

УДК 631.67.03:628.3:631.417.2

Релькина Валерия Алексеевна,
Магистрант, Волгоградский ГАУ

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ СТОЧНЫМИ ВОДАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ПОЛЯХ ОРОШЕНИЯ ДЛЯ ДЕПОНИРОВАНИЯ УГЛЕРОДА В АГРОСЕРЫХ ПОЧВАХ

Аннотация. В условиях нарастания дефицита пресной воды и необходимости выполнения международных обязательств по снижению углеродного следа, использование сточных вод (СВ) предприятий на сельскохозяйственных полях орошения (ЗПО) приобретает стратегическое значение. Однако существующие режимы орошения ориентированы исключительно на получение максимальной урожайности и не учитывают потенциал депонирования углерода. Настоящая статья посвящена обоснованию параметров оптимизации капельного орошения СВ для агросерых почв.

Ключевые слова: Капельное орошение, сточные воды, сельскохозяйственные поля орошения, депонирование углерода, агросерые почвы, эмиссия CO₂, биочар, климатически нейтральное земледелие.

Сельскохозяйственные поля орошения исторически рассматривались как инженерно-экологический комплекс для утилизации сточных вод и доочистки их в естественных условиях. Однако в современной парадигме ЗПО трансформируются из пассивных «приемников стоков» в активные управляемые агроэкосистемы, способные выполнять климаторегулирующие функции. Ключевой из них является секвестрация углерода – процесс перевода атмосферного углерода в устойчивые почвенные пулы [2, 8].

Агросерые почвы, широко распространенные в Нечерноземной зоне РФ, характеризуются невысоким естественным содержанием гумуса (1,5–2,5%) и подвержены деградации при интенсивной антропогенной нагрузке [10]. Применение сточных вод предприятий пищевой и животноводческой отраслей представляет интерес ввиду высокого содержания в них органического углерода и биогенных элементов.

Актуальность работы обусловлена сменой приоритетов: согласно Парижскому соглашению и Стратегии низкоуглеродного развития РФ до 2050 года, сельскохозяйственное землепользование должно обеспечивать нетто-поглощение парниковых газов. Оптимизация режимов капельного орошения СВ представляет собой малоизученный, но высокопотенциальный рычаг управления углеродным циклом.

Вопросы использования сточных вод для орошения активно разрабатываются научными школами Всероссийского НИИ орошаемого земледелия (ВНИИОЗ) и Волгоградского государственного аграрного университета. Под руководством академика РАН И.П. Кружилина и члена-корреспондента РАН В.В. Мелихова созданы научные основы комплексной мелиорации орошаемых земель, разработаны технологии управления водным и пищевым режимами почвы [1,4]. Профессор А.С. Овчинников и его школа развивают направления энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий капельного орошения и дождевания [7]. Однако регламентируемые показатели касаются преимущественно технической сохранности систем и агротехнической эффективности, но не экологических эффектов депонирования С.

Международные исследования последних лет демонстрируют двойственный эффект полива СВ. Обзор Т.Г. Карпанец с соавторами (2024) подтверждает, что промышленные сточные воды благодаря высокому содержанию рекальцитрантной органики обладают значительным потенциалом для связывания углерода в почве [2]. Однако работа U. Sahin, T. Sakmakci, C. Yerli (2023) фиксирует, что орошение очищенными сточными водами без



специальных мелиоративных приемов может увеличивать эмиссию CO₂ из почвы [5]. Это свидетельствует о том, что простое внесение стоков без оптимизации режима ведет к потере углерода в атмосферу, нивелируя эффект секвестрации.

Целью данной статьи является теоретическое обоснование и разработка принципов оптимизации режимов капельного орошения сточными водами, направленных на максимизацию депонирования углерода в агросерых почвах.

Депонирование углерода (C sequestration) в почвах ЗПО представляет собой разницу между поступлением органического углерода с поливной водой и его потерями вследствие минерализации, эмиссии в виде CO₂ и выноса с урожаем.

Традиционные режимы орошения (большие поливные нормы, поверхностные способы полива) создают условия аэробно-анаэробного градиента, стимулирующего деятельность микроорганизмов-деструкторов. Согласно исследованиям W. Sdiri с соавторами (2023), применение очищенных сточных вод при ручном поливе приводит к снижению содержания органического вещества в верхних горизонтах почвы вследствие активизации минерализации [3,9]. В то же время системы капельного орошения демонстрируют лучшие результаты по сохранению органического углерода и блокированию транслокации тяжелых металлов [9].

Критические параметры управления:

1. Влажность почвы (ω). При влажности выше 80% от наименьшей влагоемкости (НВ) в агросерых суглинках резко возрастает доля анаэробных процессов. Хотя эмиссия метана незначительна, продукция CO₂ увеличивается в 1,5–2 раза.

2. Качество стоков. СВ предприятий, в отличие от городских хозяйственных стоков, содержат больше лигнина, целлюлозы и жиров, что повышает их рекальцитрантность (устойчивость к разложению) и потенциал гумификации [2].

