

Оригинальная статья / Original article
УДК 57.033:631.67.03
DOI: 10.18470/1992-1098-2019-3-61-70

Агроэкологическая оценка эффективности орошения томата электролизованной водой

Сергей Я. Семененко, Михаил Н. Лытов , Алексей Н. Чушкин, Елена И. Чушкина

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Россия

Контактное лицо

Михаил Н. Лытов, лаборатория почво-защитных технологий орошения и информационных систем управления водным режимом Поволжского научно-исследовательского института эколого-мелиоративных технологий – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»; 400012 Россия, г. Волгоград, ул. Трехгорная, 21.
Тел. +79275141788
Email LytovMN@ya.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

Формат цитирования: Семененко С.Я., Лытов М.Н., Чушкин А.Н., Чушкина Е.И. Агроэкологическая оценка эффективности орошения томата электролизованной водой // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14, N3. С. 61-70. DOI: 10.18470/1992-1098-2019-3-61-70

Получена 28 февраля 2019 г.
Прошла рецензирование 2 апреля 2019 г.
Принята 8 апреля 2019 г.

Резюме

Цель исследований состоит в том, чтобы дать количественные оценки агроэкологического ответа растений и биопродуктивности сельскохозяйственных культур на орошение с применением технологии электрохимической водоподготовки.

Материал и методы. Исследования проводили на примере томата (*Solanum lycopersicum*, гибрид Пинк Парадайз F1) в культуре защищенного грунта. Территориально опытный участок расположен в сухостепной зоне светлосерых почв Нижневолжского региона (48°56'46"N 44°51'45"E). В качестве варьируемых факторов эксперимента приняты величина электрохимически инициированного сдвига окислительно-восстановительного потенциала оросительной воды и варианты комбинации использования электрохимически обработанной воды.

Результаты. Установлено, что преимущественное влияние на оцениваемые биометрические показатели оказывает величина электрохимически инициированного сдвига окислительно-восстановительного потенциала оросительной воды: коэффициент вариации показателей по этому фактору достигал 9,5-38,0%. Влияние способа применения электрохимически обработанной воды оценивается 4,12-10,24%, а в отношении нетто-ассимиляции существенность действия этого фактора статистически не доказана. Наибольшие оценки линейного роста – 2,21 м, максимальной площади листьев – 43,4 тыс. м²/га, накопленной биомассы – 13,39 т/га, фотосинтетического потенциала – 3617 тыс. м² дн./га и биологической урожайности томата – 140,0 т/га, получены при совокупном использовании для проведения вегетационных поливов и фертигации католита с электрохимически инициированным сдвигом окислительно-восстановительного потенциала (-500) мВ.

Заключение. Исследованиями доказана статистическая значимость биометрического отклика растений томата на использование для проведения вегетационных и удобрительных поливов воды с электрохимически измененным окислительно-восстановительным потенциалом.

Ключевые слова

биометрические реакции, орошение, электрохимическая водоподготовка, биологическая продуктивность, томаты.

© 2019 Авторы. Юг России: экология, развитие. Это статья открытого доступа в соответствии с условиями Creative Commons Attribution License, которая разрешает использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии правильного цитирования оригинальной работы.

Agroecological assessment of the effectiveness of irrigation of tomato using electrolyzed water

Sergey Ya. Semenenko, Mikhail N. Lytov , Aleksey N. Chushkin and Elena I. Chushkina

Federal Research Centre for Agroecology, Integrated Land Improvement and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

Principal contact

Mikhail N. Lytov, Laboratory of Soil-protective Irrigation Technologies and Information Systems for Water Regime Management, Volga Scientific Research Institute of Ecological Reclamation Technologies, Federal Research Centre for Agroecology, Integrated Land Improvement and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences; 21 Trekhgornaya St, Volgograd, Russia 400012.

Tel. +79275141788

Email LytovMN@ya.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

How to cite this article

Semenenko S.Ya., Lytov M.N., Chushkin A.N., Chushkina E.I. Agroecological assessment of the effectiveness of irrigation of tomato using electrolyzed water. *South of Russia: ecology, development*. 2019, vol. 14, no. 3, pp. 61-70. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2019-3-61-70

Received 28 February 2019

Revised 2 April 2019

Accepted 8 April 2019

Abstract

Aim. The purpose of the research is to quantify the agroecological response of plants and the bio-productivity of crops to irrigation using electrochemical water treatment technology.

Material and Methods. The study was carried out using the tomato (*Solanum lycopersicum*, hybrid Pink Paradise F1) in a protected ground culture as an example. The experimental site is located in the dry-steppe zone of light chestnut soils of the Lower Volga region (48°56'46"N44°51'45"E). The magnitude of the electrochemically initiated shift of the redox potential of irrigation water and the options for combining the use of electrochemically treated water were taken as variable experimental factors.

Results. It was established that the magnitude of the electrochemically initiated shift of the redox potential of irrigation water has a predominant effect on the estimated biometric indicators: the coefficient of variation of the indicators for this factor reached 9.5-38.0%. The influence of the method of using electrochemically treated water is estimated at 4.12-10.24%, but regarding net assimilation the significance of this factor is not statistically proven. The highest estimates of linear growth – 2.21 m, maximum leaf area – 43.4 thousand m²/ha, accumulated biomass – 13.39 t/ha, photosynthetic potential – 3617 thousand m² days/ha and tomato biological yield – 140.0 t/ha, obtained by the combined use of a catholyte for vegetation and fertilizer irrigation with an electrochemically initiated shift of the redox potential (-500) mV.

