К

Проблемы искусственного интеллекта. 2026. N 3 (42). С. 188-198
Problems of Artificial Intelligence. 2026;3(42):188-198.
Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
Научная статья

УДК 004.89 **DOI** 10.24412/2413-7383-2026-3-42-188-198

А. Ю. Карповский[1], Д.Н. Кузнецов[2], И.И. Стрельников[3]
[1]Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
по автоматизации горных машин «ГБУ Автоматгормаш им. В. А. Антипова»
Российская Федерация, ДНР, 283003 г. Донецк, пр. Ильича, 93.
oagm308@mail.ru, ORCID 0000-0003-0478-0182.
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, 280001, г. Донецк, ул. Артема, 58.
kuzen2000@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2136-7760.
[3]Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Донецкий ботанический сад», Российская Федерация, ДНР, 283023, Донецк, пр. Ильича, 110.
ivanstrel87@gmail.com, ORCID 0000-0002-5580-0641

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА В УСЛОВИЯХ ТЕПЛИЦ

A. Y. Karpovsky[1], D.N. Kuznetsov[2], I.I. Strelnikov[3]
[1]Scientific Research and Design Institute
for Automation of Mining machines "GBU Automatgormash named after V. A. Antipov"
Russian Federation, DNR, 283003 93 Ilyich Ave., Donetsk.
oagm308@mail.ru, ORCID 0000-0003-0478-0182.
[2] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University", 58 Artyom str., Donetsk, 280001, Russian Federation, DPR.
kuzen2000@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2136-7760.
[3]Federal State Budgetary Scientific Institution Donetsk Botanical Garden, 110 Ilyich Ave., Donetsk, 283023, DPR, Russian Federation.
ivanstrel87@gmail.com, ORCID 0000-0002-5580-0641

A MATHEMATICAL MODEL OF THE DEPENDENCE OF THE QUANTUM YIELD OF FLUORESCENCE ON THE PARAMETERS OF THE MICROCLIMATE IN GREENHOUSES

В статье рассматривается математическое моделирование зависимости фотохимической эффективности фотосистемы II огурца (Cucumis sativus L.) от параметров микроклимата теплиц. Актуальность — в формализации обратной связи от растения для автоматизированного управления микроклиматом. Модель использует температуру, влажность и дефицит давления водяного пара (VPD), включает температурную зависимость гауссового типа и эмпирическую зависимость устьичной проводимости от VPD. Она позволяет прогнозировать физиологическое состояние растений, анализировать чувствительность к изменениям микроклимата, выявлять оптимум эффективности и интегрироваться в системы управления теплицами и цифровые двойники агрообъектов.
Ключевые слова: флуоресценция хлорофилла, математическая модель, влажность, температура, индукция флуоресценции, теплица, микроклимат.

The article examines the mathematical modeling of the dependence of the photochemical efficiency of photosystem II in cucumber (Cucumis sativus L.) on the parameters of the greenhouse microclimate. The relevance lies in the formalization of the feedback from the plant for automated control of the microclimate. The model uses temperature, humidity, and vapor pressure deficit (VPD), incorporates a Gaussian-type temperature dependence, and an empirical dependence of stomatal conductance on VPD. It enables the prediction of the physiological state of plants, the analysis of sensitivity to changes in the microclimate, the identification of the optimal efficiency, and integration into greenhouse management systems and digital twins of agricultural facilities.
Keywords: chlorophyll fluorescence, mathematical model, humidity, temperature, fluorescence induction, greenhouse, microclimate.

Введение

Классический подход проектирования систем автоматического управления контурами микроклимата теплиц, рассматриваемый в работах [1-6] предусматривает эффективную «борьбу» с робастностью алгоритмов управления, точностью поддержания параметров микроклимата, учетом широкого ряда взаимозависимых явлений внутри замкнутой экосистемы – теплицы, а также иные факторы в рамках классической концепции теории автоматического управления. Приведенные методы решения, несомненно, обладают положительным техническим результатом, однако не дают рекордно высоких результатов, не превышая отметки в 20 кг/м2, в урожайности при выращивании, как можно наблюдать, исходя из источников [7-10] Проблематика предложенных решений заключается в том, что они не учитывают инновационный подход к организации объективных обратных связей – получать информацию о состоянии непосредственно от растения. Предлагается реализовать данный инновационный подход путем формализованной обратной связи, основанной на зависимости фотохимической эффективности фотосистемы растений.

