not always have a positive effect on the crop yield, and in some cases even reduces the productivity of agrocenosis. The obtained field data can serve as a source of information for the purposes of mathematical modeling of the production process, and the convergence of the calculated and actual parameters of crop formation indicates the adequacy of the «POTATO» model.

Key words: *early potatoes, drip irrigation, fine irrigation, simulation, evapotranspiration, photosynthesis, growth processes.*

Citation. Borodychev V. V., Dobrachev Yu. P., Buber.A. A., Menshikova S. A. Factor analysis of data on the yield of early potatoes in the field experiment and processing of simulation results / *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020. 2(58). 404-419 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-40.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
УДК 631.674.6:635.21:004.9

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО УРОЖАЙНОСТИ РАННЕГО КАРТОФЕЛЯ В ПОЛЕВОМ ОПЫТЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. В. Бородычев¹, доктор сельскохозяйственных наук,
профессор, академик РАН

Ю. П. Добрачев², доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник

А. А. Бубер², научный сотрудник

С. А. Меньшикова², кандидат сельскохозяйственных наук,
старший научный сотрудник

¹Волгоградский филиал Всероссийский НИИ гидротехники и мелиорации
имени А.Н. Костякова, г. Волгоград

²ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский
институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова», г. Москва

Дата поступления в редакцию 17.01.2020

Дата принятия к печати 25.05.2020

**Работа выполнена в рамках гранта РФФИ «Разработка технологии управления
орошением на основе имитационного моделирования
гидротермического режима агроценоза»
(№ 19-416-343004 p_мол_а) при финансовой поддержке Волгоградской области**

В статье представлена информация о проведении многофакторного полевого опыта, на основе которого выполнялись построение и верификация программы цифрового имитационного моделирования «POTATO». Проведена статистическая обработка полученных результатов натур-

ных исследований в сравнении с рассчитанными на имитационной модели. Актуальность разработки технологии управления орошением с применением имитационной модели агроценоза обусловлена необходимостью создания оросительных систем нового поколения, позволяющих использовать достижения научно-технического прогресса и новые знания в смежных областях науки для практической реализации идеи высокоэффективного земледелия. Выращивание картофеля, одной из основных продовольственных культур, представляет собой стратегически важную задачу развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции. На основе имитационного моделирования процессов формирования урожая становится возможным спрогнозировать урожайность и выработать необходимые агрометеорологические мероприятия в зависимости от потребностей выращиваемых культур и прогнозируемых погодных условий, обосновать выбранный режим и способ орошения, которые позволят минимизировать негативное влияние на посев и повысить урожайность с учетом экономии ресурсов. **Объектом** исследования является изучение практических аспектов управления гидротермическим режимом агроценоза и разработка алгоритмов работы компьютеризированной технологии. **Материалы и методы.** На основе анализа литературных данных авторами разработан алгоритм моделирования процесса развития культуры в агроценозе и составлена структурная схема математической модели. В ходе полевых исследований были собраны и проанализированы фенологические параметры фаз развития сельскохозяйственных культур, почвенно-климатические характеристики, агротехнические параметры, а также оценены капельное и комбинированные методы орошения (капельное орошение и мелкодисперсное дождевание) с целью определения преимуществ выращивания картофеля в климатических условиях Волгоградской области. На основе полученной информации осуществлялось формирование базы данных для имитационного моделирования с последующим выполнением численных экспериментов по опытным данным для идентификации модели и повышения ее точности. **Результаты и выводы.** Накопленные за трехлетний период экспериментальные данные многофакторного полевого опыта в совокупности позволили выполнить идентификацию биологических параметров модели и провести её верификацию. На основе проведенной статистической обработки можно сделать вывод об адекватном функционировании модели и ее пригодности для прогноза и управления процессом развития культуры.

Ключевые слова: *ранний картофель, капельное орошение картофеля, мелкодисперсное дождевание картофеля, имитационное моделирование агроценозов, урожайность раннего картофеля.*

Цитирование. Бородычев В. В., Добрачев Ю. П., Бубер. А. А., Меньшикова С. А. Факторный анализ данных по урожайности раннего картофеля в полевом опыте и обработка результатов имитационного моделирования. *Известия НВ АУК.* 2020. 2(58). 404-419. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-40.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Для решения задач управления продукционным процессом, протекающим в агроэкосистеме, необходимо иметь в значительной степени полное и точное количественное описание основных физиологических характеристик и факторов, оказывающих влияние на рост и развитие растений. От точности получаемых данных будет зависеть прогнозный конечный результат, позволяющий предвидеть ход процесса. Проведение полевых опытов было и остается одним из основных инструментов получения исходных данных, необходимых для создания, калибровки и апробации математических имитационных моделей. Для успешного моделирования процесса формирования урожая и назначения стратегии управления необходим сбор большого числа результатов физических измерений и подбор расчетных математических параметров функций. Перечень показателей состояния объекта моделирования, необходимых для формирования базы входных данных для последующего построения и адаптации модели может включать в себя характеристики основных блоков модели агроценоза, таких как природно-климатические условия, почвенные характеристики (водно-физические свойства и механический состав), фенологические, агротехнические и мелиоративные параметры [1]. Получение этих данных достигается путем постановки опытно-производственных экспериментов и лабораторных исследований. Факторный анализ позволяет определить взаимозависимости изучаемых параметров и оценить значение ошибки при сравнении точности модельных прогнозов и результатов полевого опыта.

