

М. Н. Лытов

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (Волгоградский филиал), Волгоград, Российская Федерация; Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Российская Федерация

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ
ОРОШЕНИЯ С УЧЕТОМ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ
СОДЕРЖАНИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ**

Цель исследований – разработка алгоритма определения фундаментальных операторов управления орошением с учетом вариабельности почвенных влагозапасов. *Материалы и методы.* В качестве фундаментальных операторов рассматриваются базисные задачи управления орошением, такие как потребность в проведении полива и технологические параметры проведения этого полива. Основные методологические подходы исследований: концепция единой алгоритмической конструкции определения основных операторов орошения, решение задачи об учете вариабельности содержания почвенной влаги в двух уровнях – на площади и по профилю почвы, отказ от использования средней влажности активного слоя почвы как основного критерия потребности в проведении полива. *Результаты.* Предложен алгоритм, который решает эти задачи на основе количественных оценок средней влажности, распределения влаги по профилю почвы и вариабельности влагозапасов по площади орошаемого участка. Алгоритм представлен тремя последовательно организованными вычислительными блоками, каждый из которых решает самостоятельную задачу в соответствии с приведенной выше последовательностью. Раскрыты вычислительные процедуры для решения поставленных задач в каждом из рассматриваемых алгоритмически организованных блоков. Задача на основе средних оценок влажности активного слоя почвы имеет классическое решение. Задача на основе данных о послойном распределении влаги в почвенном профиле решается путем последовательного проведения оценок дисперсии послойных данных, а также мощности слоя почвы с влажностью ниже порогового уровня. *Выводы.* Задача об использовании режима дифференцированного распределения осадков решается на основе определения вариабельности средних оценок влажности почвы по площади орошаемого участка. Результат решения алгоритма – определение потребности в поливе на расчетную дату, а также его основных технологических параметров, включая поливную норму и необходимость дифференцированного распределения осадков по площади орошаемого участка.

Ключевые слова: алгоритм; операторы орошения; вариабельность; влажность почвы; точное орошение.

M. N. Lytov

All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (Volgograd branch), Volgograd, Russian Federation; Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russian Federation

**DEFINITION OF FUNDAMENTAL IRRIGATION OPERATORS,
TAKING INTO ACCOUNT SOIL MOISTURE CONTENT
VARIABILITY**



The purpose of the research is the development of an algorithm for determining the fundamental operators of irrigation control taking into account the variability of soil moisture reserves. *Materials and Methods.* The basic tasks of irrigation control such as the need for irrigation and the technological parameters of this irrigation are considered as the fundamental operators. The main research methodological approaches are: the concept of a unified algorithmic construction for determining the main irrigation operators, solving the problem of taking into account the variability of soil moisture content at two levels – on the area and on the soil profile, refusal to use the average humidity of the active soil layer as the main requirement criterion for irrigation. *Results.* The algorithm solving these problems on the basis of quantitative estimates of average humidity, moisture distribution over the soil profile and variability of moisture reserves over the irrigated area is proposed. The algorithm is presented by three sequentially organized calculation blocks, each of which solves an independent task in accordance with the above mentioned sequence. Computing procedures for solving the tasks in each of the considered algorithmically organized blocks are disclosed. The task based on average estimates of the active soil layer moisture content has a classical solution. The problem based on data on the layer-by-layer moisture distribution in soil profile is solved by sequentially evaluating the layer-by-layer data dispersion as well as the soil layer thickness with moisture below the threshold level. *Conclusions:* the problem of using the differential precipitation distribution mode is solved on the basis of determining the variability of average estimates of soil moisture by area of the irrigated plot. The result of the algorithm solution is the determination of requirement for irrigation at the estimated date, as well as its main technological parameters, including the irrigation rate and the need for a differentiated precipitation distribution over the irrigated area.

Key words: algorithm; irrigation operators; variability; soil moisture; precision irrigation.

Введение. Развитие технологий орошения на современном уровне характеризуется переходом от технологии контролируемого к технологии точного полива [1–3]. Создание таких технологий в России и в мире по праву считается одной из приоритетных задач современной мелиоративной науки. Сегодня в этом направлении уже получены определенные результаты, предложены принципиальные решения, позволяющие рассматривать точное орошение не как концепт неопределенного будущего, но как современный уровень развития мелиоративных технологий [4–7]. Концепт точного полива в контексте настоящего исследования рассматривается наиболее широко, с ориентацией на учет не только пространственной variability почвенных влагозапасов, но и всех факторов, определяющих параметры технологического процесса. Такой подход характерен для мирового научного сообщества и оправдан с позиций логики технико-технологического развития мелиорации [8–12].

Основные задачи орошения в засушливых природно-климатических зонах: удовлетворение потребностей растений в воде, активизация физиологических показателей и развития агрофитоценозов, а также создание благоприятных мелиоративных режимов, ориентированных на сохранение и расширенное воспроизводство плодородия почвы. Но в плане реализации самой технологии важны ответы на конкретные вопросы: необходимо ли проведение полива? Сейчас? В ближайшей перспективе? Каковы технологические параметры? С позиций технологии точного орошения эти ответы должны быть максимально обоснованы, учитывать все объективно возможные ситуации. Решение этих задач с использованием исключительно средних оценок запасов влаги в активном слое почвы в рамках концепта точного орошения уже невозможно. Цель исследований – разработать алгоритм определения фундаментальных операторов управления орошением с учетом вариабельности содержания почвенной влаги по профилю и площади орошаемого участка.

