

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.67:551.586

doi: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-67-85

Целевые функции компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур при комплексном использовании гидротехнических мелиораций

Михаил Николаевич Лытов

Волгоградский филиал Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Волгоград, Российская Федерация, LytovMN@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

Аннотация. **Цель:** создание системы целевых функций компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур за счет комплексного использования гидротехнических мелиораций. **Материалы и методы.** В основу методологии исследований положено предположение о возможности компенсации губительного действия климатического фактора в отношении посевов сельскохозяйственных культур как минимум в том диапазоне, где это действие необратимо и не компенсируется внутренними защитными механизмами растений. **Результаты.** Исследованиями уточнена формулировка, транслирующая понятие «климатические риски» применительно к решаемым в исследовании задачам. Понятие распространяется в отношении посевов сельскохозяйственных культур, характеризует климатические отклонения, которые реализуются с определенной вероятностью и повторяемостью, рассматриваются только те климатические риски, компенсировать губительное действие которых можно путем использования различных гидромелиоративных технологий. На данном этапе в качестве климатических факторов, несущих риски, рассматриваются атмосферные заморозки, понижения температуры почвы за пределами области адаптации растений, повышения температуры почвы за пределами области адаптации растений, воздушная засуха. Для этих факторов разработаны целевые функции компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур. Целевые функции определяют минимальный, достаточный и избыточный уровень действия регулятора для компенсации губительного действия климатического фактора, реализуемого на уровне климатического риска. В качестве регулятора используются известные или производные гидромелиоративные технологии, адаптированные к условиям решаемой задачи. **Выводы.** Разработаны целевые функции, позволяющие определить оптимальный уровень действия регулятора для компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур за счет комплексного использования гидротехнических мелиораций.

Ключевые слова: климатический фактор, климатический риск, орошение, сельскохозяйственные культуры, компенсация рисков, гидромелиоративные технологии, целевые функции

Для цитирования: Лытов М. Н. Целевые функции компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур при комплексном использовании гидротехнических мелиораций // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 4. С. 67–85. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-4-67-85>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Goal functions for climate risk compensation of crop cultivation at the integrated hydrotechnical reclamation use

Mikhail N. Lytov

Volgograd branch of A. N. Kostyakov All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Volgograd, Russian Federation, LytovMN@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

Abstract. Purpose: formation of a goal function system for climatic risks compensation of crop cultivation at the integrated use of hydrotechnical reclamation. **Materials and methods.** The research methodology is based on the assumption that it is possible to compensate for the detrimental effect of the climatic factor on agricultural crops, at least in the range where this effect is irreversible and is not compensated by the inner plant defenses. **Results.** The wording translating the concept of “climatic risks” in relation to the tasks being solved in the study has been clarified by research. The concept extends to agricultural crops, characterizes climatic deviations that are realized with a certain probability and frequency, only those climatic risks the destructive effect of which can be compensated by using various hydro-reclamation technologies are considered. At this stage, atmospheric frosts, soil temperature drops outside the plant adaptation area, soil temperature rises outside the plant adaptation area, and air drought are considered as risk-bearing climatic factors. For these factors, goal functions to compensate for the climatic risks of crop cultivation have been developed. Objective functions determine the minimum, sufficient and excessive level of the regulator's action to compensate for the detrimental effect of the climatic factor, realized at the level of climate risk. Known or derived hydro-reclamation technologies adapted to the conditions of the problem being solved are used as a regulator. **Conclusions.** Objective functions to determine the optimal level of regulator action to compensate for the climatic risks of agricultural crops cultivation through the integrated use of hydrotechnical reclamation have been developed.

Keywords: climatic factor, climatic risk, irrigation, agricultural crops, risk compensation, hydrotechnical technologies, goal functions

For citation: Lytov M. N. Goal functions for climate risk compensation of crop cultivation at the integrated hydrotechnical reclamation use. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;12(4):67–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-4-67-85>.