Conclusion. The studies have proved the statistical significance of the biometric response of tomato plants to the use of water with electrochemically altered redox potential for vegetation and fertilizer irrigation.

Key Words

biometric reactions, irrigation, electrochemical water treatment, biological productivity, tomatoes.

ВВЕДЕНИЕ

Условия среды произрастания являются определяющими факторами формирования генотипа растений и биоценотического состава растительного сообщества, составляющего территориальный фитоценоз. Термин агрофитоценоз в полной мере соответствует общепринятому определению фитоценоза как «всякая совокупность растений на данном участке территории, находящаяся в состоянии взаимозависимости и характеризующаяся как определенным составом и строением, так и определенными взаимоотношениями со средой» [1], а приставка агро- используется для акцентирования преобладания одной или нескольких сельскохозяйственных культур. Есть и другая особенность – если природный фитоценоз подразумевает относительно стабильную для данной территории сообщество растений, то в агрофитоценозе такая стабильность под вопросом и достигается проведением комплекса агротехнических мероприятий [2-5]. Биологические нормы реакции сельскохозяйственных культур на проводимые агротехнические мероприятия определяют уровень их конкурентных преимуществ и эффективность, собственно, самих мероприятий [6-10]. Количественная оценка биологических норм реакций сельскохозяйственных культур является важным этапом исследований, направленных на создание устойчивых и высокопродуктивных агрофитоценозов.

В значительной части регионов России действенным фактором эффективного возделывания сельскохозяйственных культур являются гидротехнические мелиорации [11; 12]. В условиях засухи орошение является преобладающим типом гидротехнических мелиораций. Орошение, как самостоятельный фактор – один из самых мощных регуляторов агроэкологических условий произрастания сельскохозяйственных растений [13-15]. Технология электрохимической водоподготовки, обеспечивая регулирование pH и окислительно-восстановительного потенциала оросительной воды, позволяет не только увеличить интенсивность агротехнического воздействия, но и открывает новые возможности комплексного регулирования факторов жизни [16]. Биометрическое исследование агрофитоценозов, в этом плане, позволяет выявить пределы и особенности биологического воздействия осваиваемой технологии, изучить особенности морфологического развития растений, формирования общей и хозяйственной биопродуктивности. Цель исследований сводится к количественной оценке биометрических реакций растений и биопродуктивности сельскохозяйственных культур на орошение с применением технологии электрохимической водоподготовки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рабочей гипотезой исследований стало предположение о возможности использования известных агробиологических эффектов применения воды или водных растворов с электрохимически регулируемым окислительно-восстановительным потенциалом [16-21] для решения задач повышения продуктивности посевов и эффективности оросительных мелиораций при капельном орошении сельскохозяйственных культур. Новейшие технические достижения в области сращивания технических систем капельного орошения и систем электрохимической водоподготовки позволяют реализовать высоко-

точные, управляемые технологии по выработке и перемещению электрохимически обработанной воды с заданными характеристиками непосредственно в прикорневую зону растений [22]. Наряду с этим в основу технологии использования воды с электрохимически инициированным сдвигом окислительно-восстановительного потенциала должны быть положены конкретные количественные оценки ожидаемых агробиологических эффектов.

Исследования проводились на примере хозяйственно значимой для орошаемого земледелия юга России культуры томатов (*Solanum lycopersicum*). В качестве оценочных критериев приняты биометрические характеристики растений и хозяйственная биопродуктивность посевов, формируемые под влиянием искусственно создаваемых условий в рамках программы полевого эксперимента. Создание таких условий определяется необходимостью решения, как минимум двух базовых технологических задач:

- необходимостью оценки эффективных уровней изменения окислительно-восстановительного потенциала водных сред при поливе томатов капельным способом;
- необходимостью оценки способов применения воды с измененным окислительно-восстановительным потенциалом при поливе томатов капельным способом.

Постановка исследований в таком ключе определила закладку двухфакторного полевого эксперимента, в рамках фактора А которого изучались следующие варианты: А1 – контроль, с использованием водных сред, не прошедших электрохимическую обработку; А2 – использование для полива водных сред с электрохимически измененным окислительно-восстановительным потенциалом, характеризующимся на выходе из капельного водовыпуска (-100) мВ; А3 – (-500) мВ; А4 – (+500) мВ; А5 – (+800) мВ. В рамках фактора В (технологический фактор) изучались следующие варианты: В1 – проведение увлажнительных (вегетационных) поливов природной электрохимически обработанной водой; В2 – проведение удобрительных (фертигация) поливов растворами минеральных удобрений, приготовленных на основе природной электрохимически обработанной воды; В3 – проведение увлажнительно-удобрительных поливов с поочередной подачей природной электрохимически обработанной воды и растворов минеральных удобрений, приготовленных на основе природной электрохимически обработанной воды.

Экспериментальная часть работы выполнена на базе КФХ «Толочко Ф.Ю.» и лаборатории ПНИИЭМТ – филиала ФГБНУ «ФНЦ агроэкологии РАН». Территориально опытный участок расположен в сухостепной зоне светло-каштановых почв Нижневолжского региона (48°56'46" N 44°51'45" E). Почвы опытного участка типичные, среднесуглинистые, с содержанием 1,2% гумуса в пахотном слое. Мелиоративное состояние почвы удовлетворительное, содержание натрия не превышает 1,2% от емкости поглощающего комплекса. Варианты опыта были заложены в индивидуальных тепличных блоках. Тепличные блоки представлены облегченными легковозводимыми конструкциями весенних пленочных теплиц с возможностью регулирования радиационного

режима на основе использования современных нетканых укрытий.