Современные тепличные комплексы относятся к классу сложных технологических объектов, функционирование которых определяется взаимодействием инженерных систем управления микроклиматом и биологических объектов — растений. Повышение энергоэффективности и устойчивости таких систем, а также снижение рисков стрессового воздействия на растения требуют перехода от управления исключительно по параметрам среды к использованию физиологически обоснованных показателей состояния растений в качестве источников обратной связи. К числу таких показателей относится фотохимический квантовый выход флуоресценции хлорофилла Fv/Fm, широко применяемый для оценки функционального состояния фотосинтетического аппарата. Несмотря на наличие значительного числа экспериментальных исследований, аналитические модели, непосредственно связывающие Fv/Fm с параметрами микроклимата и пригодные для использования в алгоритмах управления микроклиматом теплиц, представлены в литературе ограниченно. Это определяет актуальность разработки математической модели, ориентированной на задачи автоматизации и компьютерного моделирования.

Вместе с тем большинство опубликованных работ в данной области ориентированы преимущественно на экспериментальную интерпретацию физиологических процессов, однако анализ ограничивается корреляционными зависимостями без построения формализованной математической модели, возможной к применению в решении задач автоматизированного управления технологическим процессом выращивания.

Более сложные интегрированные модели фотосинтеза и флуоресценции [11], разработанные для экосистемных масштабов, обладают высокой описательной способностью, однако требуют значительного объёма входных данных и вычислительных ресурсов, что существенно ограничивает их использование в локальных системах управления тепличными объектами.

В последние годы предложен ряд подходов к моделированию физиологического состояния растений, включая эмпирические модели фотосинтетических показателей, полученные с применением нейросетей [12], модели совместного газообмена и устьичной проводимости [13], а также имитационные модели механизма фотосинтеза и флуоресценции[14]. Несмотря на их научную значимость, данные подходы либо ориентированы на интерпретацию экспериментальных данных, либо обладают высокой структурной сложностью и предназначены значительно повысить точность оценки Fv/Fm на стадии цветения и обеспечивают новую техническую поддержку для быстрого и точного мониторинга Fv/Fm, но не обеспечивают аналитическую форму, пригодную для модельно-ориентированного проектирования и синтеза алгоритмов управления.

Комплексная экосистемная модель [15] позволяет воспроизводить флуоресцентные и фотосинтетические потоки на различных масштабах, данная модель даже адаптирована к требованиям реального времени, но не учитывает ограничений вычислительных ресурсов, характерных для систем управления микроклиматом теплиц, что усложняет её натурную реализацию при управлении микроклиматом теплиц.

Дополнительной проблемой является то, что температура и относительная влажность воздуха во многих исследованиях [16-18] рассматриваются как независимые факторы, несмотря на их тесную физическую взаимосвязь.

В связи с изложенным в работе рассматривается задача построения математической модели зависимости квантового выхода флуоресценции хлорофилла Fv/Fm растения огурца обыкновенного (Cucumis sativus L.) от параметров микроклимата теплицы.

Цель исследования – предложить подход к математическому описанию зависимости фотохимической эффективности фотосистемы II растения от параметров микроклимата в условиях теплицы, а также создать математическую модель отклика растения для дальнейшего использования при модельно-ориентированном проектировании систем автоматизированного управления тепличным микроклиматом.

Для определения взаимосвязи квантового выхода флуоресценции и параметров микроклимата в условиях замкнутого объема (теплицы), в данной статье взят за основу параметр VPD, как ключевой фактор, характеризующий взаимосвязь температуры и относительной влажности воздуха в теплице. VPD (vapor pressure deficit, дефицит давления пара) – это разница между тем, сколько влаги воздух может удерживать при данной температуре, и тем, сколько влаги в нём есть на самом деле. VPD представляет собой более информативный показатель по сравнению с относительной влажностью воздуха при оценке влияния макроклиматических условий на рост и развитие растений, поскольку напрямую характеризует потенциальную интенсивность транспирации, интегрируя влияние как температуры, так и влажности.

Некоторые особенности VPD: Высокий VPD означает, что воздух «сухой» и растения теряют влагу быстрее. Слишком низкий VPD говорит о том, что воздух «перенасыщен» и растения испаряют влагу медленно или вообще не могут. VPD рассчитывается на основе температуры и относительной влажности воздуха. Чем выше температура и ниже влажность — тем выше VPD, и наоборот.