Введение. Основными трендами технико-технологического развития гидромелиоративных систем, в т. ч. при создании систем новых поколений, являются: автоматизация и интеллектуальные системы управления технологическими процессами, экологическая безопасность и встраивание мелиорированных сегментов в биосферу с реализацией биосферных функций, использование возобновляемых источников энергии, увеличение функциональных возможностей для комплексного регулирования факторов жизни [1–5]. Последнее сегодня приобретает особую актуальность, так

как объективно позволяет увеличивать продуктивность посевов, качество сельскохозяйственной продукции, т. е. эффективность мелиораций, без увеличения уровня ресурсопотребления. Использование гидротехнических мелиораций как несущей технологии для комплексного регулирования факторов жизни – идея не новая. Уже сегодня широко используется фертигация, обеспечивая дозированное внесение удобрений с поливной водой, разработаны специальные режимы для улучшения мелиоративного состояния и повышения плодородия почвы. С водой вносят химмелиоранты, системные средства защиты растений, есть решения по регулированию микроклимата посева [6–10]. На данном этапе ставится задача по комплексному использованию гидромелиоративных технологий, реализуемых посредством сформированного набора гидротехнических инструментов, для защиты посевов сельскохозяйственных культур от климатических рисков. Для решения этой задачи важно определить те требования, которым должна соответствовать гидромелиоративная система в части специфики и объема регуляторного воздействия для компенсации негативного действия климатического риска. Нужно знать границы необходимого и достаточного диапазона регулирования климатических факторов, обеспечивающего переход климатического риска в зону адаптации растений. С этой целью настоящим исследованием ставится задача создания системы целевых функций компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур за счет комплексного использования гидротехнических мелиораций.

Материалы и методы. Климатические факторы во всех регионах России, а особенно в условиях резко континентального климата юга России, имеют значительно более широкий диапазон варьирования, чем тот, который может быть компенсирован за счет подключения адаптационных механизмов [11, 12]. Достаточно продолжительное действие климатического фактора, выходящего за пределы адаптационного потенциала растений, может привести к необратимым повреждениям или их полной гибели.

Такие экстремальные проявления метеорологических условий характеризуют климатические риски возделывания сельскохозяйственных культур. Рабочей гипотезой исследований является предположение о возможности компенсации губительного действия климатического фактора в отношении посевов сельскохозяйственных культур как минимум в том диапазоне, где это действие необратимо и не компенсируется внутренними защитными механизмами растений.

Автор имеет успешный опыт комплексного регулирования гидротермического режима агрофитоценоза с целью оптимизации факторов жизни на основе того технико-технологического инструментария, который представляет комбинированное орошение [13, 14]. В целом задачи регулирования оптимального гидротермического режима агрофитоценоза и компенсации климатических рисков сходны. И в том и в другом случае требуется смещение климатических факторов в сторону оптимума. Это позволяет сделать предположение о возможности использования гидротехнических мелиораций в качестве инструмента для защиты растений от действия экстремально неблагоприятных климатических факторов. Объектом исследований являются гидромелиоративные системы с расширенным функционалом по компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур за счет комплексного использования гидромелиоративных технологий. Предмет исследований – целевые функции компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур на мелиорированных землях как средство определения специфики и необходимого объема действия регулятора.

Результаты и обсуждение. Прежде чем приступить к обсуждению результатов исследований, необходимо составить четкое представление о понятии климатического риска, по крайней мере в том смысле, который мы на него распространяем. В литературе используются различные определения понятия «климатический риск», наиболее емкое и выверенное

из которых, на наш взгляд, сформулировано следующим образом: «климатический риск – совместная характеристика вероятности опасных проявлений климатического фактора и его воздействия на объект этого воздействия, которая выражается в величинах повторяемости и ущерба». Однако это определение все еще слишком широко относительно решаемых нами задач, поэтому приведем необходимые уточнения. Во-первых, это понятие рассматривается в отношении посевов сельскохозяйственных культур, а значит, определяет риски их возделывания. Предполагается, что такие климатические отклонения не являются климатической нормой, это временные, выраженные явления, которые характеризуются определенной вероятностью и повторяемостью. Еще одно важное уточнение заключается в том, что риски предполагается компенсировать на мелиорированных землях, а это значит, что водный режим почвы регулируется и в качестве климатического риска не рассматривается. Рассматриваются только те климатические риски, компенсировать губительное действие которых можно путем использования различных гидромелиоративных технологий. На данном этапе в качестве факторов, несущих климатические риски, рассматриваются: воздушные (атмосферные) заморозки, понижения температуры почвы за пределами области адаптации растений, повышения температуры почвы за пределами области адаптации растений, воздушная засуха.

