УДК 63.001.12/.18

DOI: 10.31563/1684-7628-2018-47-3-73-79

В.С. Нестяк, С.Ф. Усольцев, О.В. Ивакин, В.П. Косьяненко, Р.В. Рыбаков, В.А. Патрин

К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР (НА ПРИМЕРЕ ТОМАТОВ)

Ключевые слова: *открытый грунт; овощные культуры; защитные экраны; производственный процесс; лимитирующий фактор; фитомониторинг; приборное обеспечение.*

Введение. В Западной Сибири для выращивания плодовых овощных культур (томаты, перец, баклажаны), требовательных к теплу, пригодны только южные районы Алтайского края и Омской области, граничащие с Казахстаном. В остальных районах степной и лесостепной зоны теплообеспеченность периода вегетации этих культур соответствует нижнему пределу биологических требований и их производство связано с большими рисками. Другие климатические зоны Сибири для выращивания овощей этой группы в открытом грунте непригодны из-за недостатка тепла [1, 2]. Вследствие противоречий между биологическими требованиями растений к условиям выращивания и зональными климатическими условиями (в частности, коротким вегетационным периодом, ограниченным первыми осенними заморозками в конце июля – начале августа и последними весенними возвратными заморозками в конце мая – начале июня) большая часть плодов не успевает созреть, что делает неэффективным их товарное производство. Изменить состояние среды обитания и приблизить его к требованиям растений можно путем воздействия на них различных технологических процессов или технических средств. В частности, за счет применения защитных экранов можно увеличить сумму активных

температур под ними дополнительно еще на 70 °С [3]. Это, в свою очередь, снижает риски производства теплолюбивых овощных культур томатной группы, что позволяет наладить товарное производство плодов этих культур в местных условиях. Кроме того, данное обстоятельство способствовало бы возрождению аграрного сектора вокруг городов, занятости местного населения, повышению эффективности производителей данной продукции. Получение высоких урожаев сельскохозяйственных культур возможно при полном удовлетворении потребности растений в жизненно важных факторах внешней среды: свете, тепле, воде, воздухе, минеральном питании [4]. Свет (солнечная радиация) и тепло – факторы космические, они не поддаются регулированию без использования технических средств. Обеспечить растения влагой и минеральным питанием можно путем применения соответствующих технологических процессов. Разработка комплексов технических средств и технологических процессов, обеспечивающих рациональное сочетание управляемых факторов среды обитания, необходимых для получения заданного урожая, – это база программирования урожая, которое является основным условием разработки интенсивных технологий [5–7].

Сложность проблемы состоит в том, что биологические процессы, протекающие в растениях, непрерывны, во многом зависят от сортовых особенностей, фазы развития и других биологических параметров, величины которых изменяются и неизвестны в текущий момент времени. Поэтому дальнейшее повышение урожайности сельскохозяйственных культур, в частности теплолюбивых овощей томатной группы, возможно за счет мониторинга потребностей растений и состояния среды их обитания в режиме реального времени и проведения необходимых технологических операций по уходу на основе полученной информации.

Цель исследования – повышение эффективности производства овощных культур томатной группы в неблагоприятных условиях открытого грунта с применением защитных экранов путем управления производственным процессом растений за счет обеспечения их необходимыми ресурсами на различных этапах жизненного цикла в режиме реального времени. Задачи исследования – экспериментальная проверка возможности мониторинга и разработка принципиальной схемы управления производственным процессом овощных культур томатной группы в открытом грунте с применением защитных экранов.

Условия, материалы и методы исследования. Стратегическое будущее отечественного сельского хозяйства – переход в дальнейшем на агротехнологии высокой интенсивности (высокие технологии). Их суть – в точном обеспечении пофазового (по фазам развития растений) мониторинга посевов с определением потребности растений в питательных веществах, наличии сорняков, болезней и вредителей и на этой основе выполнении технологических процессов для оптимизации удовлетворения физиологических потребностей растений с учетом глубоких, точных знаний на базе мониторинга посевов. Это позволяет регулировать не только величину урожая, но и качество получаемой продукции, величину издержек [8]. Производственный процесс растений зависит от факторов внешней среды и способен сам трансформировать средообразующие факторы через изменение газообмена, транспирацию, архитектуру посевов [9].