Материалы и методы. С целью получения необходимых экспериментальных данных для последующего построения компьютерной имитационной модели, в период с 2015 по 2017 гг. был заложен многофакторный опыт по выращиванию раннеспелого картофеля на светло-каштановых почвах сухостепной зоны Волгоградской области. Натурные полевые исследования выполнялись в крестьянско-фермерском хозяйстве (КФХ) «Выборнов В.Д.» Ленинского района. В хозяйстве используется традиционная для региона система растениеводства и агротехнических мероприятий.

При проведении опытов изучались два способа полива раннего картофеля: капельный и комбинированный (капельный полив + мелкодисперсное дождевание) при трех комбинациях уровней поддержания влажности почвы и трёх уровнях минерального питания под планируемую урожайность на 40, 50 и 60 т/га. При выборе вариантов поддержания влажности руководствовались современными работами по обоснованию водного режима почвы при выращивании картофеля на капельном орошении [10, 12]. В качестве посадочного материала был использован высокоинтенсивный и районированный сорт картофеля «Импала». На всех вариантах полевого опыта, в которых применялось систематическое размещение делянок, рельеф, почвенные и гидрологические условия участка были достаточно однородными. Требования репрезентативности и однородности почвенного покрова были соблюдены в соответствии с существующими методиками постановки полевого опыта [4].

Опытный участок размещен в 4-польном севообороте с насыщением 25 %: 1-е поле – яровые зерновые; 2-е поле – лук; 3-е поле – картофель; 4-е поле – бахчевые. Участок поля размером 180х50 м разбивался на опытные делянки: ширина одной делянки – 9 м, длина – 25 м (18 делянок). Повторности выполнялись на делянках, размером 9х5 м (54 делянки). Раскладка капельных линий производилась через 1,4 м, всего было разложено 129 капельных линий по 50 м каждая. На 1 м² приходилось порядка 6 растений, растения высаживались в сдвоенный рядок на расстоянии 0,3 м друг от друга, посередине располагалась капельная линия. Размещение делянок и линий капельного орошения представлено на рисунке 1.

Рисунок 1 – Размещение делянок и поливной техники на участке

Picture 1 - Placement of plots and irrigation equipment on the site

В опытах изучали влияние 3 факторов на урожайность раннего картофеля. Способ полива – фактор № 1, варианты:

A1 – капельное орошение;

A2 – комбинированное орошение (капельное + мелкодисперсное дождевание, включается автоматически при достижении температуры воздуха 25 °С).

Водный режим почвы – фактор № 2, варианты:

B1 – поддержание в слое 0,5 м постоянного порога предполивной влажности почвы на уровне 80 % НВ;

B2 – поддержание в слое 0,5 м дифференцированного порога предполивной влажности почвы, 70-80-80 % НВ (70 % НВ в период от посадки до фазы бутонизации, 80 % НВ – с начала фазы бутонизации до завершения вегетационного периода);

B3 – поддержание в слое 0,5 м дифференцированного порога предполивной влажности почвы, 70-70-80 % НВ (70 % НВ в период от посадки до фазы массового цветения картофеля, 80 % НВ – с начала фазы цветения до завершения вегетационного периода).

Уровень минерального питания – фактор № 3, варианты:

С1 – доза внесения минеральных удобрений, рассчитанная под планируемую урожайность 40 т/га клубней картофеля;

С2 – внесение минеральных удобрений на планируемую урожайность 50 т/га клубней картофеля;

С3 – внесение минеральных удобрений на планируемую урожайность 60 т/га клубней картофеля.

В полевом опыте был предусмотрен эталонный (контрольный) участок посадки картофеля, культивируемого на богаре, без внесения удобрений (код варианта опыта – А0В0С0).

Подготовка семенного материала в хозяйстве осуществлялась в марте каждого года. После зимнего хранения клубни картофеля перебирали и калибровали по фракциям. Для ранней посадки использовались только здоровые отобранные клубни весом около 50 г, выдержанные на свету при температуре около 10-15 °С. Посадочный материал считался подготовленным, если на клубнях начиналось образование глазков. Подготовка семенного материала включала обработку препаратом Вермистим (доза 8 л/т) непосредственно перед посадкой.

Посадка раннего картофеля в изучаемой агроклиматической зоне, как правило, выполняется в конце первой декады апреля. Посадка проводилась при достижении почвой физической и биологической спелости (высыхание и прогревание на глубину 0,1 м до 7-8 °С) 11 апреля в 2015 году, 12 апреля в 2016 году и 7 апреля в 2017 году.

Предпосадочная обработка почвы предусматривала борьбу с сорняками и создание разрыхленного пахотного слоя, легко проницаемого для поступления осадков и поливной воды. После уборки предшественника участок обрабатывали гербицидом Раундап (доза 5 л/га). Зяблевую вспашку проводили через 30 суток после обработки гербицидом, на глубину 25 - 30 см трактором ДТ-75 с навесным плугом ПЛН-4-35.

Использовался ленточный способ посадки картофеля в двоярный гребень, по схеме 90 + 50. Эта схема посадки получила широкое распространение в Волгоградской области. Данный способ позволяет использовать одну капельную линию на два ряда растений. Густота посадки определялась из расчета размещения порядка 60 тыс. кустов на 1 га. После заделки клубней гребни формировали высотой 0,12 - 0,15 м. Для наилучшей инсоляции растений рядки были сориентированы с севера на юг.

В период вегетации уход за растениями включал двукратное рыхление междурядий с окучиванием. Для борьбы с сорняками до появления всходов картофеля дополнительно проводили опрыскивание гербицидом Стомп (33 % к.э.). Для борьбы с колорадским жуком применяли Актара (25 % в.г. в дозе 0,1 кг/га), который вносили с поливной водой. В 2017 году при обнаружении колорадского жука потребовалось дополнительное опрыскивание посадок препаратом Конфидор (20 % в.р.к. в дозе 0,25 л/га).