Целевая функция компенсации атмосферного заморозка $F(T_{c.fr})$ определяется необходимостью поддержания температуры в среде посева выше некоторого порогового уровня ($T_{ph.min}$):

$$F(T_{c.fr}) \in [T_{ph.min} - T_f; T_{opt} + \Delta T_{opt} - T_f], \quad (1)$$

где $T_{c.fr}$ – необходимая величина повышения температуры в среде растительного покрова для компенсации губительного влияния с необратимым деструктивным эффектом, °К;

$T_{ph.min}$ – физиологический порог выживаемости растений при понижении температуры окружающей среды, °К;

T_f – актуальная или прогнозируемая температура заморозка, °К;

T_{opt} – граница температурного оптимума для возделываемой культуры, °К;

ΔT_{opt} – диапазон температурного оптимума возделываемой культуры, °К.

Повышение температуры в среде растительного покрова на целевую величину $\Delta T_{c.fr}$ (1) связано с необходимостью увеличения теплоты воздуха в среде посева (q_{air}) и теплоты непосредственно вегетативных органов растений (q_v) с учетом соотношения их объемов и теплоемкости:

$$\Delta T_{c.fr} = \frac{q_{air}}{c_{air} \cdot v_{air}} + \frac{q_v}{c_v \cdot v_v},$$

где q_{air} – количество теплоты, необходимое для повышения температуры воздуха в объеме растительного покрова на величину $\Delta T_{c.fr}$, Дж/га;

c_{air} , c_v – удельная объемная теплоемкость соответственно воздуха и вегетативных органов растений, Дж/(м³·°С);

v_{air} – объем приземного слоя воздуха, учитываемого в границах растительного покрова на площади посева 1 га, м³/га;

q_v – количество теплоты, необходимое для повышения температуры вегетативных органов растений на величину $\Delta T_{c.fr}$, Дж/га;

v_v – совокупный объем вегетативных органов растений на площади посева 1 га, м³/га.

При этом температура и потребный объем агента регулятора, в качестве которого выступает оросительная вода, определится из соотношения:

$$\Delta T_{agent} = \frac{q_{agent}}{c_{agent} \cdot v_{agent}},$$

где ΔT_{agent} – рабочий диапазон температуры агента регулятора (оросительной воды), необходимый для повышения температуры в среде растительного покрова на целевую величину $\Delta T_{c.fr}$, °К;

q_{agent} – количество теплоты, выделяемое агентом регулятора при остывании на величину ΔT_{agent} , Дж/га;

c_{agent} – объемная теплоемкость агента регулятора (воды), Дж/(м³·°С);

v_{agent} – совокупный объем агента регулятора (оросительной воды), подаваемый на площадь 1 га, м³/га.

Для компенсации губительного действия заморозка с необратимыми деструктивными изменениями в среде посева необходимо соблюдение условия:

$$q_{air} + q_v = q_{agent}.$$

Основные параметры технологического процесса, обеспечивающие достижение этого равенства, – это объем поданной на участок оросительной воды (v_{agent}) и ее температура ΔT_{agent} .

Необходимо также учитывать и динамику процессов теплообмена, включая преимущественно конвективный теплообмен воздуха в среде посева, лучистую и контактную теплопередачу вегетативных органов растений и поверхности почвы, теплообмен агента регулятора со всеми средами растительного покрова:

$$q_{air} = q'_{air} \cdot \Delta t, \quad q_v = q'_v \cdot \Delta t, \quad q_{agent} = q'_{agent} \cdot \Delta t,$$

где q'_{air} – совокупный вектор потока теплоты для приземного слоя воздуха, учитываемого в объеме растительного покрова, Дж/(га·с);

Δt – время, с;

q'_v – поток тепла, передаваемый вегетативными органами растений, Дж/(га·с);

q'_{agent} – совокупный вектор потока теплоты, формируемый агентом регулятора, Дж/(га·с);

Полагая систему равновесной, т. е. обеспечивающей равное количество привносимой и расходуемой теплоты за равные промежутки времени Δt , получим ключевое условие нулевого вектора потоков теплоты для компенсации заморозка в течение всего периода его действия:

$$-q'_{air} - q'_v + q'_{agent} = 0.$$

Тепловые мелиорации при критических для возделываемых сельскохозяйственных культур понижениях температуры почвы предполагают увеличение температуры целевого (активного, корнеобитаемого) горизонта почвы на величину ΔT_{csf} . При этом целевая функция тепловых мелиораций почвы определяет диапазон воздействия на температуру, исходя из физиологического минимума адаптации корневой системы возделываемой культуры и диапазона оптимальных для вида температур почвы:

$$F(T_{csf}) \in [T_{ph.min}^{root} - T_{sf}; T_{opt}^{root} + \Delta T_{opt}^{root} - T_{sf}], \quad (2)$$