Зависимость VPD определяется следующим выражением:

$$VPD = e_S(T) \cdot (1 - RH/100), [кПа] \quad (1)$$

где e_S (T) – насыщенное давление пара при данной температуре, а RH – относительная влажность воздуха. Влажность для дальнейших расчетов примем в широком диапазоне RH∈(40;95)%.

Взаимосвязь насыщенного давления пара найдем из уравнения Тетенса (2). В уравнении приведены следующие эмпирические коэффициенты: 0,6108 – базовое значение насыщенного пара при нулевой температуре, 17,28 – коэффициент температурной чувствительности, 237,3 – коэффициент, связанный с переходом вода-пар:

$$VPD = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.28 \cdot T}{T + 237.3}\right), [кПа] \quad (2)$$

Применение уравнения Тетенса справедливо в диапазоне температур от 1 до 35 °C, что отвечает предельным диапазонам температур для выращивания растений в условиях теплиц в соответствии с [19].

Например, при температуре T=26 °C относительной влажности RH=60% VPD равно 1,1. Значения VPD в течение дня в теплице могут колебаться в пределах VPD ∈ (0,1;2,5) кПа.

Для разработки математической модели растения, рассмотрим растение огурца, как черный ящик, а также рассмотрим вспомогательные коэффициенты, воздействующие на модель. Фотохимический квантовый выход флуоресценции Fv/Fm для здоровых растений считается в пределах ≈ 0,75–0,83. Под действием температурного и водного (через VPD / RH) стресса Fv/Fm снижается. Температурная реакция часто имеет максимум в некоторой оптимальной T и падает на холоде и на жаре (гауссовая/квадратичная форма). Примем распределение Fv/Fm в виде Гауссовой функции температуры.

Влияние RH обычно опосредовано через VPD — низкая RH → высокий VPD → закрытие устьиц/стресс → снижение фотосинтетической эффективности и Fv/Fm. Вследствие чего получим следующую закономерность, описывающую зависимость значения квантового выхода флуоресценции от температуры и влажности в теплице:

$$F_v / F_m(T, RH) = (F_{опт} - F_0) \cdot g_T(T) \cdot gS(VPD), \quad (3)$$

где, F0 – базовое стрессовое значение флуоресценции, примем в диапазоне $F_0 \in (0{,}15;0{,}45)$; $F_{опт}$ – оптимальное значение квантового выхода флуоресценции, $F_{опт} \in (0{,}75;0{,}83)$; $g_T(T)$ – температурная зависимость, в виде Гауссовой огибающей, которая выражается по следующей зависимости:

$$g_T(T) = \exp\left(\frac{-(T - T_{опт})^2}{2 \cdot \sigma_T^2}\right), \quad (4)$$

где σ_T – стандартное отклонение в градусах Цельсия, или «ширина» чувствительности по температуре.

В качестве оптимальной температуры примем из ряда [20] оптимальную температуру для огурца равную 24°C. Справедливо отметить, что в качестве температурного коэффициента T стоит брать температуру листа растения, это обеспечит большую достоверность математической модели, построенную на эмпирических данных.

При σ_T=5°C, $T=T_{опт} \pm \sigma_T$, $T \in (19;29)$°C, а $g_T = e^{-1/2} \approx 0{,}607$,

а при $T=T_{опт} \pm 2\sigma_T$, $T \in (14;34)$°C, а $g_T \approx e^{-2} \approx 0{,}135$.

Весовой коэффициент gS(VPD) – характеризует зависимость проницаемости устьиц растения огурца обыкновенного (Cucumis sativus L.) от дефицита давления водяного пара. Проведя литературный обзор, мы не обнаружили работ, которые бы однозначно изучали зависимость квантового выхода флюоресценции в зависимости от дефицита водяного пара. При этом ряд работ демонстрируют, что продуктивность растений огурца в теплицах, основанная на недельном приросте массы, прямо пропорциональна влажности воздуха, вплоть до отметок 100% (в соответствии с рисунком 1) [21].