Материалы и методы. Проблематика управления орошением сегодня характеризуется постановкой комплекса актуальных задач, к числу которых в первую очередь следует отнести задачу повышения обоснованности принятия управляющих решений и учета внутривольной вариабельности почвенных влагозапасов. Прямое отношение к заявленной проблеме имеют и следующие два активно развивающихся в настоящее время научных направления. Первый, классический, подход предполагает определение фундаментальных операторов управления орошением на основе динамического анализа водного баланса почвы с учетом биологических требований растений в орошаемых агрофитоценозах. Ко второму, получившему сегодня самое пристальное внимание со стороны научного сообщества, отнесем задачи, решаемые сегодня в рамках теории точного орошения. Сегодня эти два направления развиваются в определенной мере самостоятельно: первое – в плане возможностей точного решения задачи о своевременном (оптимальном, объективно обоснованном) поливе; второе – в плане

решения задачи о дифференцированном распределении осадков по площади орошаемого участка. В основу рабочей гипотезы настоящего исследования положено предположение о необходимости решения этих задач на основе единого концепта, необходимости создания единой алгоритмической конструкции для определения основных операторов орошения с учетом variability почвенных влагозапасов. Другим принципиальным методологическим подходом настоящего исследования является не только площадной учет variability почвенных влагозапасов в пределах орошаемого участка, но и учет variability содержания влаги во всем объеме увлажняемого (активного) слоя почвы. А это предполагает решение задачи уже на двух уровнях: на площади и по профилю почвы. Еще одним методологическим принципом исследований стал отказ от использования средней для активного слоя величины запасов почвенной влаги как основного (абсолютного) критерия потребности в проведении полива.

Современная теория и практика точных систем земледелия [2, 4–6, 13], теория автоматического управления технологическими процессами [14], в т. ч. применительно к задачам мелиоративной практики [15], теория создания и структуры алгоритмов [16] составляют основу методологии настоящего исследования.

Результаты и обсуждение. Базисные задачи управления орошением – определение потребности (экономически и экологически оправданной, технически реализуемой необходимости) в проведении очередного вегетационного полива и установление параметров этого полива. В классическом понимании теории управления орошением к одним из основных таких параметров относят поливную норму. Если предположить решение указанных задач в динамике, т. е. относительно настоящего, будущего и прошлого объекта управления, ответы на поставленные вопросы и будут составлять совокупность фундаментальных операторов управления орошением. Блок-схема предлагаемого алгоритма определения фундаментальных операторов управления орошением приведена на рисунке 1.

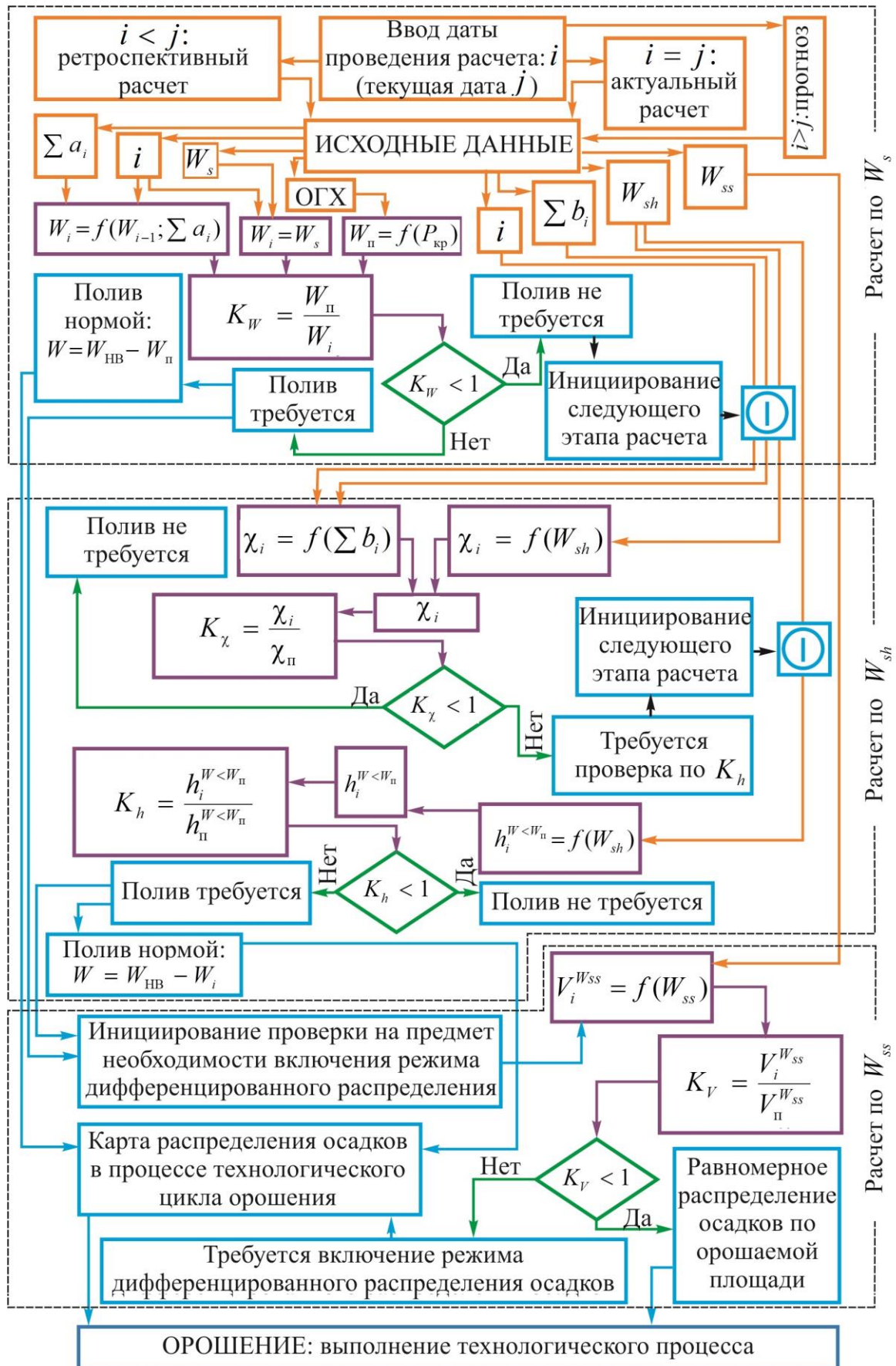


Рисунок 1 – Алгоритм определения фундаментальных операторов орошения с учетом variability содержания почвенной влаги