Сроки уборки раннего картофеля – середина июля. За 3-5 дней до сбора урожая картофеля ботву убирали, что способствует утолщению кожуры клубней и их лежкости. После копки картофеля с помощью мотоблока клубни подсушивали на открытом воздухе в течение 3-5 часов и определяли их массу на каждой делянке, а также массу клубней в отдельных кустах. Обработку данных вели с использованием современных методов [13].

Поливную норму рассчитывали по формуле А. Н. Костякова (1960):

$$m = 100 \cdot h \cdot \alpha \cdot (W_{HB} - W_{П}), \quad (1)$$

где m – поливная норма, м³/га; h – глубина активного слоя, м; α – плотность сложения почвы, т/м³; W_{HB} и $W_{П}$ – влажность активного слоя почвы, соответственно при наименьшей влагоемкости и перед поливом, % от массы сухой почвы.

Однако в случае использования технологии полива с помощью капельного орошения применять вышеуказанную формулу без коэффициента, учитывающего долю площади, оставшуюся неувлажненной при поливе, некорректно. Коэффициент S определяет отношение увлажняемой площади к общей площади экспериментального участка. Для рассматриваемых условий формула расчета поливной нормы преобразована следующим образом:

$$m = 100 \cdot h \cdot \alpha \cdot S (W_{HB} - W_{П}), \text{ м}^3/\text{га}, \quad (2)$$

где S – доля площади, подлежащая увлажнению.

При первом способе полива – капельном орошении, производительность капельницы составляет 1,3 л/час. Общая длина капельных линий – 6450 м. Число капельниц – 21 500 шт./га. Общий расход капельниц в час составляет 27,9 м³/га. Продолжительность полива для поддержания в слое 0,5 м заданного порога предполивной влажности почвы на уровне 80 % НВ составляла 7,1 часа (200 м³/га). Продолжительность полива для поддержания в слое 0,5 м дифференцированного порога предполивной влажности почвы на уровне 70 % НВ составляет 10,7 часа (300 м³/га).

При втором способе полива в опытах использовалась конструкция системы комбинированного орошения. Мелкодисперсное орошение в комбинированной системе реализуется высокоэффективными мелкокапельными дождевателями последнего поколения, которые обеспечивают высокую равномерность полива. Система автоматизирована: включение и её функционирование выполняется по показаниям датчиков температуры воздуха [6].

В основу разработки системы комбинированного орошения положен модульный принцип, позволяющий при проектировании оросительных систем устанавливать размеры водоподводящей сети и производительность оборудования в зависимости от конкретных условий объекта: размеров орошаемых участков, особенности водного режима орошаемой культуры, уклонов местности и других природно-хозяйственных условий. Также, в зависимости от площади проектируемого объекта, в него включается необходимое количество модульных участков. Площадь применяемого нами типового модульного участка составляет 0,45 га. Длина поливных трубопроводов составляет 50 м, распределительных – 180 м. Продолжительность полива мелкодисперсным дождеванием (МДД) – 5 минут.

В опытах на картофеле автоматическая система мелкодисперсного дождевания запускалась при достижении температуры воздуха на высоте 2 м выше 25 °С, - регулятор поворачивает ручку шарового крана и увеличивает рабочее давление до 0,2 МПа, после чего в работу вступают аэрозольные установки с распылительными насадками. Диспергированные капли воды размером 200 - 300 мкм оседают на листьях и стеблях растений, при ее испарении снижается температура листа и повышается влажность воздуха. Изменяется микроклимат внутри посадок раннего картофеля, и создаются комфортные условия для произрастания растений (снижение температуры воздуха и увеличение его влажности в приземном слое атмосферы) [5, 20]. Стойки-распылители располагались в шахматном порядке с расстоянием 3,5 x 3,5 м, высота штанги распылительной насадки – 1 м. Такая конструкция обеспечивает равномерное распределение дождя по площади размещения опытных вариантов посадок картофеля. Расход воды за один полив – 0,5 м³/га. В 2015 году число включений МДД составило 462-486 раз, было израсходовано воды 231-243 м³/га за вегетацию. В 2016 году температура воздуха над посадками поднималась выше 25 °С 375-411 раз, расход воды за вегетацию составил 187,5-205,5 м³/га. В 2017 году включение происходило 252-279 раз, израсходовано 126-147 м³/га воды. Поливная вода учитывалась по показаниям счетчика-водомера и контролировалась в момент подачи воды на орошаемый участок.

Дозы внесения минеральных удобрений назначали по вариантам опыта в соответствии с программой проведения эксперимента. Количество вносимых удобрений (азот, фосфор, калий) рассчитывалось методом элементарного баланса, исходя из средней нормы потребления на 1 т урожая, с учетом эффективности их использования.

Исходя из расчета выноса на планируемую урожайность картофеля 40 т/га, потребление элементов из почвы будет составлять соответственно 200 кг азота (N), 100 кг фосфора (P) и 400 кг калия (K). По имеющимся в хозяйстве агрохимическим данным в среднем в расчетном слое почвы до 0,3 м содержится 24,9 мг/кг азота, 25,6 мг/кг фосфора и 314 мг/кг калия. Плотность сложения почвы составляет 1,21 т/м³, тогда вес почвы на гектар в слое 0,3 м составляет 3630 тонн. Таким образом, расчетное количество легкорастворимых форм азота, фосфора и калия в почве составит (кг/га):

$$(N) 24,9 \text{ мг/кг} * 3630 \text{ тонн/га} = 9038700 \text{ мг/га} = 90,4 \text{ кг/га}.$$

Согласно агрохимическим данным из этого количества легкогидролизуемого азота, содержащегося в почве, только 50-80 % (среднее 60 %) может быть использовано растением. Тогда:

$$90,4 \text{ кг/га} * 0,6 = 54,2 \text{ кг/га}.$$

Таким образом, дефицит составит:

200 кг/га – 54,2 кг/га = 145,8 кг/га – расчетная доза минерального азота, требуемая для получения заданной урожайности.