где $F(T_{csf})$ – целевая функция повышения температуры активного слоя почвы на величину ΔT_{csf} , необходимую для преодоления деструктивной области влияния фактора, °К;

$T_{ph.min}^{root}$ – физиологический минимум адаптации корневой системы в отношении температурного фактора, °К;

T_{sf} – актуальная (прогнозируемая) величина температуры активного слоя почвы при реализации климатического риска, °К;

T_{opt}^{root} – нижняя граница физиологически оптимального диапазона температуры почвы, °К;

ΔT_{opt}^{root} – диапазон физиологически оптимальных температур почвы для корневой системы возделываемой культуры, °К.

При этом для повышения температуры почвы на величину ΔT_{csf} , необходимую, чтобы компенсировать губительное влияние фактора с необратимым деструктивным эффектом (2), потребуется затратить количество теплоты q_{soil} , которое в общем случае определится из выражения:

$$\Delta T_{csf} = \frac{q_{soil}}{c_{soil} \cdot v_{a.soil}},$$

где q_{soil} – количество теплоты, необходимое для повышения температуры почвы в активном слое на величину ΔT_{csf} , Дж/га;

c_{soil} – удельная объемная теплоемкость почвы в активном слое, Дж/(м³·°С);

$v_{a.soil}$ – рабочий (активный, освоенный корневой системой культуры) слой почвы, необходимость регулирования температуры в котором возникает при реализации климатического риска.

При этом количество теплоты q_{soil} , необходимое для повышения температуры почвы и преодоления деструктивной области влияния фактора, должно быть привнесено в систему посредством агента регулятора, т. е.:

$$q_{soil} = q_{agent}.$$

В качестве агента регулятора по условиям поставленной задачи используется оросительная вода, основные технологические параметры применения которой определяются из уже известного соотношения:

$$\Delta T_{agent} = \frac{q_{agent}}{c_{agent} \cdot v_{agent}}.$$

При решении задачи также нужно учитывать динамику процесса, что на каждом этапе реализации процесса предполагает соблюдение условия:

$$-q'_{soil} + q'_{agent} = 0,$$

где q'_{soil} – совокупный вектор потока теплоты относительно рассматриваемого объема корнеобитаемого горизонта почвы, формируемый при реализации климатического риска, Дж/(га·с).

Интуитивно понятным ограничением по параметрам технологии тепловых мелиораций при критических понижениях температуры почвы является условие непревышения температуры теплоносителя уровня физиологического максимума для культуры:

$$T_{agent} < T_{ph.max}^{root},$$

где $T_{ph.max}^{root}$ – предельный порог физиологической адаптации культуры (в данном случае – корневой системы) к перегреву при кратковременном воздействии, °К.

Другое ограничение при осуществлении тепловых мелиораций, в которых в качестве агента-теплоносителя используется оросительная вода, определяется необходимостью поддержания оптимального водного режима почвы:

$$v_{agent} \leq v_{a.soil} \cdot (\beta_{v.HB} - \beta_{v.i}),$$

где $\beta_{v.HB}$ – объемная влажность почвы в состоянии наименьшей влагоемкости, %;

$\beta_{v.i}$ – объемная влажность почвы при возникновении потребности в проведении тепловых мелиораций (в момент реализации климатического риска), %.

В случаях чрезмерного роста температуры активного слоя почвы за пределы физиологического порога адаптации культуры тепловые мелиорации предполагают проведение мероприятий по предотвращению перегрева и активному отводу тепла. Целевая функция при этом определяет ту величину необходимого снижения температуры почвы в активном (освоенном корневой системой культуры) объеме, которая обеспечит перевод фактора в зону физиологической адаптации культуры и далее в зону оптимума. Такая постановка задачи имеет следующий вид:

$$F(-T_{csh}) \in [T_{ph.max}^{root} - T_{sh}; T_{opt}^{root} - \Delta T_{opt}^{root} - T_{sh}], \quad (3)$$

где $F(-T_{csh})$ – целевая функция предотвращения перегрева почвы с переходом в область необратимого деструктивного влияния фактора за счет понижения температуры активного слоя на величину $-T_{csh}$, °К;

$T_{ph.max}^{root}$ – физиологический порог адаптации культуры к перегреву почвы в активно осваиваемой корнями зоне, °К;

T_{sh} – актуальная (прогнозируемая) величина температуры активного слоя почвы при реализации климатического риска, °К;

T_{opt}^{root} – верхняя граница физиологически оптимального для культуры диапазона температуры почвы, °К;

ΔT_{opt}^{root} – диапазон физиологически оптимальных для культуры температур почвы, °К.