Укрупненная структура предложенного алгоритма определения фундаментальных операторов орошения представляет собой совокупность трех крупных внутри достаточно сложно организованных моделей. Как видно из представленной на рисунке 1 схемы, первая из этих моделей предполагает решение задачи на основании критерия W_s – блок «Расчет по W_s », вторая для решения этой же задачи использует критерий W_{sh} , а в третьей расчет ведется уже по критерию W_{ss} . Между собой эти блоки организованы последовательно, т. е. результаты решения задачи по одному из предыдущих критериев являются поводом для инициирования цикла вычислений, реализуемых относительно следующего критерия. Это принципиально значимое в плане алгоритмической логики решение обосновано следующим.

Во-первых, следует раскрыть смысл приведенных символьных обозначений, рассматриваемых в указанных алгоритмических блоках в качестве критериев расчета. Здесь параметр W_s – среднее для расчетного слоя значение содержания почвенной влаги. В представленном на рисунке 1 алгоритме параметр W_s позиционируется как сенсорное (т. е. измеряемое, физически контролируемое) значение содержания почвенной влаги.

Ему есть альтернатива в качестве параметра W_i , определяемого расчетным путем. Однако как для критерия первого из укрупненных блоков предлагаемого алгоритма важно, что это именно среднее для расчетного слоя значение содержания почвенной влаги. То есть первый блок расчетов предполагает определение потребности в проведении очередного вегетационного полива на основе оценки средних запасов влаги в активном (используемом растениями культурного фитоценоза) слое. Это, собственно, классическая задача, успешные варианты решения которой предлагались и неоднократно были реализованы учеными [17–19]. Однако для решения задач точного орошения такой подход видится не совсем оправданным. В частности, неучтенной остается вариабельность почвенной влаги

в объеме активного слоя почвы. Принципиально важно, что задача должна быть решена именно для объема почвы, т. е. в трехмерном пространстве. В предлагаемом алгоритме эта задача разбивается на две, первая из которых оценивает и учитывает неоднородности содержания влаги в вертикальном профиле почвы, а вторая учитывает вариабельность содержания почвенной влаги по площади орошаемого участка. Символьный параметр W_{sh} как раз и характеризует распределение содержания влаги в почвенном профиле, а параметр W_{ss} определяет распределение содержания почвенной влаги по площади орошаемого участка.

Таким образом, алгоритм предполагает последовательное решение задачи о необходимости проведения очередного вегетационного полива по среднему значению содержания влаги в активном слое почвы. Затем ведется проверка необходимости проведения полива для компенсации агрономически значимых неоднородностей содержания влаги в почвенном профиле. И лишь после принятия решений по этим двум задачам выполняется проверка необходимости дифференцированного распределения осадков по площади орошаемого участка при проведении полива.

Общим компонентом для всех трех логически сгруппированных вычислительных блоков алгоритма являются исходные данные. В рамках современных информационных технологий этот компонент представляется самостоятельным, сложно организованным продуктом, сочетающим возможности баз данных, системы ввода актуальной информации, имеющей значение для проведения расчетов, и системно организованного поставщика мониторинговых данных с реализацией функций в режиме реального времени. Комплекс предполагает организацию исходной информации в формате баз знаний, в которых наряду с числовыми или категориальными параметрами, используемыми для проведения вычислений, хранятся сведения о закономерностях и связях, моделях, имеющих отношение к решению поставленных в рамках настоящего алгоритма задач. Как постав-

щик актуальных мониторинговых данных комплекс предполагает взаимодействие с системой мониторинга, реализующей функции в режиме реального времени. По сути, эта часть комплекса «Исходные данные» может являться и составной частью системы мониторинга, завершающей обработку, а также реализующей функции хранения и селективного распространения мониторинговых данных.

Система ввода информации предполагает реализацию функции ввода данных, используемых в качестве параметров формирования задания для предстоящего цикла расчетов. Ввод данных может быть ручным и осуществляться оператором орошения. Но эта функция может быть и расширена за счет автоматического ввода данных системой, отвечающей за формирование задания для очередного цикла расчетов. Автоматизация ввода данных для начала нового цикла расчетов может осуществляться на регулярной основе, например с использованием реле времени, при получении определенных сигналов (или их совокупности) от системы мониторинга в режиме реального времени, а также на основе решений искусственного интеллекта, если система реализована с использованием подобных технологий.

Одной из важнейших функций системы ввода данных для начала нового цикла расчетов является задание даты проведения расчета. Это может быть текущая дата, что означает актуальный характер проводимых расчетов. Дата проведения расчетов может быть также сдвинута вправо или влево по шкале времени, что означает соответственно проведение прогнозных или ретроспективных расчетов. Этот момент имеет существенное значение в плане выбора подходов и расчетных моделей для проведения соответствующих вычислительных операций.

Дата проведения расчетов является одним из основных исходных параметров, используемых при проведении вычислений во всех трех логически сгруппированных вычислительных блоках. Другим исходным параметром, используемым в самом первом вычислительном блоке предло-

женного алгоритма, является комплекс $\sum a_i$. Комплекс $\sum a_i$ представлен оценками совокупности факторов, на которые опирается модель определения средней оценки по содержанию влаги в активном (принятом за расчетный) слое почвы. В приведенном алгоритме эта задача решается функцией:

$$W_i = f(W_{i-1}; \sum a_i),$$

где W_i – расчетная средняя оценка содержания почвенной влаги в активном (расчетном) слое, мм;

W_{i-1} – расчетная или сенсорная оценка содержания почвенной влаги на дату проведения расчетов $i - 1$, мм.