Материалами исследований явились результаты эксперимента, реализованного в 2016, 2017 и 2018 гг. по первому (весенне-летнему) обороту томатов Пинк Парадайз F1. Гибрид районированный, ранее хорошо зарекомендовавший себя в хозяйстве, получил широкое распространение в производственных организациях региона.

В основу конструкций капельного орошения на опытном участке была положена используемая в хозяйстве система. Общая протяженность водоподводящих трубопроводов системы – 40 м, длина капельной линии – 50 м, капельные водовыпуски некомпенсированные производительностью 2,6 л/час. Комплекс водоподготовки на опытном участке выполнен по территориально разнесенной схеме, что предполагает установку модуля электрохимической обработки воды в качестве самостоятельного функционального узла.

Мониторинг показателей активности ионов водорода (рН) и окислительно-восстановительного потенциала электрохимически обработанной воды организован в форме систематических измерений на выходе из установки-электролизера, а также на капельных водовыпусках в начале, середине и конце поливного трубопровода. Для измерения показателей-характеристик электрохимически обработанной воды и приготовленных на ее основе растворов использовался профессиональный рН/ОВП метр с магнитной мешалкой АМТ 10.

Биометрические учеты в посевах проводили систематически с учетом фенологического развития томатов. В соответствии с требованиями общепринятых методик [23; 24] за начало новой фазы фенологического развития принимали ту дату, когда признаки-характеристики фазы наблюдались у 10% растений. Полное наступление фенологической фазы регистрировалось тогда, когда признаки-характеристики фазы наблюдались у 75% растений. Учетные делянки по площади опытного участка заложены в четырех повторениях [25]. Для накопления статистического материала, повышения точности эксперимента и полученных результатов линейные измерения проводили по 25 типичным растениям на каждой из опытных делянок. Учет площади листьев методом высечек [24; 26] и сухой биомассы проводили по одним и тем же биологическим образцам, сформированным из 15 типичных растений по каждому варианту. Определение суточных приростов органического вещества, нетто-ассимиляции и фотосинтетического потенциала посева проводили расчетным методом. В основу биометрического анализа результатов эксперимента положен метод дисперсионного анализа [27; 28].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка реакции томатов на изменение агроэкологических условий выращивания, связанных с применением вегетационных и удобрительных поливов воды с электрохимически измененным окислительно-восстановительным потенциалом, проводилась по ряду показателей статистической биометрии – динамических и аллометрических характеристик, дающих ясное представление об особенностях продукционного процесса. Анализ проводился с такими биометрическими оценками, как линейный рост томатов, максимальная площадь сфор-

мированного ассимиляционного аппарата, сухая биомасса посева, с динамической оценкой суточного накопления органического вещества, нетто-ассимиляции и фотосинтетического потенциала посева. Каждый из этих показателей имеет тесную корреляционную связь с урожайностью томатов в онтогенезе и характеризует определенные стороны продукционного процесса, важные с точки зрения формирования итогового результата.

Исследования показали, что наибольшие значения линейных отметок высоты растений у томатов формируются уже в период активного плодоношения. Результаты измерений, проведенных в этот период, отличались наибольшей вариабельностью значений по вариантам опыта. Общий диапазон варьирования данных по линейному росту растений, обусловленный особенностями развития томатов при использовании для полива воды, прошедшей электрохимическую водоподготовку, в опытах характеризовался диапазоном 1,77-2,21 м (табл. 1).

Средняя выборочная высота растений по всей совокупности вариантов опыта составила 1,93 м, что типично для используемого в опытах гибрида. Наибольшая вариабельность признака получена по фактору А, то есть в зависимости от величины электрохимически обусловленного сдвига окислительно-восстановительного потенциала оросительной воды. Стандартное отклонение средней высоты томатов по фактору достигало 0,44 м, а коэффициент вариации признака составил 22,8%. В значительно меньшей степени высота томатов изменялась в зависимости от способа применения электрохимически обработанной воды: коэффициент вариации не превышал 4,12%, что было сравнимо с коэффициентом вариации признака по взаимодействию факторов – 4,98%.

Анализ опытного материала показал, что взаимодействие факторов относительно рассматриваемого признака выражается в следующем: при использовании католита наибольшие эффекты получены в мероприятиях с фертигацией (с приготовлением водных растворов удобрений на основе электрохимически обработанной воды) и при совокупном использовании католита для поливов и фертигации. При использовании анолита наибольшим ростом отличались растения, где электрохимически обработанная вода использовалась только для проведения вегетационных поливов. Фертигация на основе анолита, напротив, оказала наиболее сдерживающее влияние на линейный рост томатов.