3. Температурный режим. Синхронизация поливов с периодами высокой температуры воздуха (выше +25°C) недопустима с точки зрения климатической повестки, так как коэффициент дыхания почвы (Q₁₀) увеличивается экспоненциально.

2. Техничко-технологические аспекты оптимизации капельного орошения. Капельное орошение, в особенности внутрипочвенное (подповерхностное), создает принципиально иную гидродинамику. Зона увлажнения локализована, миграция влаги происходит в капиллярной и пленочной форме, что способствует сорбции органических коллоидов на поверхности почвенных агрегатов.

2.1 Режимные параметры. Основой оптимизации должен стать отказ от «полива по дефициту» и переход к «импульсному» режиму с опорой на фундаментальные разработки научной школы академика И.П. Кружилина по управлению водным режимом почвы [7]:

1. Поливная норма. Рекомендуются снижение разовой поливной нормы на 30–40% по сравнению с дождеванием. Глубина промачивания не должна превышать глубину корнеобитаемого слоя (0,4–0,5 м для зерновых трав, 0,6–0,7 м для многолетников). Сброс воды за пределы ризосферы – прямой путь вымывания растворенного органического углерода (DOC) за пределы профиля.

2. Продолжительность межполивного периода. Необходимо поддержание влажности на уровне 65–70% НВ. Пересушка почвы (>55% НВ) ведет к гидрофобизации и затрудняет впитывание при последующем поливе, а переувлажнение – к анаэробнозису.

2.2. Гидравлический расчет и предочистка. Сточные воды предприятий требуют предварительной подготовки. Однако для целей депонирования углерода критически важна не механическая очистка, а сохранение лабильной органики. Мембранные биореакторы (MBR), обеспечивающие высокую степень очистки, эффективно удаляют патогены, но практически полностью элиминируют органический субстрат, необходимый для гумусообразования. Согласно международным исследованиям, перспективными технологиями с низким углеродным следом являются анаэробные реакторы с восходящим потоком (UASB) в сочетании с гибридными биоплато [2]. Отечественные разработки в области утилизации животноводческих стоков ведутся во ВНИИОЗ, где созданы научные основы применения органических удобрений в орошаемых севооборотах [4].



3. Биотическая регуляция эмиссии CO₂: роль мелиорантов. Данные последних лет убедительно доказывают, что чисто гидравлическая оптимизация (изменение норм и сроков полива) имеет ограниченный потенциал для снижения эмиссии CO₂. Ключевым решением является интеграция мелиоративных приемов непосредственно в режим орошения.

Исследование Sahin U., Sakmakci T., Yerli C. (2023) показало, что внесение биочара (пиролизованной соломы) из расчета 1,5% от массы почвы совместно с инокуляцией микоризными грибами (*Claroideoglossum etunicatum*) позволяет снизить эмиссию CO₂ на 45% по сравнению с контролем [5]. Авторы подчеркивают, что комбинация биочара с микоризой дает синергетический эффект, превосходящий изолированное применение этих агентов.

Механизм действия:

1. Сорбционный. Биочар обладает высокой удельной поверхностью и сорбирует легкодоступные органические кислоты, снижая скорость их потребления гетеротрофами.

2. Физический. Биочар улучшает структуру почвы: коэффициент структурности возрастает, поры аэрации оптимизируются, что снижает «парниковый» эффект от переуплотнения [5].

3. Физиологический. Микориза получает от растений фотоассимилянты (глюкозу), снижая потребность микрофлоры в разложении гумуса для получения энергии.

Для агросерых почв, характеризующихся повышенной кислотностью и невысоким содержанием органического вещества, данный агроприем представляется особенно актуальным. Важно подчеркнуть, что биочар также служит «инкубатором» для мицелия микоризы и адсорбирует тяжелые металлы, содержание которых в промышленных стоках может превышать фоновые значения.

4. Отечественный опыт и критерии оптимизации. В России накоплен значительный опыт использования сточных вод в орошаемом земледелии. В Волгоградском ГАУ под руководством профессора А.С. Овчинникова разрабатываются ресурсосберегающие режимы орошения сельскохозяйственных культур, в том числе с использованием животноводческих стоков [7]. Во ВНИИОЗ созданы концепции сохранения природно-ресурсного потенциала орошаемых земель и технологии экологически устойчивого функционирования орошаемых угодий [1, 4].

Вместе с тем, проблематика депонирования углерода в почвах ЗПО требует пересмотра традиционных критериев эффективности. Исследования Почвенного института им. В.В. Докучаева под руководством В.С. Столбового акцентируют внимание на необходимости разработки индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий, включая показатели, связанные с климатической повесткой [10]. Агросерые почвы, вовлекаемые в системы утилизации стоков, требуют особого нормирования антропогенной нагрузки.

Предлагаемые критерии оптимизации режима:

1. Экологический критерий: Минимизация коэффициента эмиссии (EF) – отношение массы выделенного C-CO₂ к массе внесенного C с поливной водой. Целевой показатель: EF < 0,4 достижим при совместном применении биочара и микоризы согласно [5].

2. Гидравлический критерий: Коэффициент равномерности полива (Christiansen) не ниже 0,9 при работе на сточных водах. Обеспечивается подбором капельниц с антивасоразрывающимися турбулентными вставками.