Общее количество теплоты, которое должно быть отведено для охлаждения почвы в соответствии с требованиями целевой функции (3), определится из уже известного выражения:

$$-\Delta T_{csh} = \frac{-q_{soil}}{c_{soil} \cdot v_{a.soil}},$$

где $-\Delta T_{csh}$ – целевая величина снижения температуры активного слоя почвы, обеспечивающая предотвращение деструктивного действия фактора и перевод его в зону адаптации или оптимальных условий для развития культуры, °К.

Отвод тепла в соответствии с условиями постановки задачи осуществляется посредством оросительной воды и складывается из двух составляющих. Первая – это отвод тепла за счет использования агента регулятора с пониженной температурой, который при нагревании потребляет часть избыточно запасенного тепла почвы:

$$-q_{agent} = -\Delta T_{agent} \cdot c_{agent} \cdot v_{agent}.$$

Важными условиями, ограничивающими эффективность такого метода компенсации избыточной температуры почвы, являются ограничения

по величине $-\Delta T_{agent}$, которые определяются минимальной, физиологически обоснованной температурой воды, используемой для полива, а также фактическими температурами воды в водоисточнике и оросительной системе. Однако вторая составляющая позволяет существенно повысить эффективность использования оросительных мелиораций для отвода избыточно накопленного тепла в почве и определяется теплотой фазового перехода:

$$-q_{ph.t} = -v_E \cdot r,$$

где $-q_{ph.t}$ – теплота, поглощаемая в результате фазового перехода испаряемой с поверхности почвы оросительной воды, Дж/га;

$-v_E$ – объем воды, испаряемой с поверхности почвы, м³/га;

r – теплота фазового перехода воды из жидкого состояния в парообразное, Дж/кг.

Как видно, отвод тепла из-за поглощения теплоты фазового перехода будет тем больше, чем больший объем агента регулятора, в данном случае – оросительной воды, пойдет на испарение с поверхности почвы. Идеальным решением будет, если v_{agent} будет равен $-v_E$. Обеспечить данное условие можно за счет проведения поливов, ориентированных на смачивание только поверхности почвы на глубину не более 0,02–0,03 м.

Целевая функция компенсации воздушной засухи $F(\varphi_{adc})$ определяется необходимостью повышения относительной влажности воздуха непосредственно в среде растений до уровня, превышающего некоторый порог физиологического минимума культуры $\varphi_{ph.min}^{pl}$. Целевая функция задает величину необходимого эффекта технологии относительно повышения влажности воздуха в среде посева $\Delta\varphi_{adc}$:

$$F(\varphi_{adc}) \in [\varphi_{ph.min}^{pl} - \varphi_a^{pl}; \varphi_{opt}^{pl} + \Delta\varphi_{opt}^{pl} - \varphi_a^{pl}], \quad (4)$$

где $F(\varphi_{adc})$ – целевая функция повышения относительной влажности воздуха в объеме, занимаемом растениями в сельскохозяйственных посевах,

на величину $\Delta\varphi_{adc}$, необходимую для преодоления области деструктивного влияния фактора, %;

$\varphi_{ph.min}^{pl}$ – пороговый уровень физиологического минимума относительной влажности воздуха, за пределами которого проявляются необратимые деструктивные изменения, включая полную гибель растения, %;

φ_a^{pl} – актуальная величина относительной влажности воздуха в среде посева при реализации климатического риска, %;

φ_{opt}^{pl} – граница диапазона оптимальной влажности воздуха для культуры в данной фазе онтогенеза, %;

$\Delta\varphi_{opt}^{pl}$ – диапазон оптимальной для культуры влажности воздуха, %.