Учитывая ассимиляцию 10 % минерального азота в почву с поливной водой, получаем дозу азота в действующем веществе 160,1 кг/га.

Аналогичным образом рассчитывалось требуемое количество фосфора и калия.

По итогам балансовых расчетов были получены следующие дозы внесения минеральных удобрений, требуемые для получения планируемой урожайности клубней картофеля: 40 т/га – N₁₆₀ P₈₉ K₆₄; 50 т/га – N₂₁₅ P₁₁₇ K₁₇₄; 60 т/га – N₂₇₀ P₁₄₄ K₂₈₄.

Азотные удобрения вносили в форме аммиачной селитры (34 % азота), фосфорные – в форме двойного суперфосфата (45 % фосфора) и калийные – в форме хлористого белого калия (60 % калия). Физический вес удобрений под урожайность 40 т/га составил: аммиачная селитра – 465 кг/га, двойной суперфосфат – 198 кг/га, хлористый калий – 107 кг/га; под урожайность 50 т/га - аммиачная селитра – 625 кг/га, двойной суперфосфат – 260 кг/га, хлористый калий – 290 кг/га; под урожайность 60 т/га - аммиачная селитра – 785 кг/га, двойной суперфосфат – 320 кг/га, хлористый калий – 473 кг/га. Также при фертигации использовали монокалий фосфат и калийную селитру. Результаты расчета доз внесения минерального представлены в таблице 1.

Все применяемые удобрения хорошо растворимы в воде и вносились вместе с поливной водой в ранние сроки вегетации.

Таблица 1 – Дозы внесения минеральных удобрений в зависимости от планируемой урожайности, в действующем веществе

Table 1 – Doses of mineral fertilizers depending on the planned yield in the active substance

Планируемая урожайность / The planned yield t/ha	Аммиачная селитра / Ammonium nitrate	Хлористый калий / Potassium chloride	Двойной суперфосфат / Double superphosphate
40	160	89	64
50	215	117	174
60	270	144	284

При анализе информации, полученной в ходе выполнения исследований, использовались апробированные методики. Агрохимический анализ почвы опытного участка проводился ЗАО Фирмой «Август» Региональная группа «Агроанализ-Дон».

Фазы развития растений принимались согласно визуальному обследованию. За начало фазы развития принимали день, когда не менее 10 % растений вступало в фазу развития. За полное наступление фазы принимали день, когда 75 % растений вступили в фазу.

Для определения показателей фотосинтетической деятельности картофеля использовали общепринятую методику и результаты биометрических учетов по вариантам опыта. Площадь листьев определяли методом высечек. Фотосинтетический потенциал картофеля рассчитывали суммированием ежесуточных значений площади листьев.

Динамику прироста клубней определяли в течение вегетационного периода, начиная с фазы бутонизации растений. Для определения урожайности картофеля в качестве критериев, характеризующих эффективность производства, были отобраны результаты учета веса клубней в фазу биологической спелости. Урожайность картофеля учитывалась в период технической спелости клубней. Созревание клубней картофеля при капельном орошении в 2015 году отмечалось и фиксировалось 9 июля, а при комбинированном – 17 июля. В 2016 году на участке с капельным орошением – 12 июля, с комбинированным – 18 июля. По данным на 2017 год, при капельном поливе техническая зрелость клубней наступила 7 июля, а при комбинированном поливе – 14 июля.

Математическую обработку и статистический анализ экспериментальных данных проводили с использованием дисперсионного и регрессионного анализов на базе прикладных программ Microsoft Office.

Для рассмотренных способов полива могут применяться различные подходы к математическому моделированию, отражающие физические особенности процесса влагопереноса при орошении, учитывающие как внутрипочвенные функции, так и эвапотранспирацию [2, 3, 7-9, 11, 14-19]. Разработку динамической модели «ПОТАТО» выполняли в среде Excel с применением стандартных операторов и языка программирования Visual Basic for Applications.

Результаты и обсуждение. Накопленные за период с 2015 по 2017 годы экспериментальные данные многофакторного полевого опыта в совокупности позволили выполнить идентификацию биологических параметров модели и провести её верификацию.

В процессе формирования урожая существенное влияние на продуктивность оказывает водный статус растений, температурный режим почвы и растений и уровень внесения минерального питания. Наибольший сбор клубней раннего картофеля в опытах обеспечивался на участке с комбинированным орошением при варианте поддержания в слое 0,5 м дифференцированного порога предполивной влажности почвы 70 % НВ в период от посадки до фазы массового цветения картофеля; 80 % НВ – с начала фазы цветения до завершения вегетационного периода, и при внесении минерального питания под максимальную планируемую урожайность 60 т/га (действующего вещества: 270 кг/га азота, 144 кг/га фосфора и 284 кг/га калия) (таблица 2).

При комбинированном орошении и варианте полива ВЗ (поддержание 70 % НВ в период от посадки до фазы массового цветения картофеля, 80 % НВ – с начала фазы цветения до завершения вегетационного периода) на всех вариантах опытов была получена максимальная урожайность, в 2015 году она составила 54,8 т/га, в 2016 – 56,3 т/га, в 2017 – 54 т/га, что более, чем на 6 т/га выше, чем при капельном орошении. Оросительная норма при этом составила 2137, 2105,5 и 2747 м³/га соответственно.