Следует понимать, что сущность приведенной зависимости в практическом приложении сложнее приведенной записи. Классическое решение задачи о средней оценке содержания почвенной влаги в активном слое базируется на использовании методики упрощенного водного баланса. Исследованиями [17] обосновано, что для той преимущественной совокупности гидрогеологических условий, в которой формируются основные типы почв Нижнего Поволжья, в практических целях достаточно учитывать исходные запасы почвенной влаги на начало расчетного периода, условия поступления влаги с атмосферными осадками, а также с проведенными за расчетный период поливами:

$$W_i = W_{i-1} + P_{\text{атм}} + \sum m - ET_{cr} \cdot (1 - k_g),$$

где $P_{\text{атм}}$ – атмосферные осадки, мм;

$\sum m$ – суммарный объем влаги, поступившей с поливами, за расчетный период, мм;

ET_{cr} – модельная оценка суммарного водопотребления сельскохозяйственной культуры за расчетный период, мм;

k_g – коэффициент, учитывающий долю капиллярного подпитывания в зону активного слоя почвы со стороны грунтовых вод.

В случае если за начало расчетного периода принимается дата прове-

дения последнего реализованного вегетационного полива, компонент $\sum m$ в уравнении не учитывается. Как правило, такой подход и используется при проведении расчетов на актуальную (текущую) дату. При этом, предполагая соответствие достигнутых в процессе орошения результатов поставленным целям, компоненту W_{i-1} в уравнении для расчетного слоя можно принять равной наименьшей влагоемкости почвы.

Для установления прогнозной даты проведения очередного вегетационного полива или планирования режима орошения на кратко- и среднесрочную перспективу балансовое уравнение трансформируется в следующую зависимость [12, 17]:

$$T_{\text{пр}} = \frac{W_a + P_{\text{атм}} + \sum_{j-1} m}{ET_{\text{cr}}^{\text{сут}} \cdot (1 - k_g)},$$

где $T_{\text{пр}}$ – прогнозируемая продолжительность периода до проведения j -го полива, сут;

W_a – активные почвенные влагозапасы на начало расчетного периода, определенные как разница между текущими почвенными влагозапасами и почвенными влагозапасами при влажности устойчивого завядания (не используемый культурой остаток), мм;

j – номер очередного вегетационного полива в прогнозируемом ряду;

m – поливная норма, мм;

$ET_{\text{cr}}^{\text{сут}}$ – среднесуточное водопотребление ценоза за расчетный период, мм.

Введение параметра j позволяет использовать модель как для прогнозирования даты проведения очередного вегетационного полива, так и при составлении прогнозов режима орошения культуры на кратко-, средне- и долгосрочный период [20]. Использование приведенной зависимости вызывает определенные трудности в плане корректного определения компоненты $ET_{\text{cr}}^{\text{сут}}$ – среднесуточного водопотребления ценоза за расчетный пери-

од. Ведь в данном случае категории «расчетный период» (T_p) и «прогнозируемая продолжительность периода» ($T_{пр}$), по сути, идентичны. А среднесуточное водопотребление прогнозируется по зависимости $ET_{cr}^{сут} = \frac{ET_{cr}}{T_p}$, где суммарное водопотребление ET_{cr} оценивается опять же для расчетного периода T_p , по продолжительности равного искомому периоду $T_{пр}$. Алгоритмически эта задача решается в формате итерационных вычислений [20]. В начале цикла итерационных вычислений продолжительность расчетного периода принимается равной 1. Проводится весь цикл вычислений, начиная с определения суммарного водопотребления (для расчетного периода в 1 сут), объема поступивших за расчетный период атмосферных осадков и заканчивая определением компоненты $T_{пр}$. Затем компонента $T_{пр}$ сравнивается с продолжительностью расчетного периода, и если их значения различаются, то параметру j присваивается новое значение $j = j + 1$ и все вычисления повторяются. Искомое решение будет характеризоваться минимальным отклонением $T_{пр}$ от T_p .

Важно, что предложенный алгоритм не устанавливает приоритет приведенной выше методики расчета и позволяет использовать более совершенные модели, как только они будут появляться. Алгоритм также предполагает возможность использования сенсорных данных, т. е. физически измеренных значений содержания влаги в активном слое почвы: $W_i = W_s$. Приоритет в этом случае устанавливается в пользу сенсорных технологий получения информации.

Еще одной важной процедурой алгоритма является верификация порогового значения влажности активного слоя почвы $W_{п}$. Задача эта решается преимущественно опытным путем с оценкой культуроспецифических параметров зависимости:

$$Y = f(W_{\text{п}}),$$

где под Y подразумевается значение критерия оптимизации для функции $f(W_{\text{п}})$.

В качестве критерия оптимизации чаще всего используют хозяйственную продуктивность агроценозов, хотя могут быть использованы и другие показатели. Наибольшие значения этой величины относительно пороговых значений содержания влаги в активном слое почвы и определяют оптимальный предполивной уровень. Однако такой подход не учитывает различия в водно-физических свойствах почвы, которые естественны для практики орошения даже в пределах одного хозяйствующего субъекта, а уж тем более для природной зоны. Почвы различного гранулометрического состава, с разными физическими свойствами характеризуются различными пропорциями в содержании доступной и связанной почвенной влаги. Пороговое содержание почвенной влаги для одной и той же культуры на таких участках может существенно варьировать. Алгоритм предусматривает решение этой задачи посредством использования основной гидрофизической характеристики (ОГХ) почвы из соотношения:

$$W_{\text{п}} = f(P_{\text{кр}}),$$

где $P_{\text{кр}}$ – это предельная величина матричного давления почвы, при котором влага в достаточной степени доступна растениям без подключения адаптационных механизмов, Па.