При этом достижение целевого уровня воздействия (4) по фактору связано с необходимостью испарения влаги в среде посева массой m_{agent} , исходя из предположения, что эта влага распределится в объеме воздуха v_{air} , ограниченного объемом, занимаемым вегетативной массой посева. Термодинамика процесса требует обязательного учета температуры окружающей среды, однако основным технологическим параметром является масса агента регулирования, в качестве которого по условию задачи используется оросительная вода:

$$\Delta\varphi_{adc} = \frac{R \cdot T \cdot m_{agent}}{P_0 \cdot M_{H_2O} \cdot v_{air}},$$

где R – это газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – температура воздуха в границах среды регулирования относительной влажности, °К;

m_{agent} – совокупная масса агента регулирования, в качестве которого в технологии используется оросительная вода, кг;

P_0 – давление насыщенного пара при температуре T окружающей среды, кПа;

$M_{\text{H}_2\text{O}}$ – молярная масса воды, г/моль;

v_{air} – совокупный объем приземного слоя атмосферы, влажность воздуха в котором необходимо регулировать для преодоления необратимого деструктивного действия фактора, м³.

Однако рассматриваемая система априори не является закрытой, поэтому процесс нужно рассматривать в динамике, учитывая основные обменные процессы. Основным регулятором влажности воздуха при реализации климатического риска является оросительная вода, распределенная по поверхности вегетативных органов растений и поверхности почвы. При этом суммарный вектор расхода испаряющейся влаги определится из выражения:

$$\frac{dm_{\text{agent}}^{\rightarrow v_{\text{air}}}}{dt} = k_1 \cdot S_{\text{ws}} \cdot (P_0 - \varphi_a^{pl} \cdot P_0),$$

где $\frac{dm_{\text{agent}}^{\rightarrow v_{\text{air}}}}{dt}$ – динамика расходования влаги со стороны увлажненной поверхности в область регулирования, ограниченную объемом приземного слоя воздуха в среде растений, г/с;

k_1 – коэффициент, определяющий пропорцию между скоростью испарения воды с увлажненной поверхности и разностью парциальных давлений – насыщенного пара и ненасыщенного при актуальной относительной влажности воздуха в среде посева, г/(кПа·м²·с);

S_{ws} – совокупная площадь увлажненной поверхности почвы и вегетативных органов растений, м².

При этом важно учитывать, что параметр S_{ws} в выражении является переменным, так как на начальном этапе капельно-жидкие формы влаги испаряются и с вегетативных органов растений, а в последующем – преимущественно с поверхности увлажненной почвы, тогда как испарение с вегетативных органов ограничивается транспирацией.

С другой стороны система характеризуется постоянным конвекционно-диффузным влагообменом между слоями атмосферы, располагаемыми в границах объема, занимаемого растительным покровом, и за его пределами. Динамика этого влагообмена в общем случае может быть представлена в виде:

$$\frac{dm_{air}^{vair \rightarrow}}{dt} = k_2 \cdot S_c \cdot (\varphi_{el}^{pl} \cdot P_0 - \varphi_a \cdot P_0),$$

где $\frac{dm_{air}^{vair \rightarrow}}{dt}$ – суммарный вектор влагообмена между слоями воздуха в среде посева и за его пределами, г/с;

k_2 – коэффициент пропорциональности между разностью парциальных давлений пара в воздухе в среде посева и за ее пределами и динамикой диффузно-конвективного влагообмена между этими слоями атмосферы;

S_c – площадь соприкосновения условно выделяемых слоев атмосферы, м²;

φ_{el}^{pl} – равновесная относительная влажность воздуха в среде посева, достигаемая посредством работы регулятора, %;

φ_a – актуальная относительная влажность воздуха за пределами растительного покрова, %.

Отсюда следует, что ключевым условием устойчивой работы регулятора и достижения целевого уровня является равенство:

$$\frac{dm_{agent}^{\rightarrow vair}}{dt} = \frac{dm_{air}^{vair \rightarrow}}{dt}. \quad (5)$$

Выражение (5) характеризует необходимые условия обеспечения равновесия по поступлению и расходованию газообразной влаги из приземного слоя атмосферы в границах занимаемого растительным покровом объема.

Выводы. Исследованиями разработаны целевые функции компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур

за счет комплексного использования гидротехнических мелиораций. Уточнена формулировка, транслирующая понятие «климатические риски» применительно к решаемым в исследовании задачам. Понятие распространяется в отношении посевов сельскохозяйственных культур, характеризует климатические отклонения, которые реализуются с определенной вероятностью и повторяемостью, рассматриваются только те климатические риски, компенсировать губительное действие которых можно путем использования различных гидромелиоративных технологий. На данном этапе в качестве факторов, несущих климатические риски, рассматриваются атмосферные заморозки, понижения температуры почвы за пределами области адаптации растений, повышения температуры почвы за пределами области адаптации растений, воздушная засуха. Целевые функции для этих факторов определяют минимальный, достаточный и избыточный уровень действия регулятора для компенсации губительного действия климатического фактора, реализуемого на уровне климатического риска. В качестве регулятора используются известные или производные гидромелиоративные технологии, адаптированные к условиям решаемой задачи. Исследование предлагает описание взаимодействия регулятора и климатического фактора, реализуемого как климатический риск, на уровне физических процессов. Разработаны ключевые условия, определяющие работоспособность регулятора, специфику и объемы необходимого действия в отношении климатического риска для полной его компенсации.