Построенные регрессионные модели по результатам трех отличных по погодным условиям лет показывают слабые стороны их применения для прогнозирования влияния агротехнических факторов на продуктивность посадок картофеля. Полученные для 2015 и 2016 годов уравнения имеют схожий характер, в то время как для 2017 года влияние изучаемых факторов практически не меняется при переходе от одной фазы к другой и остаются постоянными для всех трех режимов орошения и двух способов полива.

Таблица 2 – Средняя урожайность картофеля в т/га, полученная по вариантам опытов за 2015-2017 г.

Table 2 –Average potato yield in tons per hectare, obtained from the experimental variants for 2015-2017

Вариант опыта / Experience option		Средняя урожайность, т/га / Average yield, t/ha		
		2015	2016	2017
Капельное орошение / The drip irrigation	B1C1	36,2	37,5	32,8
	B1C2	41,9	43,3	38,1
	B1C3	38,4	39,7	34,6
	B2C1	40,3	41,6	36,9
	B2C2	45,0	46,4	41,3
	B2C3	44,7	46,1	41,0
	B3C1	40,7	42,1	36,9
	B3C2	46,9	48	43,4
	B3C3	47,2	48,7	44,8
Комбинированное Орошение / The combined irrigation	B1C1	38,1	39,7	37,2
	B1C2	44,3	45,7	43,4
	B1C3	41,2	42,7	40,1
	B2C1	43,3	44,7	42,1
	B2C2	49,8	51	48,7
	B2C3	49,5	51	48,5
	B3C1	43,5	46,9	44,5
	B3C2	54,1	55,7	53,4
	B3C3	54,8	56,3	54,0
НCP ₀₅ DNC ₀₅	фактор А / factor A	1,35	1,32	1,3
	фактор В / factor B	1,65	1,61	1,6
	фактор С / factor C	1,65	1,61	1,6
	для частных средних / for partial averages	4,05	3,96	3,91

На рисунке 2 приведены результаты двухфакторного регрессионного анализа.

Результаты двухфакторного регрессионного анализа показали, что во вторую фазу развития картофеля относительная урожайность (в долях от максимума) при повышенной предполивной влажности 0,8 НВ и внесении высоких доз удобрений ниже как при капельном (0,3-0,5), так и при комбинированном орошении (0,4-0,5), чем при более низкой предполивной влажности почвы 0,6 НВ – (0,5-0,6) при капельном орошении, (0,5-0,7) при комбинированном орошении соответственно. Переувлажнение в первые фазы развития картофеля оказывает негативное влияние на продуктивность культуры и, возможно, тормозит развитие корневой системы, что приводит к потере урожая. Избыток влаги вызывает недостаток кислорода в почве, что приводит к загниванию маточного клубня.

В третью фазу развития картофеля урожайность при повышенном факторе влажности 0,75-0,8 НВ и внесении больших доз минеральных удобрений была ниже (0,35-0,45) при капельном орошении, так и при комбинированном орошении (0,4-0,5), чем в вариантах с более низкой предполивной влажностью почвы (0,6-0,7НВ), относительная урожайность в которых находится в диапазоне (0,45-0,55) при капельном орошении и (0,5-0,7) при комбинированном орошении.

В четвертую фазу для капельного и комбинированного орошения высокая влажность 0,75-0,8 НВ и высокий уровень внесения удобрений положительно отражаются на урожайности (0,45-0,55 при капельном орошении, 0,5-0,6 при комбинированном орошении).

КАПЕЛЬНОЕ ОРОШЕНИЕ
DRIP IRRIGATION

a5	a4	a3	a2	a1	a0
-0.79	-0.636	-0.809	1.6229	1.2544	-0.464

КОМБИНИРОВАННОЕ ОРОШЕНИЕ
COMBINED IRRIGATION

a5	a4	a3	a2	a1	a0
-1.032	-0.783	-0.769	2.0593	1.0918	-0.419

a5	a4	a3	a2	a1	a0
-0.784	-0.62	-0.297	1.6212	0.6239	-0.275

a5	a4	a3	a2	a1	a0
-1.023	-0.775	-0.393	2.0747	0.6424	-0.289

a5	a4	a3	a2	a1	a0
0.6782	-0.585	0.044	0.449	0	0.0182

a5	a4	a3	a2	a1	a0
1.1108	-0.755	0.2138	0.4088	-0.323	0.1037

1* - урожайность в долях от единицы
1* - yield as a fraction of a unit

2* - минеральное питание в долях от единицы
2* - mineral nutrition as a fraction of a unit

3* - влажность почвы в долях от НВ
3* - soil moisture as a fraction of a lowest moisture capacity

Рисунок 2 – Графики и коэффициенты уравнений регрессии по влиянию факторов В и С на урожайность картофеля за 2015-2017 гг.

Picture 2 – Graphs and coefficients of regression equations for the influence of Vis factors on potato yield for 2015-2017

Повышение влажности почвы в фазу «цветение – окончание роста ботвы» ликвидирует дефицит влаги, испытываемый растениями в этот напряженный по метеорологическим условиям период, и положительно влияет на формирование урожая. Также из статистического анализа по представленным данным было выявлено, что при комбинированном орошении урожайность выше (0,7), чем при капельном (0,6).

Опираясь на основные принципы построения моделей формирования урожая, была разработана динамическая модель «РОТАТО», имитирующая развитие посева от фазы «посадка» до фазы «техническая спелость клубней». Модель позволяет анализировать развитие посева и управлять формированием урожая в ситуациях, когда производственный процесс может лимитироваться почвенным запасом влаги и питательных веществ, а также метеорологическими условиями. При расчетах урожайности в модели предусмотрена возможность введения поправок путем отдельного учета продуктивности в различные фазы вегетации.