Оперируя величинами средней оценки содержания почвенной влаги и порогового уровня влажности почвы, алгоритм предлагает вычисление безразмерного критерия для принятия решения о необходимости проведения очередного вегетационного полива:

$$K_w = \frac{W_{\text{п}}}{W_i},$$

где K_w – критерий фундаментального оператора управления орошением.

Если величина вычисленного критерия меньше единицы, потребность в проведении очередного вегетационного полива отсутствует. Если величина вычисленного критерия равна единице или больше нее, полив требуется. В последнем случае оператору орошения присваивается код действия и определяются параметры технологического процесса, такие как объем поливной воды и режимы ее распределения в границах орошаемого участка. Общий объем распределяемой поливной воды определяется разностью оптимальных и пороговых почвенных влагозапасов:

$$W = W_{\text{НВ}} - W_{\text{п}},$$

где W – технологический объем распределяемой поливной воды, мм;

$W_{\text{НВ}}$ – запас почвенной влаги при наименьшей влагоемкости.

Однако отсутствие потребности в проведении полива по средней оценке содержания влаги в расчетном слое почвы не является поводом для выработки управляющего решения. Для выработки значения оператора орошения по этой ветке требуется проведение дополнительных вычислений и проверки потребности в проведении полива по W_{sh} .

Как уже говорилось выше, показатель W_{sh} характеризует распределение содержания влаги в почвенном профиле. Пример ситуации, когда вариабельность послойного содержания почвенной влаги требует выравнивания условий водного питания по профилю почвы за счет проведения полива, приведен в работе В. В. Бородычева, М. Н. Лытова [21]. Настоящий алгоритм предлагает процедуру, позволяющую определить потребность в назначении вегетационного полива (внеочередного в классическом понимании теории орошения) на основании неоднородностей в содержании влаги по профилю почвы.

Алгоритм предлагает два варианта оценки неоднородностей в содержании влаги по почвенному профилю. Первый – расчетный, использующий модели послойной динамики влаги в почве, опирающиеся на комплекс факторов $\sum b_i$:

$$\chi_i = f(\sum b_i),$$

где χ_i – коэффициент вариации влажности почвы по профилю расчетного слоя, %.

Совокупность показателей, составляющих комплекс факторов $\sum b_i$, в общем случае зависит от выбранной модели вертикального влагообмена и как минимум предполагает использование информации о водно-физических свойствах почвы, поступлении осадков за расчетный период, уровне грунтовых вод, послойном распределении почвенной влаги на предыдущую расчетную дату ($i - 1$). Следует признать, что такой подход достаточно сложен, требует использования не только динамических моделей обмена влагой, но и учета всего комплекса факторов, связанных с отбором почвенной влаги растениями. Ряд компонентов данного метода еще не разработан, требуется интеграция моделей, описывающих различные физические процессы. Другим подходом, реализация которого уже сейчас возможна на практике, является использование сенсорных данных о послойном распределении влаги в почвенном профиле. Функция $\chi_i = f(W_{sh})$, где W_{sh} и есть сенсорные данные о послойном распределении влаги в почвенном профиле, в этом случае имеет следующее решение:

$$\chi_i = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{\varepsilon=1}^n (W_{sh_\varepsilon} - W_s)^2}{n-1}}}{W_s},$$

где n – число дифференцируемых слоев почвы в пределах расчетного горизонта, ед.;

W_{sh_ε} – влажность почвы в слое ε вертикального профиля h в границах расчетного горизонта, мм;

W_s – сенсорная средняя оценка содержания влаги в активном горизонте почвы, мм.

Тогда критерий фундаментального оператора управления орошением

по общей величине неоднородного распределения влаги в почвенном профиле (K_χ) будет равен:

$$K_\chi = \frac{\chi_i}{\chi_n},$$

где χ_n – пороговый уровень коэффициента вариации содержания влаги в почвенном профиле, при превышении которого нельзя исключить необходимость проведения полива с целью выравнивания условий водообеспечения по почвенному профилю, %.

Значение порогового уровня вариации влаги в почвенном профиле χ_n определяется на основе решения оптимизационной задачи:

$$\Delta Y \cdot Ц_y = f(\chi_n) \cdot Ц_y > \Delta C,$$

где ΔY – снижение продуктивности посева, оцененное относительно коэффициента вариации влажности почвы по слоям профиля, т/га;

$Ц_y$ – цена урожая, оцениваемая в экономическом либо энергетическом эквиваленте, руб./т, Дж/т;

ΔC – дополнительные затраты на проведение внеочередного полива для выравнивания влажности почвы в профиле (оцененные соответственно в экономическом либо энергетическом эквиваленте), руб./т, Дж/т.

При этом зависимость $\Delta Y = f(\chi_n)$, являющаяся основой для решения оптимизационной задачи, устанавливается экспериментально.

В случае если K_χ меньше единицы, оператору управления орошением присваивается код бездействия, проведение вегетационного полива не требуется. Если вычисленное значение критерия больше единицы, алгоритм инициирует проверку потребности в поливе по величине профиля h (части активного слоя почвы) с содержанием влаги менее порогового уровня W_n . Функция $h_i^{W < W_n} = f(W_{sh})$ здесь определяется последовательным сложением слоев ε из множества n , принадлежащих расчетному горизонту почвы, с содержанием влаги ниже порогового уровня W_n .