Список источников

1. Стратегический подход к развитию мелиорации в условиях меняющегося климата / В. Н. Щедрин, Р. С. Масный, С. А. Манжина, С. В. Куприянова // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 2. С. 11–17. DOI: 10.32962/0235-2524-2022-2-11-18.
2. Юрченко И. Ф. Становление цифровых платформ мелиоративного водохозяйственного комплекса // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 1(57). С. 380–395. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-37.
3. Шевченко В. А., Исаева С. Д. Совершенствование мониторинга мелиорированных сельскохозяйственных земель // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 2(50). С. 72–78.

4. Майер А. В. Многофункциональная система орошения для управления физиологическими процессами и регулирования гидротермического режима агрофитенозов // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 6. С. 19–25.

5. Костоварова И. А., Шленов С. Л., Замаховский М. П. Повышение эффективности орошения при многофункциональном использовании техники полива // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33, № 3. С. 58–61. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10315.

6. Improving soil respiration while maintaining soil C stocks in sunken plastic greenhouse vegetable production systems – Advantages of straw application and drip fertigation / Y. Wang, S. Lin, H. Lv, J. Wang, M. Dannenmann, K. Butterbach-Bahl, G. Li, X. Lian, Z. Wang // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2021. Vol. 316. 107464. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107464>.

7. Optimum plant stand and nutrient doses for summer groundnut under check basin irrigation and drip fertigation in light black soils of peninsular Western India / R. A. Jat, K. K. Reddy, R. Solanki, R. R. Choudhary, S. K. Sarkar // Journal of Plant Nutrition. 2020. Vol. 43, № 8. P. 1154–1174. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1724303>.

8. Мартыненко Т. А. Агромелиоративная эффективность применения фосфогипса в условиях капельного орошения минерализованными водами при выращивании лука репчатого // Мелиорация. 2014. № 2(72). С. 24–29.

9. Мильченко Н. Ю. Усовершенствованная технология внесения средств химизации с поливной водой // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2009. № 4(16). С. 121–123.

10. Гжибовский С. А. Система аэрозольного орошения КАУ-1М для поддержания микроклимата в термически напряженный период // Техника и оборудование для села. 2015. № 6. С. 25–27.

11. Lukyanets A. S., Bragin A. S. The impact of climate risks on Russia's economic development: example of the North Caucasian Federal District // RUDN Journal of Economics. 2021. Vol. 29, № 2. P. 439–450. <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2021-29-2-439-450>.

12. Павлова В. Н., Варчева С. Е. Оценка климатических рисков потерь урожая в региональных системах земледелия // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 3. С. 122–132. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-3-122-132.

13. Бородычев В. В., Лытов М. Н. Техничко-технологические основы регулирования гидротермического режима агрофитоценоза в условиях орошения // Научная жизнь. 2019. Т. 14, № 10(98). С. 1484–1495. DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1484-1495.

14. Бородычев В. В., Лытов М. Н. Модель теплообмена в системе «агрофитоценоз – окружающая среда» с регуляторами // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 4(56). С. 192–203. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-24.

References

1. Shchedrin V.N., Masny R.S., Manzhina S.A., Kupriyanova S.V., 2022. *Strategicheskiy podkhod k razvitiyu melioratsii v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [Strategic approach to development of land reclamation in a changing climate]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 2, pp. 11-17, DOI: 10.32962/0235-2524-2022-2-11-18. (In Russian).

2. Yurchenko I.F., 2020. *Stanovlenie tsifrovyykh platform meliorativnogo vodokhozyaystvennogo kompleksa* [The establishment of digital platforms of the reclamation water complex]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agrouniversity Complex: Science

and Higher Education], no. 1(57), pp. 380-395, DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-37. (In Russian).

3. Shevchenko V.A., Isaeva S.D., 2018. *Sovershenstvovanie monitoringa meliorirovannykh sel'skokhozyaystvennykh zemel'* [Monitoring improving of reclaimed agricultural lands]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agrouniversity Complex: Science and Higher Education], no. 2(50), pp. 72-78. (In Russian).