Для статистической оценки результатов моделирования производился сравнительный анализ расчетной выборки урожайности, полученной в численных экспериментах с натурными данными полевого опыта, выполненного в четырехкратной повторности в течение всех трех вегетационных периодов 2015 - 2017 гг.

При оценке качества работы математической модели помимо характеристик её адекватности, следует учитывать точность произведенных расчетов, определяемую по величине погрешности. Расхождение между фактически полученными натурными данными и прогнозируемыми моделью является величиной ошибки. Использование такого анализа возможно только в случае, когда прогнозируемый отрезок времени (период упреждения) уже закончился и имеются фактические значения на этот момент, или когда выполняется расчет по ретроспективным данным (ретропрогноз).

Оценка адекватности функционирования имитационной модели «РОТАТО» выполняется по нескольким критериям: с помощью дисперсионного метода определяют связи между факторными и результативными показателями, коэффициент корреляции характеризует тесноту связи между расчетными и фактическими рядами, достоверность различия рядов расчетных и фактических устанавливают по t-критерий Стьюдента. Для оценки точности прогнозирования использована взвешенная абсолютная процентная ошибка (Δ %). Результаты оценки адекватности и точности представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Статистические показатели точности и адекватности модели

Table 3 – Statistical indicators of model accuracy and adequacy

Год полевого опыта / Year of field experience	2015	2016	2017
Название параметра / Parameter name	Дисперсия по факторам, % / Variance by factors, %		
Фактора А (факт / расчет) / Factor A (fact / calculation)	0,25	0,09	4,48
Фактор Б (агротех: поливы, удобр.) / Factor B	77,21	50,14	86,14
Совместное влияние факторов / The combined effect of the factors	7,04	10,58	7,11
Случайные факторы / Random factor	15,50	39,19	2,27
	Корреляционный анализ / Correlation analysis		
Коэффициент корреляции R / Correlation coefficient R	0,7	0,6	0,8
Коэффициент детерминации R ² / Coefficient of determination R ²	0,53	0,4	0,76
Критерий Стьюдента t / Student's criterion t (Различие дост.: p = 0,05; t > 2,04)	0.1	1.8	2.6
Точность модели (100-Δ), % / The accuracy of the model	95	94	93

На основе проведенной статистической обработки можно сделать вывод об адекватном функционировании модели и ее пригодности для прогноза и управления.

Выводы. Результаты многофакторного полевого опыта показали, что при одинаковых режимах орошения почвы применение мелкодисперсного дождевания обеспечивает повышение урожайности раннеспелого картофеля на 10 % по сравнению с капельным способом полива. Повышенная доза внесения минеральных удобрений увеличивает продолжительность вегетационного периода на 1-2 суток. В фазу развития раннего картофеля «всходы – начало бутонизации» при капельном орошении необходимо поддерживать порог предпосевной влажности в слое 0,5 м на уровне 70 % от НВ. При комбинированном орошении также целесообразно поддерживать предпосевную влажность на уровне 70 % от НВ. В фазу «начало бутонизации – цветение» при капельном и комбинированном орошении необходимо поддерживать порог предпосевной влажности в слое 0,5 м на уровне 70 % от НВ. В фазу «цветение – окончание роста» при капельном орошении необходимо поддерживать порог предпосевной влажности на уровне 80 % от НВ, а при комбинированном способе полива рекомендовано поддержание порога предпосевной влажности на уровне 80 % НВ. При этом не всегда максимальная доза внесения минеральных удобрений положительно воздействует на урожайность посева, а в некоторых случаях даже снижает продуктивность агроценоза. Полученные натурные данные могут служить исходным информационным материалом для целей математического моделирования продукционного процесса, а сходимость расчетных и фактических параметров формирования урожая свидетельствует об адекватности модели «РОТАТО».

Библиографический список

1. Бубер А. А., Бородычев В. В. Разработка динамической модели формирования урожая «РОТАТО» // Известия НВ АУК. 2018. № 5 (50). С. 170-180. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-47.
2. Воротынцев А. В. Исследование моделей переноса тепла и влаги в системе почва-растение // Вестник Технологического университета Таджикистана. 2016. № 2 (27). С. 7-16.
3. Добрачев Ю. П., Соколов А. Л. Модели роста и развития растений и задача повышения урожайности // Природообустройство. 2016. № 3. С. 90-96.
4. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Книга по Требованию, 2012. 352 с.
5. Комбинированное орошение сельскохозяйственных культур / А. С. Овчинников, В. В. Бородычев, М. Ю. Храбров, В. М. Гуренко, А. В. Майер // Известия НВ АУК. 2015. № 2 (38). С. 6-13.
6. Майер А. В., Захаров Ю. И., Криволуцкая Н. В. Универсальная многофункциональная система орошения для комбинированных способов полива // Известия НВ АУК. 2015. № 1 (37). С. 206 - 210.
7. Мелихова Е. В. Математическое моделирование процессов влагопереноса при капельном и внутрипочвенном орошении // Известия НВ АУК. 2016. № 1 (41). С. 228-234.
8. Моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р. А. Полужков, Э. И. Смоляр, В. В. Терлеев, А. Г. Топаж. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2006. 396 с.
9. Мониторинг эвапотранспирации на сельскохозяйственном поле, определение норм и сроков полива автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом / А. Е. Ефимов, Ю. Р. Ситдикова, А. В. Доброхотов, Л. В. Козырева // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 1. С. 100-105.
10. Обоснование водного режима почвы при капельном орошении семенных посадок картофеля в Нижнем Поволжье / Н. Н. Дубенок, Д. А. Болотин, С. Д. Фомин, А. Г. Болотин // Известия НВ АУК. 2018. № 3 (51). С. 18-26.
11. Ольгаренко В. И., Ольгаренко И. В., Ольгаренко В. Иг. К вопросу о модели определения эвапотранспирации с учётом изменчивости гидрометеорологических факторов // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2017. № 4. С. 9-14.
12. Отзывчивость различных сортов картофеля на водный режим светло-каштановых почв Нижнего Поволжья / Н. Н. Дубенок, Д. А. Болотин, С. Д. Фомин, А. Г. Болотин // Известия НВ АУК. 2018. № 4 (52). С. 22-29.