Отсюда критерий фундаментального оператора управления орошением по доле активного слоя почвы с содержанием влаги ниже порогового уровня (K_h) будет равен:

$$K_h = \frac{h_i^{W < W_n}}{h_n^{W < W_n}},$$

где $h_i^{W < W_n}$ – доля активного слоя почвы с влажностью ниже порогового уровня, %;

$h_n^{W < W_n}$ – пороговая величина доли иссушенного слоя почвы, вычисленная в процентах от мощности активного слоя, %.

Аналогично предыдущему случаю, если K_h меньше единицы, оператору управления орошением присваивается код бездействия, проведение вегетационного полива не требуется. Если же величина критерия K_h равна единице либо больше нее, в проведении очередного вегетационного полива потребность есть и оператору орошения присваивается код соответствующего управляющего действия.

Выработка кода управляющего действия относительно проведения очередного вегетационного полива означает необходимость определения параметров реализации технологического процесса. К одним из таких ключевых параметров относится величина поливной нормы. Оценка поливной нормы традиционно проводится по разнице между текущим содержанием почвенной влаги и почвенными влагозапасами при наименьшей влагоемкости. Если решение о проведении полива принято на основании оценки средней влажности расчетного слоя почвы, поливная норма, как правило, определяется разницей между наименьшей влагоемкостью и пороговым содержанием почвенной влаги. В случае же если полив требуется для выравнивания доступности влаги по профилю почвы, средняя оценка влажности расчетного слоя почвы может быть выше порогового уровня. Величина поливной нормы при этом оценивается по разнице меж-

ду влагозапасами при наименьшей влагоемкости почвы и фактическими влагозапасами в активном слое почвы на дату проведения расчета.

Принятие управляющего решения о проведении очередного вегетационного полива является основанием для инициирования вычислений по последнему блоку предложенного алгоритма, осуществляющему проверку на предмет необходимости включения режима дифференцированного распределения осадков в пределах орошаемого участка. Исходными для проведения такого рода расчетов данными являются значения геоориентированной величины W_{ss} . Геоориентированная оценка влажности почвы по площади орошаемого участка в предложенном алгоритме используется для исследования совокупной вариабельности содержания доступной влаги по площади:

$$V_i^{W_{ss}} = f(W_{ss}),$$

где $V_i^{W_{ss}}$ – показатель вариабельности содержания доступной почвенной влаги по площади орошаемого участка, %;

W_{ss} – геоориентированные сенсорные оценки содержания доступной почвенной влаги по площади орошаемого участка, мм.

Имея решение по оценке горизонтальной вариабельности почвенных влагозапасов, можно определить величину критерия необходимости включения режима дифференцированного распределения осадков (K_V):

$$K_V = \frac{V_i^{W_{ss}}}{V_{II}^{W_{ss}}},$$

где $V_{II}^{W_{ss}}$ – пороговая (допустимая) величина пространственной вариабельности почвенных влагозапасов, в пределах которой дифференцированное распределение осадков по площади орошаемого участка неоправданно, %.

Значение критерия K_V меньше единицы означает, что величина горизонтальной вариабельности почвенных влагозапасов относительно мала и исключает необходимость включения режима дифференцированного

распределения осадков по площади орошаемого участка. Если значение вычисленного критерия равно единице либо больше нее, потребность в дифференцированном распределении осадков по площади орошаемого участка имеется. Ключевым параметром технологии орошения с дифференцированным распределением осадков по площади орошаемого участка является карта полива. Составление этой карты – заключительный блок предложенного алгоритма.

Итогом решения задачи по предложенному алгоритму являются три основных оператора орошения. Это оператор отсутствия потребности в орошении, исключающий запуск нового технологического цикла полива на дату проведения расчета; оператор необходимости проведения очередного вегетационного полива, предполагающий реализацию управляющего действия относительно запуска очередного технологического цикла орошения, и оператор включения режима дифференцированного распределения осадков в процессе полива.

Выводы. Определение потребности в проведении очередного вегетационного полива и выявление параметров этого полива являются базисными задачами управления орошением, а выработка значения управляющего действия по этим позициям составляет сущность фундаментальных операторов управления орошением. Предложенный алгоритм позволяет определять значения фундаментальных операторов управления орошением с учетом вариабельности влагозапасов в почвенном профиле и по площади орошаемого участка. Алгоритм представлен тремя последовательно организованными вычислительными блоками, каждый из которых решает самостоятельную задачу на предмет необходимости проведения очередного вегетационного полива и определения его технологических параметров по средней оценке содержания влаги в активном слое почвы, послойному распределению влаги в почвенном профиле и вариабельности средних оценок влажности почвы по площади орошаемого участка. Раскрыты вы-

числительные процедуры для решения поставленных задач в каждом из рассматриваемых алгоритмически организованных блоков. Результат решения алгоритма – определение необходимости в проведении полива на расчетную дату, а также его основных технологических параметров, таких как поливная норма и необходимость дифференцированного распределения осадков по площади орошаемого участка.

Список использованных источников

1 Precision irrigation perspectives on the sustainable water-saving of field crop production in China: Water demand prediction and irrigation scheme optimization / Y. Q. Peng, Y. X. Xiao, Z. T. Fu, Y. H. Dong, Y. J. Zheng, H. J. Yan, X. X. Li // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 230. – P. 365–377. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.347.

2 Зейлигер, А. М. Точное (дифференцированное) орошаемое земледелие – технология повышения эффективности орошения и снижения нагрузки на окружающую среду / А. М. Зейлигер // *Сборник научных докладов ВИМ*. – 2010. – Т. 2. – С. 633–638.

3 Burunkaya, M. Design and implementation of a new generation drip irrigation system for use in precision agriculture application / M. Burunkaya // *Journal of Polytechnic – Politeknik Dergisi*. – 2019. – Vol. 22, № 3. – P. 785–792. – DOI: 10.2339/politeknik.450792.