4. Mayer A.V., 2021. *Mnogofunktsional'naya sistema orosheniya dlya upravleniya fiziologicheskimi protsessami i regulirovaniya gidrotermicheskogo rezhima agrofitenozov* [Multifunctional irrigation system for controlling physiological processes and regulating the hydrothermal regime of agrophytenoses]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 6, pp. 19-25. (In Russian).

5. Kostovarova I.A., Shlenov S.L., Zamakhovskiy M.P., 2019. *Povyshenie effektivnosti orosheniya pri mnogofunktsional'nom ispol'zovanii tekhniki poliva* [Irrigation effectiveness improvement using multifunctional watering method]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of APK], vol. 33, no. 3, pp. 58-61, DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10315. (In Russian).

6. Wang Y., Lin S., Lv H., Wang J., Dannenmann M., Butterbach-Bahl K., Li G., Lian X., Wang Z., 2021. Improving soil respiration while maintaining soil C stocks in sunken plastic green-house vegetable production systems – Advantages of straw application and drip fertigation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 316, 107464, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107464>.

7. Jat R.A., Reddy K.K., Solanki R., Choudhary R.R., Sarkar S.K., 2020. Optimum plant stand and nutrient doses for summer groundnut under check basin irrigation and drip fertigation in light black soils of peninsular Western India. *Journal of Plant Nutrition*, vol. 43, no. 8, pp. 1154-1174, <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1724303>.

8. Martynenko T.A., 2014. *Agromeliorativnaya effektivnost' primeneniya fosfogipsa v usloviyakh kapel'nogo orosheniya mineralizovannymi vodami pri vyrashchivanii luka repchatogo* [Agromeliorative efficiency of phosphogypsum application under drip irrigation with mineralized waters in growing onion]. *Melioratsiya* [Land Reclamation], no. 2(72), pp. 24-29. (In Russian).

9. Milchenko N.Yu., 2009. *Usovershenstvovannaya tekhnologiya vneseniya sredstv khimizatsii s polivnoy vodoy* [Improved technology of introducing chemicals with irrigation water]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agrouniversity Complex: Science and Higher Education], no. 4(16), pp. 121-123. (In Russian).

10. Gzhibovsky S.A., 2015. *Sistema aerazol'nogo orosheniya KAU-1M dlya podderzhaniya mikroklimata v termicheski napryazhennyi period* [The KAU-1M aerosol irrigation system for microclimate control in thermally stressed period]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* [Machinery and Equipment for Rural Area], no. 6, pp. 25-27. (In Russian).

11. Lukyanets A.S., Bragin A.S., 2021. The impact of climate risks on Russia's economic development: example of the North Caucasian Federal District. *RUDN Journal of Economics*, vol. 29, no. 2, pp. 439-450, <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2021-29-2-439-450>.

12. Pavlova V.N., Varcheva S.E., 2017. *Otsenka klimaticheskikh riskov poter' urozhaya v regional'nykh sistemakh zemledeliya* [Assessment of climatic risks of the yield loss in regional crop production systems]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and Applied Climatology], vol. 3, pp. 122-132, DOI: 10.21513/2410-8758-2017-3-122-132. (In Russian).

13. Borodychev V.V., Lytov M.N., 2019. *Tekhniko-tekhnologicheskie osnovy regulirovaniya gidrotermicheskogo rezhima agrofitenozov v usloviyakh orosheniya* [Technical

and technological foundations for regulating the hydrothermal regime of agrophytocenosis under irrigation]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], vol. 14, no. 10(98), pp. 1484-1495, DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1484-1495. (In Russian).

14. Borodychev V.V., Lytov M.N., 2019. *Model' teploobmena v sisteme "agrofytotsenoz – okruzhayushchaya sreda" s regulyatorami* [Heat transfer model in the system "agrophytocenosis – environment" with regulators]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agrouniversity Complex: Science and Higher Education], no. 4(56), pp. 192-203, DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-24. (In Russian).

Информация об авторе

М. Н. Лытов – ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности директора филиала, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент.

Information about the author

M. N. Lytov – Leading Researcher, Acting Director of the Branch, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor.

Автор несет ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

The author is responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.07.2022; одобрена после рецензирования 12.10.2022; принята к публикации 20.10.2022.

The article was submitted 22.07.2022; approved after reviewing 12.10.2022; accepted for publication 20.10.2022.