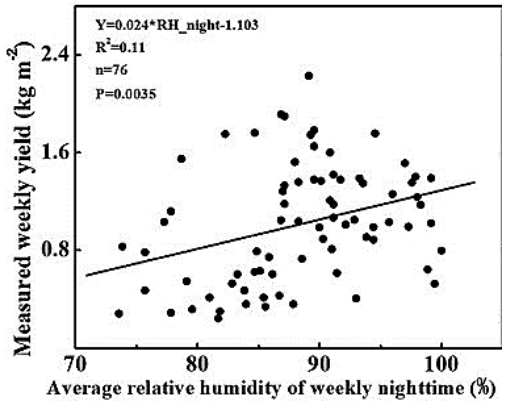


Рисунок 1 - Зависимость недельного прироста массы от относительной влажности воздуха [22]

Кроме того, в детальном метаанализе работы [22] была установлена эмпирическая зависимость проницаемости устьиц для водяного пара (S_{cd}) в зависимости от VPD, которая так же прямо пропорциональна доступности влаги в воздухе. Известно, что проницаемость устьиц тесно коррелирует с эффективностью фотосистем. В связи с этим мы приняли показатель проницаемости устьиц, как опосредованную метрику зависимости Fv/Fm от VPD и использовали значения $S_{cd}(VPD)$ приведенные к единице, в качестве весового коэффициента gS(VPD). В формуле 3, этот коэффициент отвечает за отклик Fv/Fm на изменение VPD. Таким образом, в соответствие с эмпирической формулой, $S_{cd}(VPD)$ рассчитывается как:

$$S_{cd}(VPD) = -m \cdot \ln(VPD) + b, \tag{5}$$

где параметры линейной модели m и b — являются эмпирически устанавливаемыми и зависящими от вида растения. В рамках нашей работы мы использовали средние значения этих параметров для травянистых растений из списка, приведенного в работе [22], в частности приняли m = 373 и b = 713.

Соответственно весовой коэффициент gS(VPD) имеет вид:

$$S_{cd}(VPD) = \frac{S_{cd}(VPD)}{\max(S_{cd}(VPD))} = \frac{S_{cd}(VPD)}{S_{cd}(VPD = 0.1)}. \tag{6}$$

В соответствии с рисунком 2 приведен график значений gS(VPD) в диапазоне VPD от 0.1 до 2.5.

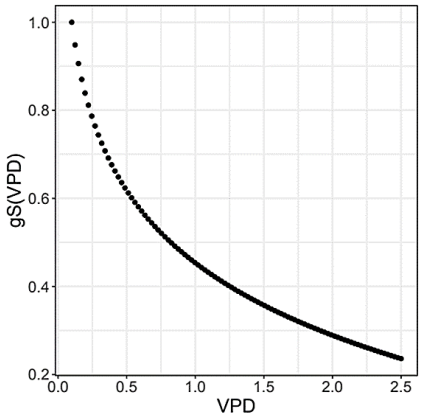


Рисунок 2 – Зависимость проницаемости устьиц от дефицита давления пара

В рамках настоящего исследования растение рассматривается, как динамический объект управления с распределёнными физиологическими параметрами, поведение которого описывается в форме вход–выходной математической модели. Такой подход позволяет абстрагироваться от внутренней биохимической сложности фотосинтетических процессов и сосредоточиться на формализации отклика интегрального физиологического показателя на внешние управляющие воздействия, что соответствует задачам математического моделирования и автоматизации.

Выполним моделирование для подтверждения адекватности разработанной математической модели. На основании вышеизложенных закономерностей реализуем математическую модель по принципу «черный ящик». В качестве входных данных определим ключевые параметры микроклимата: температуру в идеальном случае – листа растения, либо температуру воздуха, а также относительную влажность воздуха. На выходе матмодели получим распределение значений квантового выхода флуоресценции хлорофилла Fv/Fm для растения огурца обыкновенного.

Для динамического моделирования разработан шаблон модели, реализуемый на скриптовом языке программирования ngscript на платформе для разработки сложных технических систем Engee, включающий блок источников (T-температура, RH-относительная влажность), сама модель «fcn» по функции (2) и выходной блок «F» для подачи результатов моделирования в систему автоматического управления микроклиматом теплицы, как показано в соответствии с рисунком 3.