4 Балакай, Г. Т. Концепция дождевальнoй машины нового поколения для технологии прецизионного орошения / Г. Т. Балакай, С. М. Васильев, А. Н. Бабичев // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. – 2017. – № 2(26). – С. 1–18. – Режим доступа: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec477-field6.pdf.

5 Чураев, А. А. Прецизионное орошение и современные средства для его реализации / А. А. Чураев, Л. В. Юченко // *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. – 2016. – № 2(62). – С. 75–79.

6 Наземная гиперспектральная аппаратура для измерения вегетативных индексов в задачах прецизионного орошения сельскохозяйственных культур / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев, А. Н. Бабичев, Р. В. Скиданов, В. В. Подлипнов, Ю. Н. Журавель // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. – 2018. – № 1(29). – С. 1–14. – Режим доступа: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec527-field6.pdf.

7 De Lara, A. Soil water content and high-resolution imagery for precision irrigation: Maize yield / A. de Lara, L. Longchamps, R. Khosla // *Agronomy*. – 2019. – Vol. 9, № 4. – P. 174. – DOI: 10.3390/agronomy9040174.

8 Сканирующие ветви гистерезиса водоудерживающей способности почвы и их прогнозирование с использованием математической модели для расчета прецизионных норм орошения сельскохозяйственных культур / В. В. Терлеев, В. Миршель, А. Г. Топоаж, К. Г. Моисеев, И. Того, Ю. В. Волкова, А. О. Никоноров, Р. С. Гиневский, В. А. Лазарев // *Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири: монография*. – М.: ВНИИА, 2018. – С. 297–301.

9 Multiplatform application for precision irrigation scheduling in strawberries / R. G. Perea, I. F. Garcia, M. M. Arroyo, J. A. R. Diaz, E. C. Poyato, P. Montesinos // *Agricultural Water Management*. – 2018. – Vol. 183. – P. 194–201. – DOI: 10.1016/j.agwat.2016.07.017.

10 Цифровые технологии в управлении орошением / Д. А. Соловьев, Г. Н. Ка-

мышова, Н. Н. Терехова, Д. Г. Горюнов, А. Вардумян // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 4. – С. 93–97. – DOI: 10.28983/asj.y2019i4pp93-97.

11 Тищенко, А. П. Оперативное управление режимами орошения сельскохозяйственных культур по инструментальному методу / А. П. Тищенко // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2016. – № 1(61). – С. 17–23.

12 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. – Vol. 24, № 5. – P. 909–913.

13 Система управления широкозахватной дождевальная машины кругового действия для прецизионного орошения / А. Н. Бабичев, В. А. Монастырский, В. И. Ольгаренко, Р. В. Скиданов, В. В. Подлипов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2019. – № 1(73). – С. 195–199.

14 Фурсенко, С. Н. Автоматизация технологических процессов сельскохозяйственного производства / С. Н. Фурсенко, Е. С. Якубовская, Е. С. Волкова. – Минск: ИВЦ Минфина, 2011. – 280 с.

15 Михайленко, И. М. Оптимальное управление орошением посевов сельскохозяйственных культур / И. М. Михайленко, В. Н. Тимошин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 34–38.

16 Котов, В. М. Алгоритмы и структуры данных / В. М. Котов, Е. П. Соболевская, А. А. Толстикова. – Минск: БГУ, 2011. – 267 с.

17 Методические указания и нормативы разработки систем управления экологической устойчивостью орошаемых агроландшафтов / И. П. Кружилин [и др.]. – М.: Россельхозакадемия, 2007. – 105 с.

18 Шабанов, В. В. Оптимальное управление поливами при эксплуатации оросительных систем / В. В. Шабанов, Ю. М. Землянов. – М.: Агропромиздат, 1990. – 56 с.

19 FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) / R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. – 326 p.

20 Бородычев, В. В. Алгоритм решения задач управления водным режимом почвы при орошении сельскохозяйственных культур / В. В. Бородычев, М. Н. Лытов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 8–11.

21 Бородычев, В. В. Проблемы оптимального водообеспечения сои в условиях орошения / В. В. Бородычев, М. Н. Лытов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 2. – С. 39–49. – DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-3.

References

1 Peng Y.Q., Xiao Y.X., Fu Z.T., Dong Y.H., Zheng Y.J., Yan H.J., Li X.X., 2019. Precision irrigation perspectives on the sustainable water-saving of field crop production in China: Water demand prediction and irrigation scheme optimization. *Journal of Cleaner Production*, vol. 230, pp. 365–377, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.347.

2 Zeiliger A.M., 2010. *Tochnoe (differentsirovannoe) oroshaemoe zemledelie – tekhnologiya povysheniya effektivnosti orosheniya i snizheniya nagruzki na okruzhayushchuyu sredu* [Precision (differentiated) irrigated agriculture – technology for improving the irrigation efficiency and reducing the influence on environment]. *Sbornik nauchnykh dokladov VIM* [Proc. of VIM], vol. 2, pp. 633–638. (In Russian).

3 Burunkaya M., 2019. Design and implementation of a new generation drip irrigation system for use in precision agriculture application. *Journal of Polytechnic – Politeknik Dergisi*, vol. 22, no. 3, pp. 785–792, DOI: 10.2339/politeknik.450792.

4 Balakai G.T., Vasiliev S.M., Babichev A.N., 2017. [The concept of a new generation irrigation machine for precision irrigation technology]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII*

Problem Melioratsii, no. 2(26), pp. 1-18, available: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec477-field6.pdf. (In Russian).

5 Churaev A.A., Yuchenko L.V., 2016. *Pretsizionnoe oroshenie i sovremennyye sredstva dlya ego realizatsii* [Precision irrigation and modern means for its implementation]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(62), pp. 75-79. (In Russian).