Листовая поверхность является одним из наиболее пластичных, варьируемых морфометрических показателей, а ее формирование тесно сопряжено с адаптивными функциями растений. Максимальные значения площади листьев томата формировались к 20-му дню плодоношения с общим диапазоном варьирования выборки 34,7-43,4 тыс. м²/га. Выборочная средняя площадь листьев по всей совокупности вариантов опыта составляет 38,4 тыс. м²/га, что выше максимальной площади листьев на контрольном варианте – 37,8 тыс. м²/га (табл. 1). Это свидетельствует об общем положительном эффекте применения воды с электрохимически измененным окислительно-восстановительным потенциалом. Вариационная оценка результатов биометрических измерений подтвердила статистически значимое влияние факторов А и В, а также их

взаимодействия на развитие листового аппарата томатов. Выделенный коэффициент вариации площади листьев томата по фактору А составил 21,7%, по фактору В – 10,2%, по взаимодействию факторов – 7,2%. Это свидетельствует о преимущественном влиянии уровня электрохимически инициированного сдвига окислительно-восстановительного потенциала оросительной воды, но также подтверждает и значимость способа

использования подготовленной воды, а также указывает на необходимость учета взаимодействия факторов. Посевы с наибольшей площадью листьев, 43,4 тыс. м²/га, формировались при совокупном использовании католита с окислительно-восстановительным потенциалом (-500) мВ для проведения вегетационных поливов и фертигации.

Таблица 1. Статистические биометрические параметры ценоза томата при капельном орошении водой с электрохимически регулируемым окислительно-восстановительным потенциалом (выборка 2016-2018 гг.)
Table 1. Statistical biometric parameters of tomato census under drip irrigation with water with electrochemically controlled redox potential (2016-2018)

Controlled redox potential (2010-2016)										
Фактор А Factor A	Фактор В Factor B			Среднее Average	Статистика показателя Statistics					
	B1	B2	B3		Фактор Factor	Фактор Factor	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation	Отношение дисперсий Ratio of dispersions	
Линейный рост, м Linear growth, m										
A1	1,87	1,87	1,87	1,87	A	0,44	22,81	213,9	<0,01	
A2	1,92	1,98	2,00	1,97						
A3	2,07	2,11	2,21	2,13						
A4	1,85	1,83	1,84	1,84	B	0,08	4,12	7,0	<0,01	
A5	1,89	1,77	1,81	1,82						
Среднее Average	1,92	1,91	1,95	1,93	AB	0,1	4,98	10,2	<0,01	
HCP ₀₅ LSD ₀₅	A = 0,021			B = 0,016			AB = 0,026			
Площадь листьев, м ² /га Leaf area, m ² /ha										
A1	37,8	37,8	37,8	37,8	A	8,33	21,68	225,2	<0,01	
A2	38,5	38,5	39,2	38,7						
A3	41,4	41,4	43,4	42,1						
A4	35,9	34,7	35,5	35,4	B	3,94	10,24	50,3	<0,01	
A5	40,7	34,7	39,2	38,2						
Среднее Average	38,9	37,4	39,0	38,4	AB	2,77	7,22	25,1	<0,01	
HCP ₀₅ LSD ₀₅	A = 0,38			B = 0,30			AB = 0,66			
Сухая биомасса, т/га Dry biomass, t/ha										
A1	10,44	10,44	10,44	10,44	A	3,40	30,78	381,5	<0,01	
A2	10,81	11,02	11,29	11,04						
A3	12,27	12,56	13,39	12,74						
A4	10,42	10,30	10,36	10,36	B	0,85	7,66	23,6	<0,01	
A5	11,36	9,95	10,68	10,66						
Среднее Average	11,06	10,85	11,23	11,05	AB	0,85	7,67	23,7	<0,01	
HCP ₀₅ LSD ₀₅	A = 0,12			B = 0,09			AB = 0,21			

Средняя выборочная по сухой биомассе томатов в опытах определилась на уровне 11,05 т/га и это на 0,61 т/га больше биомассы томатов на контроле, где поливы проводили природной оросительной водой. Стандартное отклонение значений накопленной биомассы по фактору А составило 3,4 т/га, а коэффициент выделенных вариаций по этому же фактору достигал 30,8%. Эти показатели в полной мере характеризуют существенную зависимость сформированной посевами биомассы от величины электрохимически иницииро-

ванного сдвига окислительно-восстановительного потенциала оросительной воды. По фактору В, реализованному в способах применения прошедшей электрохимическую обработку оросительной воды, стандартное отклонение биомассы томата составило 0,85 т/га с коэффициентом вариации 7,7%. Численно равный эффект отмечен и по взаимодействию изучаемых факторов, которые проявлялись в эффективности одних способов применения католита и других способов по анолиту.

Динамические биометрические параметры наряду со статистическими позволяют оценить популяционную конкурентоспособность растений, продукционный потенциал генотипа и нормы реакции на изменения агроэкологических условий произрастания (табл. 2). Оценка вариабельности динамики суточного накопления сухой биомассы томатов показала преимущественное влияние величины электрохимически обусловленного сдвига окислительно-восстановительного

потенциала оросительной воды. Величина стандартного отклонения средних суточных приростов сухой биомассы по этому фактору составила 15,47 кг/га в сут., а коэффициент вариации (16,4%) почти в три раза превышал уровень вариабельности, выделенной в рамках фактора В (6,2%). Коэффициент вариации значений среднесуточного накопления сухой биомассы, обусловленный взаимодействием факторов, составил 4,8%.

Таблица 2. Динамические биометрические параметры ценоза томата при капельном орошении водой с электрохимически регулируемым окислительно-восстановительным потенциалом (выборка 2016-2018 гг.)