Методологической базой для формирования агротехнологий являются основные законы системного земледелия: закон совокупного действия факторов жизни растений (синергизм, аддитивизм, антагонизм), закон возврата – компенсация выноса из почвы питательных веществ и энергии и закон Либиха (минимума) [4]. Согласно закону Либиха, относительное действие отдельного экологического фактора тем сильнее, чем больше он находится по сравнению с другими факторами в минимуме и является лимитирующим. Согласно закону толерантности

Шелфорда, лимитирующим фактором процветания организма может быть как минимум, так и максимум экологического влияния, диапазон между которыми определяет степень толерантности организма к данному фактору. В условиях открытого грунта лимитирующим фактором среды обитания теплолюбивых овощных культур является тепло. Поэтому в соответствии с принципом приоритетного воздействия на лимитирующий или угнетающий фактор первоочередным условием разработки технологии выращивания теплолюбивых культур в открытом грунте является повышение теплообеспеченности среды обитания. Если тепла достаточно, то на первый план выходит обеспеченность водой и продуктами питания.

В СибИМЭ СФНЦА РАН разработан способ создания условий для выращивания теплолюбивых овощных культур в условиях негативного воздействия факторов открытого грунта и устройство для его реализации [10]. В результате проведенных исследований эффективности способа установлено, что применение укрытий экранного типа обеспечивает повышение суммы активных температур в течение всего периода вегетации, защиту растений от негативных воздействий открытого грунта (ливни, град, кратковременные заморозки, перегрев растений, техногенные выбросы и др.), увеличивает урожайность томатов в 2–3 раза по сравнению с открытым грунтом. Однако этого недостаточно для того, чтобы исключить теплообеспеченность из лимитирующих факторов, но уменьшить его отрицательное воздействие можно через автоматическое регулирование интенсивности вентиляции [11].

Дальнейшее совершенствование технологий выращивания теплолюбивых овощей в открытом грунте должно быть направлено на управление производственным процессом растений путем непосредственного технологического воздействия на характеристики среды обитания внутри укрытия. Информация о состоянии растений и среды их обитания в режиме реального времени может быть получена в цифровом формате путем фитомониторинга. Практическое применение фитомониторинга для выявления стрессовых состояний растения и оптимизации режимов их выращивания вполне реализуемо и открывает новые возможности повышения эффективности управления производственным процессом с учетом факторов техногенеза [12, 13].

Результаты исследования. Проверка выдвинутых положений проводится в настоящее время на участке открытого грунта экспериментального тепличного комплекса СибИМЭ СФНЦА РАН (рисунок 1), оборудованного защитными экранами для выращивания низкорослых (томаты, перцы, баклажаны) 1 и высокорослых (томаты) 2 теплолюбивых овощных культур.

Рисунок 1

Общий вид экспериментального участка: 1, 2 – секция и технологический модуль защитных экранов для выращивания высокорослых и низкорослых овощных культур томатной группы соответственно

Между экранами установлена метеостанция (рисунок 2) с приборным обеспечением для снятия параметров внешней среды (освещенность, температура и влажность воздуха, температура и влажность почвы) и комплект датчиков для из-

мерения параметров растения (изменения размера плода, диаметра стебля, температуры листа). Аналогичное приборное обеспечение смонтировано и под защитными экранами (рисунок 3).

Рисунок 2

Метеостанция и датчики для снятия параметров среды обитания и растения: 1 – датчик температуры и влажности воздуха; 2 – пианометр; 3 – датчик направления и скорости ветра; 4 – датчик дождя; 5 – блок управления; 6 – датчик диаметра стебля; 7 – датчик температуры листа; 8 – датчик параметров почвы; 9 – датчик диаметра плода

Рисунок 3

Блок приборов для снятия параметров среды обитания и растения под защитными экранами

Рисунок 4
Динамика индекса водного стресса внутри укрытия и снаружи

Рисунок 5

Схема управления производственным процессом овощных культур томатной группы в сезонных укрытиях: X_1 – воздействие внешней среды; X_2 – воздействие укрытий на среду обитания; X_3 – воздействие среды обитания на производственный процесс; Y_1 – характеристики среды обитания; Y_2 – характеристики производственного процесса; Y_3 – измеренные параметры; U_1 , U_2 – управляющие воздействия; A_1 – воздействие исполнительного механизма на параметры укрытий; T_1 – влияние технологических операций на параметры укрытий; T_2 – влияние технологических операций на характеристики среды обитания; Z – показатель эффективности производственного процесса; Z_1 – расчетные показатели состояния растений и среды их обитания

Процесс снятия всех параметров ведется в автоматическом режиме. Результаты измерений по радиоканалу передаются на фитомонитор и далее через USB-адаптер – на компьютер. Обработка результатов может осуществляться с помощью стандартных программ статистической обработки массивов чисел. На рисунке 4 приведена динамика изменения индекса водного стресса, рассчитанная по методу Йодсо [14].