13. Оценка количественных характеристик клубнеобразования дикого картофеля на основе анализа изображения с использованием компьютерного приложения Seedcounter / К. А. Иванова, Е. Г. Комышев, М. А. Генаев, А. А. Егорова, К. А. Колошина, Н. А. Чалая, Д. А. Афонников, А. В. Кочетов, Е. В. Рогозина, С. В. Герасимова // Вавиловский журнал генетики и селекции, 2019. Т. 23. № 5. С. 519 - 526.

14. Полуэктов Р. А. Математические модели в теории биологических популяций и сообществ (истоки становления и первые результаты) // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. № 1. С. 4-8.

15. Рыжова Т. А., Мелихова Е. В., Рогачев А. Ф. Компьютерное моделирование и определение основной гидрофизической характеристики на примере светло - каштановых почв Нижнего Поволжья // Известия НВ АУК. 2019. № 3 (55). С. 397-406. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-03-49.

16. Тооминг Х. Г. Математическое моделирование продуктивности посевов сельскохозяйственных культур // Вестник с.-х. науки. 1991. № 11. С. 45-53.

17. Comparative model analysis of various measures intended to crop production sustainability by «APEX-AGROTOOL» simulation system / A. Topaj, V. Badenko, V. Terleev, S. Medvedev // Crop Modelling for Agriculture and Food Security under Global Change, 2016. P. 408-409.

18. Melikhova E. V., Rogachev A. F. Computer simulation and optimization of parameters of configuration of the contour of moistening under drip irrigation of agricultures // Studies in Computational Intelligence. 2019. V. 826. P. 1193-1201.

19. Melikhova E. V., Rogachev A. F., Skiter N. N. Information system and database for simulation of irrigated crop growing Studies in Computational Intelligence. 2019. V. 826. P. 1185-1191.

20. Optimum control model of soil water regime under irrigation / A. S. Ovchinnikov, V. S. Bocharnikov, S. D. Fomin, O. V. Bocharnikova, E. S. Vorontsova, V. V. Borodychev, M. N. Lytov // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2018. V. 24. № 5. P. 909-913.

Conclusions. The results of a multi-factor field experiment have shown that under the same conditions of soil irrigation, the use of fine sprinkling provides an increase in the yield of early-maturing potatoes by 10% compared to the conventional method of irrigation. An increased dose of mineral fertilizers increases the duration of the growing season by 1-2 days. In the phase of development of early potatoes "sprouts-the beginning of budding" with drip irrigation, it is necessary to maintain the threshold of pre-sowing humidity in the layer of 0.5 m at the level of 70 % of HB. In case of combined irrigation, it is also advisable to maintain the pre-sowing moisture at the level of 70 % of the NW. In the "beginning of budding – flowering" phase with drip and combined irrigation, it is necessary to maintain the threshold of preseeding humidity in the layer of 0.5 m at the level of 70 % of the HB. In the phase of "flowering – the end of growth" with drip irrigation it is necessary to maintain the threshold seedbed moisture at 80 % HB, and the combined method of irrigation is recommended to maintain a threshold seedbed moisture at 80 % HB. At the same time, the maximum dose of mineral fertilizers does not always have a positive effect on the crop yield, and in some cases even reduces the productivity of agrocenosis. The obtained field data can serve as a source of information for the purposes of mathematical modeling of the production process, and the convergence of the calculated and actual parameters of crop formation indicates the adequacy of the "POTATO" model.

References

1. Buber A. A., Borodychev V. V. Razrabotka dinamicheskoy modeli formirovaniya urozhaya "POTATO" // Izvestiya NV AUK. 2018. № 5 (50). P. 170-180. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-47.
2. Vorotyncey A. V. Issledovanie modelej perenosa tepla i vlagi v sisteme pochva-rastenie // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta Tadzhiqistana. 2016. № 2 (27). P. 7-16.
3. Dobrachev Yu. P., Sokolov A. L. Modeli rosta i razvitiya rastenij i zadacha povysheniya urozhajnosti // Prirodoobustrojstvo. 2016. № 3. P. 90-96.
4. Dospehov B. A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovanij). M.: Kniga po Trebovaniyu, 2012. 352 p.