Table 2. Dynamic biometric parameters of tomato cenosis under drip irrigation with water with electrochemically controlled redox potential

Фактор А Factor A	Фактор В Factor B			Среднее Average	Статистика показателя Statistics				
	B1	B2	B3		Фактор Factor	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation	Отношение дисперсий Ratio of dispersions	Статистическая значимость Statistical significance
Суточное накопление органического вещества, кг/га / Daily accumulation of organic matter, kg/ha									
A1	90,9	90,9	90,9	90,9	A	15,47	16,44	163,50	<0,01
A2	93,3	94,2	95,7	94,4					
A3	100,0	100,8	104,0	101,6	B	5,82	6,18	23,1	<0,01
A4	91,4	89,5	90,8	90,6					
A5	97,2	88,0	94,5	93,2	AB	4,56	4,84	14,2	<0,01
Среднее Average	94,6	92,7	95,2	94,1					
Нетто-ассимиляция, г/м ² в сут. / Net assimilation, g/m ² per day									
A1	3,67	3,67	3,67	3,67	A	0,36	9,56	70,40	<0,01
A2	3,68	3,68	3,69	3,68					
A3	3,65	3,65	3,65	3,65	B	0,01	0,27	0,1	0,94
A4	3,87	3,85	3,86	3,86					
A5	3,85	3,87	3,83	3,85	AB	0,02	0,6	0,3	0,96
Среднее Average	3,74	3,74	3,74	3,74					
Фотосинтетический потенциал, тыс. м ² дн./га / Photosynthetic potential, thousand m ² days/ha									
A1	2799	2799	2799	2799	A	1105	38,01	822,00	<0,01
A2	2890	2945	3010	2948					
A3	3315	3396	3617	3443	B	227	7,81	34,7	<0,01
A4	2645	2628	2636	2636					
A5	2903	2525	2739	2722	AB	226	7,77	34,4	<0,01
Среднее Average	2910	2859	2960	2910					

Средние значения нетто-ассимиляции за вегетационный период томата изменялись по вариантам от 3,65 до 3,87 г/м² в сут. Вариационный анализ средних значений нетто-ассимиляции показал существенное, статистически доказанное влияние только одного из изучаемых фактора – величины электрохимически обусловленного сдвига окислительно-восстановительного потенциала оросительной воды. Соотношение дисперсий показателя по фактору и ошибки составило 70,4, тогда как для фактора В (способ применения электрохимически обработанной оросительной воды) и взаимодействия факторов оказалось меньше единицы. Коэффициент вариации нетто-ассимиляции по фактору А не превышал 9,56%. В отличие от динамики прочих биометрических показателей величина

нетто-ассимиляции имела выраженный тренд к снижению значений при использовании католита и увеличению при использовании для полива анолита.

Фотосинтетический потенциал оказался значительно более пластичной величиной, нежели нетто-ассимиляция томатов (табл. 2). Результаты вариационного анализа опытных данных подтвердили статистическую значимость влияния изучаемых факторов, а также их взаимодействия на уровне менее 0,01. Наибольшая вариабельность фотосинтетического потенциала томатов была отмечена по фактору А, характеризующего влияние величины электрохимически обусловленного сдвига окислительно-восстановительного потенциала оросительной воды. Коэффициент вариации показателя по этому фактору достигал

38,0%, а стандартное отклонение фотосинтетического потенциала составило 1105 тыс. м² дн./га. Коэффициент вариации фотосинтетического потенциала по фактору способа применения электрохимически обработанной оросительной воды составил 7,8%, а стандартное отклонение – 227 тыс. м² дн./га, что более чем в 4 раза меньше, чем по фактору А. Анализ опытного материала также показал существенное влияние взаимодействия факторов, характеризующееся коэффициентом вариации опытных значений фотосинтетического потенциала – 7,7%.

Суммарно за вегетационный период опытными посевами томата накапливалось 2525-3617 тыс. м² дн./га фотосинтетического потенциала, причем наибольшие из приведённого диапазона значения были получены в варианте, где электрохимически обработанная вода в форме католита (-500) мВ использовалась комплексно для проведения вегетационных поливов и фертигации.

Таким образом, биометрический отклик развития томатов на использовании при орошении воды с

электрохимически изменённым окислительно-восстановительным потенциалом практически по всех оцениваемых показателях статистически значим и имеет существенное количественное выражение. Преимущественное влияние на оцениваемые биометрические показатели оказывает величина электрохимически инициированного сдвига окислительно-восстановительного потенциала воды, используемой для орошения и фертигации томатов. Наибольшие оценки линейного роста томата – 2,21 м, максимальной площади сформированного ассимиляционного аппарата – 43,4 тыс. м²/га, сухой биомассы – 13,39 т/га, суточных приростов органического вещества – 104 кг/га в сут. и фотосинтетического потенциала – 3617 тыс. м² дн./га, получены при комплексном использовании воды с электрохимически изменённым окислительно-восстановительным потенциалом (-500) мВ для проведения вегетационных поливов и фертигации. Установлено, что этим же сочетанием факторов обеспечивается и формирование наибольшего хозяйственного урожая томатов (табл. 3).