3. Агрохимический критерий: Поддержание соотношения C:N в стоках на уровне 10:1 – 15:1. Более узкое соотношение ведет к быстрой минерализации азота и денитрификации (потери N₂O), более широкое – к азотному голоданию микрофлоры и замедлению гумификации.

5. Перспективная схема реализации (Концепция «ЗПО 2.0»)

На основании проведенного анализа предлагается архитектура системы капельного орошения для ЗПО, ориентированная на депонирование углерода:

1. Блок предочистки: Анаэробный реактор (улавливание биогаза) + пруд-накопитель. Исключается глубокая доочистка, губительная для бактерий-агентов гумификации. Рекомендации базируются на анализе лучших доступных технологий с низким углеродным следом [2].



2. Блок кондиционирования: Инжекторный узел для внесения суспензии биочара. Внесение биочара целесообразно не разово, а дробно, с поливной водой в первый месяц вегетации для закрепления пула С.

3. Блок дозирования: Применение частотно-регулируемого привода насосных станций с обратной связью по датчикам влажности (тензиометрам) – направление, развиваемое в трудах волгоградской научной школы мелиораторов [7].

4. Блок фитоденитрификации: Использование многолетних трав (кострец безостый, люцерна) с развитой микоризной сетью. Однолетние пропашные культуры на ЗПО для целей секвестрации менее эффективны из-за частой обработки почвы и малого количества пожнивных остатков.

Оптимизация режимов капельного орошения сточными водами на сельскохозяйственных полях орошения представляет собой сложную многокомпонентную задачу, выходящую за рамки классической гидравлики. Для агросерых почв депонирование углерода не является автоматическим следствием полива стоками. Напротив, без должного управления водным и питательным режимами существует риск дегумификации за счет микробиологического «прайминг-эффекта».

Научная новизна подхода заключается в переходе от модели «утилизация + урожай» к модели «утилизация + углеродный сток + урожай». Доказано, что наибольший эффект достигается при комбинации:

- капельного способа полива (поддержание оптимума влажности без анаэробии);
- использования рекальцитрантных стоков промпредприятий с высоким содержанием лигнина;
- применения биочара и микоризных инокулянтов как обязательных элементов системы.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку региональных нормативов допустимой эмиссии CO₂ для ЗПО и включение почв агросерого типа в национальный реестр углеродных единиц. Необходима адаптация методологии Почвенного института им. В.В. Докучаева по оценке качества почв применительно к задачам климатически нейтрального землепользования [10].

Список литературы:

1. Кружилин И.П., Мелихов В.В. Концепция мелиорации сельскохозяйственных земель России: стратегия сохранения и восстановления природно-ресурсного потенциала орошаемых земель // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2020. – № 4. – С. 12-18.
2. Carpanez T.G., Moreira V.R., Assis I.R., Amaral M.C.S. Potential for nutrients reuse, carbon sequestration, and CO₂ emissions reduction in the practice of domestic and industrial wastewater recycling into agricultural soils: A review // Journal of Environmental Management. – 2024. – Vol. 370. – 122443. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122443.
3. Sdiri W., AlSalem H.S., Al-Goul S.T., Binkadem M.S., Ben Mansour H. Assessing the Effects of Treated Wastewater Irrigation on Soil Physico-Chemical Properties // Sustainability. – 2023. – Vol. 15 (7). – 5793. DOI: 10.3390/su15075793.
4. Мамин В.Ф., Новиков А.Е. Экологически устойчивые орошаемые агроландшафты: теория и практика конструирования // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 3 (63). – С. 45-54.
5. Sahin U., Cakmakci T., Yerli C. Biochar and mycorrhiza enhance soil carbon storage and reduce CO₂ emissions in wastewater-irrigated turf // Journal of Water and Climate Change. – 2023. – Vol. 14 (9). – P. 3280–3292. DOI: 10.2166/wcc.2023.270.
6. Овчинников А.С., Боровой Е.П., Ахмедов А.Д. Ресурсосберегающие режимы орошения сельскохозяйственных культур в Нижнем Поволжье // Мелиорация и водное хозяйство. – 2022. – № 2. – С. 22-27.



7. Григоров С.М., Ахмедов А.Д. Совершенствование технологий и способов управления водным режимом почв при капельном орошении // Природообустройство. – 2021. – № 1. – С. 34-40.

8. Corrêa M.M., Cavalcanti M.C., Primo D.C., Rolim Neto F.C., Martins J.M., Menezes R.S.C., Antonino A.C.D., Mendes I.S., Medeiros L.R.S. Wastewater reuse in irrigation: short-term effect on soil carbon and nitrogen stocks in Brazilian semi-arid region // Revista Ambiente & Água. – 2021. – Vol. 16 (1). – e2623. DOI: 10.4136/ambi-agua.2623.

9. Столбовой В.С., Гребенников А.М. База данных индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий РФ // Агрохимия. – 2021. – № 3. – С. 15-21. DOI: 10.31857/S0002188121030121.

10. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С. Ресурсный потенциал земель России для развития растениеводства // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 473. – № 2. – С. 218–221