6 Shchedrin V.N., Vasiliev S.M., Babichev A.N., Skidanov R.V., Podlipnov V.V., Zhuravel Yu.N., 2018. [Ground hyperspectral equipment for measuring vegetation indexes in agricultural crops precision irrigation problems]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 1(29), pp. 1-14, available: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec527-field6.pdf. (In Russian).

7 De Lara A., Longchamps L., Khosla R., 2019. Soil water content and high-resolution imagery for precision irrigation. Maize yield. *Agronomy*, vol. 9, no. 4, pp. 174, DOI: 10.3390/agronomy9040174.

8 Terleev V.V., Mirshel V., Topaj A.G., Moiseev K.G., Togo I., Volkova Yu.V., Nikonov A.O., Ginevsky R.S., Lazarev V.A., 2018. *Skanniruyushchie vetvi gisterezisa vodouderzhivayushchey sposobnosti pochvy i ikh prognozirovaniye s ispol'zovaniem matematicheskoy modeli dlya rascheta pretzionnykh norm orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Scanning branches of hysteretic soil water-retention capacity and their prediction using a mathematical model for calculating precision norms for crop irrigation]. *Novyye metody i rezul'taty issledovaniy landshaftov v Evrope, Tsentral'noy Azii i Sibiri: monografiya* [Novel Methods and Results of Landscape Research in Europe, Central Asia and Siberia: Monograph]. Moscow, VNIIA Publ., pp. 297-301. (In Russian).

9 Perea R.G., Garcia I.F., Arroyo M.M., Diaz J.A.R., Poyato E.C., Montesinos P., 2018. Multiplatform application for precision irrigation scheduling in strawberries. *Agricultural Water Management*, vol. 183, pp. 194-201, DOI: 10.1016/j.ag-wat.2016.07.017.

10 Solov'ev D.A., Kamysheva G.N., Terekhova N.N., Goryunov D.G., Vardumyan A., 2019. *Tsifrovyye tekhnologii v upravlenii orosheniem* [Digital technologies in irrigation management]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agricultural Scientific Journal], no. 4, pp. 93-97, DOI: 10.28983/asj.y2019i4pp93-97. (In Russian).

11 Tishchenko A.P., 2016. *Operativnoye upravlenie rezhimami orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur po instrumental'nomu metodu* [Operational management of crop irrigation regimes by the instrumental method]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 1(61), pp. 17-23. (In Russian).

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

13 Babichev A.N., Monastyrsky V.A., Ol'garenko V.I., Skidanov R.V., Podlipnov V.V., 2019. *Sistema upravleniya shirokoyakhvatnoy dozhdeval'noy mashiny krugovogo deystviya dlya pretzionnogo orosheniya* [The control system of a multiple center pivot sprinkling machine for precision irrigation]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 1(73), pp. 195-199. (In Russian).

14 Fursenko S.N., Yakubovskaya E.S., Volkova E.S., 2011. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva* [Automation of Technological Processes of Agricultural Production]. Minsk, Information Center of the Ministry of Finance Publ., 280 p. (In Russian).

15 Mikhailenko I.M., Timoshin V.N., 2016. *Optimal'noye upravlenie orosheniem posevov sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Optimal irrigation control of agricultural crops]. *Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 6, pp. 34-38. (In Russian).

16 Kotov V.M., Sobolevskaya E.P., Tolstikov A.A., 2011. *Algoritmy i struktury dannykh* [Algorithms and Data Structures], Minsk, BSU Publ., 267 p. (In Russian).

17 Kruzhilin I.P. [et al.], 2007. *Metodicheskie ukazaniya i normativy razrabotki sistem upravleniya ekologicheskoy ustoychivost'yu oroshaemykh agrolandshaftov* [Methodological Guidelines and Standards for the Development of Control Systems of Environmental Sustainability for Irrigated Agricultural Landscapes]. Moscow, Russian Agricultural Academy Publ., 105 p. (In Russian).

18 Shabanov V.V., Zemlyanov Yu.M., 1990. *Optimal'noe upravlenie polivami pri ekspluatatsii orositel'nykh sistem* [Optimal Irrigation Control During Irrigation Systems Operation]. Moscow, Agropromizdat Publ., 56 p. (In Russian).

19 Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 326 p.

20 Borodychev V.V., Lytov M.N., 2015. *Algoritm resheniya zadach upravleniya vodnym rezhimom pochvy pri oroshenii sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [An algorithm for solving problems of controlling soil water regime during crop irrigation of crop]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 1, pp. 8-11. (In Russian).

21 Borodychev V.V., Lytov M.N., 2019. *Problemy optimal'nogo vodoobespecheniya soi v usloviyakh orosheniya* [Problems of optimal water supply of soy under irrigation conditions]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bull. of the Nizhnevolgskiy Agricultural University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 2, pp. 39-49, DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-3. (In Russian).

Лытов Михаил Николаевич

Ученая степень: кандидат сельскохозяйственных наук

Ученое звание: доцент

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова» (Волгоградский филиал)

Адрес организации: ул. Тимирязева, д. 9, г. Волгоград, Российская Федерация, 400002

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»

Адрес организации: Университетский пр-т, д. 97, г. Волгоград, Российская Федерация, 400062

E-mail: LytovMN@yandex.ru

Lytov Mikhail Nikolayevich

Degree: Candidate of Agricultural Sciences

Title: Associate Professor

Position: Leading Researcher

Affiliation: All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (Volgograd branch)

Affiliation address: st. Timiryazeva, 9, Volgograd, Russian Federation, 400002

Position: Senior Researcher

Affiliation: Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences

Affiliation address: Universitetsky ave., 97, Volgograd, Russian Federation, 400062

E-mail: LytovMN@yandex.ru