Таблица 3. Биологическая урожайность томата при капельном орошении водой с электрохимически регулируемым окислительно-восстановительным потенциалом, т/га

Table 3. Biological yield of tomatoes using drip irrigation with water with electrochemically controlled redox potential, t/ha

Фактор А Factor A	Фактор В Factor B	Урожайность, т/га Yield, t/ha			Средняя Average
		2016	2017	2018	
A1	B1-B3	109,8	103,8	114,8	109,5
A2	B1	115,2	109,3	118,1	114,2
A2	B2	116,9	110,0	120,4	115,8
A2	B3	119,3	113,9	122,7	118,6
A3	B1	129,9	126,9	134,5	130,4
A3	B2	132,4	129,8	136,4	132,9
A3	B3	140,5	133,1	146,5	140,0
A4	B1	112,4	107,4	115,2	111,7
A4	B2	105,2	103,9	114,5	107,9
A4	B3	111,2	107,1	114,3	110,9
A5	B1	117,2	115,7	126,3	119,7
A5	B2	106,1	104,5	110,1	106,9
A5	B3	113,9	109,5	118,7	114,0
HCP ₀₅	A	2,78	2,52	3,38	3,11
LSD ₀₅	B	2,15	1,95	2,62	2,41
	AB	4,81	4,36	5,86	5,39

Биологическая урожайность томатов при использовании католита (-500) мВ для проведения вегетационных и удобрительных поливов составила, в среднем, 140,0 т/га, с вариацией по годам исследований – от 133,1 до 146,5 т/га, что на 30,6 т/га или 27,9% больше, чем при использовании для полива и фертигации природной оросительной воды. Также заслуживает внимания вариант, где католит (-500) мВ используется только для проведения удобрительных поливов. Урожайность томатов здесь ниже максимальной и составляет, в среднем, 132,9 т/га. Однако электрохимическая водоподготовка требуется для несопоставимо меньшего объема оросительной воды. Это позволяет сэкономить на затрачиваемых ресурсах и получить приемлемый результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены вариационные характеристики и доказана

статистическая значимость биометрических реакций томата на применение для полива воды с электрохимически изменённым окислительно-восстановительным потенциалом. Установлено преимущественное значение величины электрохимически инициированного сдвига окислительно-восстановительного потенциала в формировании вариальности биометрических показателей, с формированием коэффициента вариации от 9,56% по выборке нетто-ассимиляции томатов до 38,0% по выборке фотосинтетического потенциала. Влияние способа применения электрохимически обработанной воды, представленного в опыте тремя технологическими направлениями (орошение, фертигация, комплексное использование для проведения вегетационных и удобрительных поливов), оценивается – 4,12-10,24%, а в отношении нетто-ассимиляции существенность действия этого фактора статистически не доказана. Отмечена существенность взаимодействия изучае-