5. Kombinirovannoe oroshenie sel'skohozyajstvennykh kul'tur / A. S. Ovchinnikov, V. V. Borodychev, M. Yu. Hrabrov, V. M. Gurenko, A. V. Majer // *Izvesti NV AUK*. 2015. № 2 (38). P. 6-13.
6. Majer A. V., Zaharov Yu. I., Krivoluckaya N. V. Universal'naya mnogofunkcional'naya sistema orosheniya dlya kombinirovannykh sposobov poliva // *Izvestiya NV AUK*. 2015. № 1 (37). P. 206 - 210.
7. Melihova E. V. Matematicheskoe modelirovanie processov vlagoperenosa pri kapel'nom i vnutripochvennom oroshenii // *Izvestiya NV AUK*. 2016. № 1 (41). P. 228-234.
8. Modelirovanie produkcionnogo processa sel'skohozyajstvennykh kul'tur / R. A. Polujektov, Je. I. Smolyar, V. V. Terleev, A. G. Topazh. SPb.: Izd-vo S. -- Peterb. un-ta, 2006. 396 p.
9. Monitoring jevapotranspiracii na sel'skohozyajstvennom pole, opredelenie norm i srokov poliva avtomatizirovannym mobil'nykh polevykh agrometeorologicheskimi kompleksami / A. E. Efimov, Yu. R. Sitdikova, A. V. Dobrohotov, L. V. Kozyreva // *Vodnye resursy*. 2018. T. 45. № 1. P. 100-105.
10. Obosnovanie vodnogo rezhima pochvy pri kapel'nom oroshenii semennykh posadok kartofelya v Nizhnem Povolzh'e / N. N. Dubenok, D. A. Bolotin, S. D. Fomin, A. G. Bolotin // *Izvestiya NV AUK*. 2018. № 3 (51). P. 18-26.
11. Ol'garenko V. I., Ol'garenko I. V., Ol'garenko V. Ig. K voprosu o modeli opredeleniya jvapotranspiracii s uchjotom izmenchivosti gidrometeorologicheskikh faktorov // *Modeli i tehnologii prirodoobustrojstva (regional'nyj aspekt)*. 2017. № 4. P. 9-14.
12. Otzyvchivost' razlichnykh sortov kartofelya na vodnyj rezhim svetlo-kashtanovykh pochv Nizhnego Povolzh'ya / N. N. Dubenok, D. A. Bolotin, S. D. Fomin, A. G. Bolotin // *Izvestiya NV AUK*. 2018. № 4 (52). P. 22-29.
13. Ocenka kolichestvennykh harakteristik klubneobrazovaniya dikogo kartofelya na osnove analiza izobrazheniya s ispol'zovaniem komp'yuternogo prilozheniya Seedcounter / K. A. Ivanova, E. G. Komyshev, M. A. Genaev, A. A. Egorova, K. A. Koloshina, N. A. Chalaya, D. A. Afonnikov, A. V. Kochetov, E. V. Rogozina, S. V. Gerasimova // *Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii*, 2019. T. 23. № 5. P. 519 - 526.
14. Polujektov R. A. Matematicheskie modeli v teorii biologicheskikh populyacij i soobschestv (istoki stanovleniya i pervye rezul'taty) // *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*. 2012. Vol. 7. № 1 P. 4-8.
15. Ryzhova T. A., Melihova E. V., Rogachev A. F. Komp'yuternoe modelirovanie i opredelenie osnovnoj gidrofizicheskoy harakteristiki na primere svetlo - kashtanovykh pochv Nizhnego Povolzh'ya // *Izvestiya NV AUK*. 2019. № 3 (55). P. 397-406. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-03-49.
16. Tooming H. G. Matematicheskoe modelirovanie produktivnosti posevov sel'skohozyajstvennykh kul'tur // *Vestnik s. -- h. nauki*. 1991. № 11. P. 45-53.
17. Comparative model analysis of various measures intended to crop production sustainability by «APEX-AGROTOOL» simulation system / A. Topaj, V. Badenko, V. Terleev, S. Medvedev // *Crop Modelling for Agriculture and Food Security under Global Change*, 2016. P. 408-409.
18. Melikhova E. V., Rogachev A. F. Computer simulation and optimization of parameters of configuration of the contour of moistening under drip irrigation of agricultures // *Studies in Computational Intelligence*. 2019. V. 826. P. 1193-1201.
19. Melikhova E. V., Rogachev A. F., Skiter N. N. Information system and database for simulation of irrigated crop growing Studies in Computational Intelligence. 2019. V. 826. P. 1185-1191.
20. Optimum control model of soil water regime under irrigation / A. S. Ovchinnikov, V. S. Bocharnikov, S. D. Fomin, O. V. Bocharnikova, E. S. Vorontsova, V. V. Borodychev, M. N. Lytov // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2018. V. 24. № 5. P. 909-913.

Authors Information

Borodychev Victor Vladimirovich, director of the Volgograd branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakova "(RF, 400002, Volgograd, 9 Timiryazev Street). E-mail: vkovniigim@yandex.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0279-8090>.

Dobrachev Yuri Pavlovich, chief researcher at the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova "(Russian Federation, 125550, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya St., 44 Building 2). E-mail: dobrachev@yandex.ru ORCID: orcid.org/0000-0002-2186-3652

Buber Alina Aleksandrovna, researcher at the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrotechnics and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova "(Russian Federation, 125550, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya St., 44 Building 2). E-mail: buberalina@gmail.com ORCID: orcid.org/0000-0003-0962-2722
Menshikova Snezhana Aleksandrovna, Senior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Hydrotechnics and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova "(Russian Federation, 125550, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya St., 44 Building 2).). E-mail: men.s.a@mail.ru ORCID: orcid.org/0000-0001-6216-6805

Информация об авторах

Бородычев Виктор Владимирович, директор Волгоградского филиала «Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова» (РФ, 400002, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, 9). E-mail: vkovniigim@yandex.ru

Добрачев Юрий Павлович, главный научный сотрудник «Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова» (РФ, 125550, г. Москва, ул. Большая Академическая, д. 44 строение 2). E-mail: dobrachev@yandex.ru
ORCID: orcid.org/0000-0002-2186-3652

Бубер Алина Александровна, научный сотрудник «Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова» (РФ, 125550, г. Москва, ул. Большая Академическая, д. 44 строение 2). E-mail: buberalina@gmail.com
ORCID: orcid.org/0000-0003-0962-2722

Меньшикова Снежана Александровна, старший научный сотрудник «Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова» (РФ, 125550, г. Москва, ул. Большая Академическая, д. 44 строение 2). E-mail: men.s.a@mail.ru
ORCID: orcid.org/0000-0001-6216-6805