Размах колебаний индекса водного стресса внутри укрытий существенно ниже, чем снаружи, что может свидетельствовать о более благоприятных условиях для растений. В дальнейшем фитомониторинг позволит обеспечить переход к управлению производственным процессом

теплолюбивых овощных культур томатной группы под защитными экранами в режиме реального времени. Фитомониторинг в управлении производственным процессом – это, прежде всего, непрерывный неповреждающий контроль жизнедеятельности растения с одновременным контролем окружающего микроклимата. Принципиальная схема системы управления производственным процессом теплолюбивых овощных культур, выращиваемых с применением защитных укрытий экранного типа, реализующая этот принцип, приведена на рисунке 5.

Принцип замкнутого цикла (обратной связи) – основной принцип управления, так как решающую роль при управлении играет информация

о результатах управления. Он заключается в том, что закон управления формируется на основе отклонения управляемой величины от задающего воздействия. Система содержит два цикла обратной связи: управления параметрами укрытия в зависимости от температуры среды обитания и управления другими характеристиками среды в зависимости от показателей эффективности производственного процесса.

Взаимодействие внешней среды со средой обитания осуществляется протекающими между ними процессами X_1 и X_2 , например, воздухообмен, приток солнечной радиации, теплообмен. В результате этого взаимодействия изменяется температура воздуха, и система управления формирует управляющее воздействие U_1 , изменяющее параметры укрытия, которые влияют на процессы взаимодействия внешней среды и среды обитания.

Второй цикл обратной связи предусматривает анализ результатов измерения параметров растения и характеристик среды обитания и предоставление информации для принятия ре-

шения о проведении технологических операций, направленных на изменение среды обитания. Модель роста растений должна принимать на входе результаты фитомониторинга и выдавать на выходе комплекс расчетных параметров, необходимых для выбора технологических воздействий. К таким параметрам могут относиться индекс водного стресса, показатели содержания в почве азота, фосфора и т. д.

Вывод. Технологии выращивания теплолюбивых овощных культур в открытом грунте с применением технических средств защиты от негативных факторов среды обитания, скорее всего, будут развиваться в направлении фитомониторинга состояния растений и среды их обитания и выявления лимитирующих факторов в режиме реального времени. На основе полученной информации будут приниматься решения о проведении технологических операций, направленных на поддержание лимитирующих факторов в зоне оптимума.

Исследования выполнены за счет бюджетного финансирования по теме 0778-2016-0084.

Библиографический список

1. Коняев, Н.Ф. Научные основы высокой продуктивности овощных растений [Текст]: учеб. пособие / Н.Ф. Коняев. Новосибирск, 1981. 436 с.
2. Овощеводство Западной Сибири [Текст] / Е.Г. Гринберг, Т.Г. Ксензова, Р.Ф. Хананова и др.; под ред. Т.Г. Ксензовой и Р.Ф. Ханановой; Новосиб. Гос. аграр. ун-т. Новосибирск, 2006. 237 с.: ил. – (Учебники и учебные пособия для студентов высш. учеб. заведений).
3. Нестяк, В.С. Защитные экраны – резервные возможности для овощеводства [Текст] / В.С. Нестяк, Г.Е. Чепурин, О.В. Ивакин, С.Ф. Усольцев // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 8. С. 83–86.
4. https://studopedia.ru/17_81912_zakon-optimuma-zakon-minimuma-libiha-zakon-limitiruyushchih-faktorov-shelforda.html. Дата обращения: 01.06.2018.
5. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур [Текст] / Под ред. Ф.В.Т. Пеннинга де Фриза и Х.Х. ванн Лара; пер. с английского под ред. О.Д. Сиротенко. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 320 с.
6. Можаяев, Н. Programming of crops [Электронный ресурс]: учебное пособие / Н. Можаяев, П. Серикпаев, Г. Стыбаев. Астана: Фолиант, 2013. 160 с. Режим доступа: http://library.psu.kz/fulltext/transactions/2107_mojayev_n_programmirovaniye_urojaev_selskokozyaystvennih_kultur_n_m

ojaevp_serikpaev_g_stibaev.pdf. Дата обращения 01.04.2018.

7. Интенсивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ogorodstvo.com/rastenyevodstvo/-intensivnyye-tehnologii-vozdelyvaniya-selskokhozyaystvennykh-kultur/intensivnye-tehnologii-vozdelyvaniya-selskokhozyaystvennykh-kultur.html>. Дата обращения: 01.04.2018.

8. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 года. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwww.soyuzagromash.info%2Ffiles%2Fpdf%2Fstrategiya_MTM_2020_2009_.pdf&name=strategiya_MTM_2020_2009_.pdf&lang=ru&c=587d937ec7f5&page=30. Дата обращения: 01.04.2018.

9. Шеин, Е.В. Агрофизика [Текст] / Е.В. Шеин, В.М. Гончаров. Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. 400 с.

10. Пат. № 2479986 РФ. Способ создания условий для выращивания теплолюбивых овощных культур в условиях открытого грунта и устройство для его реализации [Текст] / В.В. Арюпин, В.С. Нестяк, С.Ф. Усольцев. Бюл. № 4.

11. Нестяк, В.С. Применение информационных технологий для управления производственным процессом овощей в сезонных укрытиях [Текст] / В.С. Нестяк, С.Ф. Усольцев, Р.В. Рыба-

ков // Научно-техническое обеспечение АПК Сибири; Материалы Международной научно-технической конференции. Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук. Краснообск, 2017. С. 181–187.

12. Шишкин, П.В. Фитомониторинг в практическом растениеводстве [Текст] / П.В. Шишкин, Ю. Тон // Теплицы России. 2009. № 1. С. 50–53.

13. Ивакин, О.В. Техногенез в продукционном процессе томатов [Текст] / О.В. Ивакин, В.С. Нестяк // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2016. № 8 (142). С. 149–155.

14. Воеводина, Л.А. Использование индекса водного стресса растения (CWSI) для соблюдения режимов орошения [Электронный ресурс] / Л.А. Воеводина. Режим доступа: https://docviewer.yandex.ru/view/88699600/?*=rLWwZo81YWzLTUnpKQ2kaTQVaq97InVybcI6Imh0dHA6LY93d3cuY2F3YXRleilpbmZvLm5ldC9iaY9pbXByb3ZlbnVudC1pcnJpZ2F0ZWQtYWdyaWN1bHR1cmUvZmlsZXNmvcmlpcG00NS5wZGYiLCJ0aXRzSI6InJvc25paXBtNDUucGRmliwidWlkIjoIOdg2OTk2MDAiLCJ5dSI6IjYyMTk5Mzc5MTQyMzQ1NTU4NSIsIm5vaWZyYW1lIjp0cnVILCJ0cyI6MTUxMTMyNTk1NjEwNX0%3D&page=116&lang=ru. Дата обращения: 01.06.2018.

Сведения об авторах

1. **Нестяк Вячеслав Степанович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН). Новосибирская обл., р.п. Краснообск. Тел.: 8 (383) 3483449, e-mail: nestyak-vs@yandex.ru.

2. **Усольцев Сергей Федорович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН). Новосибирск, Россия.

3. **Ивакин Олег Владимирович**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН). Новосибирск, Россия.

4. **Косьяненко В.П.**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН), Новосибирск, Россия.

5. **Рыбаков Роман Владимирович**, младший научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН), Новосибирск, Россия.

6. **Патрин Василий Александрович**, профессор, доктор технических наук, Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск, Россия, тел.: 8 (383) 3474114.