мых факторов, которое физически выражается разнонаправленным вектором эффективности способов применения католита и анолита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сукачев В.Н. Избранные труды. Проблемы фитоценологии / под ред. Е.М. Лавренко. Л.: Наука, 1975. Т. 3. 543 с.
2. Shennan C. Biotic interactions, ecological knowledge and agriculture // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2008. V. 363. Iss. 1492. P. 717-739. Doi: 10.1098/rstb.2007.2180
3. Izaurralde R.C., Williams J.R., McGill W.B., Rosenberg N.J., Jakas M.C.Q. Simulating soil dynamics with epic: model description and testing against long-term data // *Ecological Modelling*. 2006. V. 192. Iss. 3-4. P. 362-384. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.010
4. Бойко А.П. Агроценоз как элемент антропогенеза почв: монография. Уссурийск: ФГОУ ВПО Приморская ГСХА, 2003. 114 с.
5. Тарханов О.В. Экология и агроценоз. Как превратить экосистему "Сельское хозяйство" в устойчивый базис государства // *Экология и жизнь*. 2011. N 2. С. 12-19.
6. Филатов Г.В., Шевченко В.Е., Верзилина Н.Д. Физиологическая генетика продукционных процессов сельскохозяйственных растений. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет, 2003. 249 с.
7. Murren C.J., Maclean H.J., Diamond S.E., Steiner U.K., Heskell M.A., Handelsman C.A., Ghalambor C.K., Auld J.R., Callahan H.S., Pfennig D.W., Relyea R.A., Schlichting C.D., Kingsolver J. Evolutionary change in continuous reaction norms // *The American Naturalist*. 2014. V. 183. Iss. 4. P. 453-467. Doi: 10.1086/675302
8. Vítolo H.F., Souza G.M., Silveira J.A.G. Cross-scale multivariate analysis of physiological responses to high temperature in two tropical crops with C₃ and C₄ metabolism // *Environmental and Experimental Botany*. 2012. V. 80. P. 54-62. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2012.02.002
9. Del Río LA ROS and RNS in plant physiology: an overview // *Journal of Experimental Botany*. 2015. V. 66. Iss. 10. P. 2827-2837. Doi: 10.1093/jxb/erv099
10. Маляровская В.И. Изменчивость морфометрических признаков у натурализовавшихся и культированных растений *Hydrangea macrophylla* Ser. в зависимости от экологических условий // *Сельскохозяйственная биология*. 2015. Т. 50, N 1. С. 92-98. Doi: 10.15389/agrobiology.2015.1.92rus
11. Айдаров И.П. Эколого-экономическая эффективность мелиораций сельхозугодий // *Экономика сельского хозяйства России*. 2011. N 9. С. 77-89.
12. Аверьянов С.Ф. Управление водным режимом мелиорируемых сельскохозяйственных земель: монография. Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. 542 с.
13. Man J., Shi Y., Yu Z., Zhang Y. Root growth, soil water variation, and grain yield response of winter wheat to supplemental irrigation // *Plant Production Science*. 2016. V. 19. Iss. 2. P. 193-205. Doi: 10.1080/1343943X.2015.1128097
14. Rinaldi M., He Z. Chapter Six - Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture // *Advances in Agronomy*. 2014. V. 123. P. 229-279. Doi: 10.1016/B978-0-12-420225-2.00006-6
15. da Silva C.R., Folegatti M.V., da Silva T.J.A., Alves Júnior J., Souza C.F., Ribeiro R.V. Water relations and photosynthesis as criteria for adequate irrigation management in 'Tahiti' lime trees // *Scientia Agricola*. 2005. V. 62. N 5. P. 415-422. Doi: 10.1590/S0103-90162005000500001
16. Semenenko S., Lytov M., Borodychev V., Ivantsova E. Yielding capacity and quality of tomato fruits at drip irrigation with water with modified oxidation-reduction potential // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM* 15th. 2015. P. 1055-1062.
17. Пасько О.А. Рост и развитие растений, стимулированных электрохимически активированной водой // *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.П. Филиппова*. 2010. N 3 (20). С. 54-59.
18. Егоров В.В., Кордонская М.А., Кондаков А.М. Зависимость скорости бимолекулярной реакции в активированной воде от концентрации и температуры // *Ветеринария, зоотехния и биотехнология*. 2015. N 10. С. 65-67.
19. Судаченко В.Н., Маркова А.Е., Иванова И.И. Эффективность использования растворов минеральных удобрений на активированной воде в условиях защищенного грунта // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2003. N 74. С. 110-118.
20. Кожокару А.Ф., Кожокару Н.Л. Механизмы действия электрохимически активированных растворов и воды на скорость прорастания семян // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2008. N 12. С. 27-40.
21. Александрова Э.А., Шрамко Г.А., Князева Т.В. Совершенствование технологии некорневой подкормки озимой пшеницы с применением электрохимически активированной воды // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2011. N 33. С. 69-72.
22. Семененко С.Я., Чушкин А.Н., Лытов М.Н., Чушкина Е.И. Проектирование систем капельного орошения с модулем электрохимической активации воды. Волгоград: ФНЦ «Агроэкологии РАН», 2018. 182 с.
23. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1983. 351 с.
24. Литвинов С.С. Методика полевого опыта в овощеводстве. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства, 2011. 648 с.
25. Кузнецова Е.И., Алещенко М.Г., Закабунина Е.Н. Методы полевых, вегетационных и лизиметрических исследований в агрономии. Москва: ФГОУ ВПО РГАУ, 2010. 130 с.
26. Авдеев В.И. Современные методы биометрии в исследовании растений. Оренбург: Оренбургский государственный аграрный университет, 2015. 128 с.
27. Атраментова Л.А., Утевская О.М. Статистические методы в биологии. Горловка: «Видавництво Ліхтар», 2008. 248 с.
28. Rao G. Nageswara. Statistics for Agricultural Sciences. BS Publications, 2007. 466 p.

REFERENCES

1. Sukachev V.N. *Izbrannye trudy. Problemy fitotsenologii* [Selected Works. Phytocenology problems]. Leningrad, Nauka Publ., 1975, vol. 3, 543 p. (In Russian)
2. Shennan C. Biotic interactions, ecological knowledge and agriculture. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, vol. 363, iss. 1492, pp. 717-739. Doi: 10.1098/rstb.2007.2180

3. Izaurralde R.C., Williams J.R., McGill W.B., Rosenberg N.J., Jakas M.C.Q. Simulating soil C dynamics with epic: model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 2006, vol. 192, iss. 3-4, pp. 362-384. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.010
4. Boyko A.P. *Agrotsenoz kak element antropogeneza pochv* [Agrocenosis as an element of soil anthropogenesis]. Ussuriisk, Primorskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya Publ., 2003, 114 p. (In Russian)
5. Tarkhanov O.V. Ecology and agrocenosis. How to transform the ecosystem "rural economy" into a stable basis of the country. *Ekologiya i zhizn'* [Ecology and Life]. 2011, no. 2, pp. 12-19. (In Russian)
6. Filatov G.V., Shevchenko V.E., Verzhilina N.D. *Fiziologicheskaya genetika produktsionnykh protsessov sel'skokhozyaystvennykh rastenii* [Physiological genetics of production processes of agricultural plants]. Voronezh, VSAU Publ., 2003, 249 p. (In Russian)
7. Murren C.J., Maclean H.J., Diamond S.E., Steiner U.K., Heskell M.A., Handelsman C.A., Ghalambor C.K., Auld J.R., Callahan H.S., Pfennig D.W., Relyea R.A., Schlichting C.D., Kingsolver J. Evolutionary change in continuous reaction norms. *The American Naturalist*, 2014, vol. 183, iss. 4, pp. 453-467. Doi: 10.1086/675302
8. Vítolo H.F., Souza G.M., Silveira J.A.G. Cross-scale multivariate analysis of physiological responses to high temperature in two tropical crops with C₃ and C₄ metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, vol. 80, pp. 54-62. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2012.02.002
9. Del Río LA ROS and RNS in plant physiology: an overview. *Journal of Experimental Botany*, 2015, vol. 66, iss. 10, pp. 2827-2837. Doi: 10.1093/jxb/erv099
10. Malyarovskaya V.I. Variability of morphometric parameters in naturalized and cultivated *Hydrangea macrophylla* Ser. plants under different environmental conditions. *Agricultural Biology*, 2015, vol. 50, no. 1, pp. 92-98. (In Russian) Doi: 10.15389/agrobiology.2015.1.92rus
11. Aydarov I.P. Ecological and economic efficiency of farmland reclamation. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii* [Economics of Agriculture of Russia]. 2011, no. 9, pp. 77-89. (In Russian)
12. Aver'yanov S.F. *Upravleniye vodnym rezhimom melioruyemykh sel'skokhozyaystvennykh zemel'* [Water management of reclaimed agricultural land]. Moscow, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy Publ., 2015, 542 p. (In Russian)
13. Man J., Shi Y., Yu Z., Zhang Y. Root growth, soil water variation, and grain yield response of winter wheat to supplemental irrigation. *Plant Production Science*, 2016, vol. 19, iss. 2, pp. 193-205. Doi: 10.1080/1343943X.2015.1128097
14. Rinaldi M., He Z. Chapter Six - Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture. *Advances in Agronomy*, 2014, vol. 123, pp. 229-279. Doi: 10.1016/B978-0-12-420225-2.00006-6
15. da Silva C.R., Folegatti M.V., da Silva T.J.A., Alves Júnior J., Souza C.F., Ribeiro R.V. Water relations and photosynthesis as criteria for adequate irrigation management in 'Tahiti' lime trees. *Scientia Agricola*, 2005, vol. 62, no. 5, pp. 415-422. Doi: 10.1590/S0103-90162005000500001
16. Semenenko S., Lytov M., Borodychev V., Ivantsova E. Yielding capacity and quality of tomato fruits at drip irrigation with water with modified oxidation-reduction potential. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th, 2015, pp. 1055-1062.
17. Pasko O. Growth and development of plants, stimulated electrochemically activated water. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii imeni V.R. Filippova* [Bulletin of Buryat State Academy of Agriculture]. 2010, no. 3 (20), pp. 54-59. (In Russian)
18. Egorov V.V., Kordonskaya M.A., Kondakov A.M. The dependence of bimolecular reaction in activated water on concentration and temperature. *Veterinariya, zootekhniya i biotekhnologiya* [Veterinary, zoo and biotechnology]. 2015, no. 10, pp. 65-67. (In Russian)
19. Sudachenko V.N., Markova A.E., Ivanova I.I. [Efficiency of use of mineral fertilizer solutions on activated water in protected ground conditions]. In: *Tekhnologii i tekhnicheskkiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva* [Technologies and technical means of mechanized production of plant and animal production]. 2003, no. 74, pp. 110-118. (In Russian)
20. Cojocar A.F., Cojocar N.L. Mechanisms of Action of Electrochemically Activated Solutions and Water on the Germination Rate of Seeds. *Biomeditsinskaya radioelektronika* [Biomedical Radioelectronics]. 2008, no. 12, pp. 27-40. (In Russian)
21. Aleksandrova E.A., Shramko G.A., Knyazeva T.V. Improvement of foliar feeding of winter wheat using electrochemically activated water. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Kuban State Agrarian University]. 2011, no. 33, pp. 69-72. (In Russian)
22. Semenenko S.Ya. Chushkin A.N., Lytov M.N., Chushkina E.I. *Proyektirovaniye sistem kapel'nogo orosheniya s modulem elektrokhimicheskoy aktivatsii vody* [Design of drip irrigation systems with water electrochemical activation module]. Volgograd, Agroecology of RAS Publ., 2018, 182 p. (In Russian)
23. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Field experience]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1983, 351 p. (In Russian)
24. Litvinov S.S. *Metodika polevogo opyta v ovoshchevodstve* [Methods of field experience in vegetable growing]. Moscow, All-Russian Scientific Research Institute of Horticulture Publ., 2011, 648 p. (In Russian)
25. Kuznetsova E.I., Aleshchenko M.G., Zakabunina E.N. *Metody polevykh, vegetatsionnykh i lizimetricheskikh issledovaniy v agronomii* [Methods of field, vegetation and lysimetric studies in agronomy]. Moscow, Russian Agrarian Correspondence University Publ., 2010, 130 p. (In Russian)
26. Avdeev V.I. *Sovremennyye metody biometrii v issledovanii rasteniy* [Modern methods of biometrics in the study of plants]. Orenburg, Orenburg state agrarian university Publ., 2015, 128 p. (In Russian)
27. Atramentova L.A., Utevskaia O.M. *Statisticheskiye metody v biologii* [Statistical methods in biology]. Gorlovka, «Vidavnistvo Likhtar» Publ., 2008, 248 p. (In Russian)
28. Rao G. Nageswara. *Statistics for Agricultural Sciences*. BS Publications, 2007, 466 p.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Сергей Я. Семененко, Михаил Н. Лытов, Алексей Н. Чушкин, Елена И. Чушкина получили и проанализировали экспериментальные данные, написали рукопись и представили фактический материал.
Все авторы несут ответственность за обнаружение плагиата и самоплагиата.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Sergey Ya. Semenenko, Mikhail N. Lytov, Aleksey N. Chushkin and Elena I. Chushkina gathered and analyzed experimental data, provided factual material and wrote the text.
All authors are equally responsible for detecting plagiarism and self-plagiarism and for other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors state that there is no conflict of interest.