Технологии выращивания теплолюбивых овощей томатной группы в открытом грунте Сибири не обеспечивают соответствие характеристик среды обитания биологическим требованиям растений, что создает риски для товаропроизводителей. Цель исследования – повышение эффективности их производства. Лимитирующим фактором среды обитания теплолюбивых овощных культур является тепло. В соответствии с принципом приоритетного воздействия на лимитирующий или угнетающий фактор первоочередным условием разработки технологии их выращивания в открытом грунте является повышение теплообеспеченности среды обитания. Если тепла достаточно, то на первый план выходит обеспеченность водой и продуктами питания. Для выявления лимитирующего фактора и приведения его величины в зону оптимума необходимо контролировать показатели роста растений и характеристики среды их обитания в режиме реального времени. Проверка этих положений проводится на участке открытого грунта экспериментального комплекса СИБИМЭ СФНЦА РАН, оборудованного защитными экранами.

Между экранами установлена метеостанция, с приборным обеспечением для снятия параметров внешней среды и комплект датчиков для измерения параметров растения. Снятие всех параметров ведется в автоматическом режиме. Результаты измерений по радиоканалу передаются на фитомонитор и далее через USB-адаптер – на компьютер. Приведена динамика изменения индекса водного стресса, рассчитанная по методу Иодсо. Ее анализ показывает, что размах колебаний индекса водного стресса внутри укрытий существенно ниже, чем снаружи, что может свидетельствовать о более благоприятных условиях для растений. Приведена принципиальная схема системы управления продукционным процессом теплолюбивых овощных культур, выращиваемых с применением защитных экранов. Сделан вывод, что технологии выращивания теплолюбивых овощных культур в открытом грунте с применением защитных экранов будут развиваться в направлении фитомониторинга состояния растений и среды их обитания и выявления лимитирующих факторов в режиме реального времени.

V. Nestyak, S. Usoltsev, O. Ivakin, V. Kosyanyenko, R. Rybakov, V. Patrin

MANAGEMENT OF PRODUCTION PROCESS OF AGRICULTURAL CROPS (ON THE EXAMPLE OF TOMATOES)

Key words: *open ground; vegetable crops; protective screens; production process; limiting factor; phytomonitoring; instrumentation.*

Authors' personal details

1. **Nestyak Vyacheslav**, Doctor of technical sciences, Head Researcher. Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk region, Krasnoobsk work settlement, phone: +7 (383) 3483449, e-mail: nestyak-vs@yandex.ru.

2. **Usoltsev Sergei**, Candidate of technical sciences, Leading Researcher, Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.

3. **Ivakin Oleg**, Doctor of technical sciences, Leading Researcher. Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.

4. **Kosyanyenko V.**, Candidate of technical sciences, Leading Researcher, Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.

5. **Rybakov Roman**, Junior Researcher, Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.

6. **Patrin Vasily**, Doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, phone: +7 (383) 3474114.

The current technology of growing warm-weather vegetables, such as tomato plants, in the open ground in Siberia does not meet requirements in terms of compatibility of the environmental characteristics of their habitat with the biological needs of these plants. The aim of the research is to increase tomato productivity. The limiting factor of the habitat for warm-weather vegetables is low temperature. In accordance with the priority principle of dealing with the limiting or growth-suppressing factor, the first and foremost condition for the development of tomato growing technology in the open ground is to increase heat availability of the habitat. If there is enough heat, then it is necessary to ensure water or nutrients availability. In order to identify a limiting factor and bring it to an optimum value, it is necessary to regulate plant growth performance and their habitat characteristics in the real time mode. These parameters are checked in the open ground of the experimental complex of the Siberian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture equipped with protective screens. Between the

screens there is a meteorological station with the instrumentation for measuring parameters of the outside ambient and a set of sensors for measuring plant parameters. All parameters are read automatically. The results of the measurements are transferred by the radio channel to the phytomonitor and further on via USB adapter into the computer. The dynamics of the plant water stress index is calculated by the method of Idso et al. This analysis shows that the fluctuation range of the water stress index inside shelters is significantly lower than outside, which can demonstrate more favorable conditions for the plants. The work presents the basic diagram of the production process management system of warm-weather vegetable crops grown with the use of protective screens. As a result of the research conducted, the conclusion was drawn that the development of technologies for growing warm-weather vegetable crops in the open ground with the use of protective screens will proceed in the direction of phytomonitoring of plant condition and their habitats and identification of limiting factors in the real time mode.

© Нестяк В.С., Усольцев С.Ф., Ивакин О.В., Косьяненко В.П., Рыбаков Р.В., Патрин В.А.