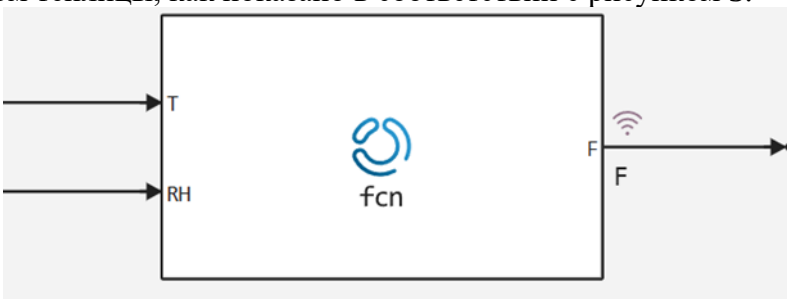


Рисунок 3 – Реализация математической модели

Для тестирования создан скрипт, реализуемый по зависимостям (1)-(6), организующий генерацию синтетических данных для огурца обыкновенного cucumis sativus. Результаты моделирования приведены в соответствии с рисунком 4 в трехмерной интерпретации. В модели сформированы синтетические данные для огурца обыкновенного на основе заданных исходные данных в виде констант:

- оптимальное значение квантового выхода флуоресценции принято $F_{опт} = 0,83$;
- базовое стрессовое значение флуоресценции $F_0 = 0,25$;
- оптимальная температура для выращивания огурца $T_{опт} = 24$ °C,
- диапазон температур в теплице $\sigma T = 5$ °C;
- коэффициент чувствительности значимости снижения отклика VPD b=713;
- коэффициент настройки формы m = 373.

Для построения визуализаций использовалась цветовая карта, где оптимальные значения Fv/Fm≈0.83 отображались зелёным, а стрессовые (<0.5) — красным.

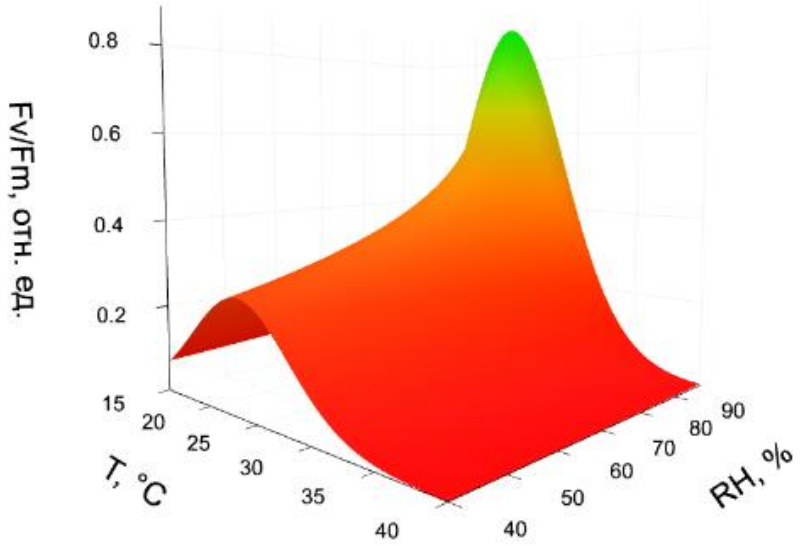


Рисунок 4 - Оптимальные синтетические кривые зависимости квантового выхода флуоресценции от температуры и относительной влажности для огурца обыкновенного

Заключение

На основе предложенной аналитической модели была получена нелинейная зависимость фотохимического квантового выхода флуоресценции хлорофилла Fv/Fm от управляемых параметров микроклимата теплицы, выраженных через температуру воздуха и дефицит давления водяного пара. Модель формализует растение, как объект управления с измеряемой выходной переменной и позволяет анализировать чувствительность физиологического состояния растения к изменениям микроклиматических воздействий.

Анализ полученной зависимости показал наличие области допустимых значений входных параметров, в которой значение Fv/Fm сохраняется вблизи эталонного уровня, соответствующего устойчивому состоянию объекта управления. Отклонение температуры воздуха от оптимального диапазона приводит к монотонному снижению выходной переменной, что обеспечивает возможность количественной оценки степени рассогласования между текущим и заданным состоянием объекта.

Учет влияния относительной влажности воздуха через показатель дефицита давления водяного пара позволяет описывать влияние водного режима в рамках единой управляемой переменной. При увеличении VPD наблюдается снижение значения Fv/Fm, при этом характер зависимости сохраняет аналитическую гладкость, что важно для анализа устойчивости и чувствительности системы управления. Совместное рассмотрение температурного и влажностного факторов позволяет выявить области микроклиматических режимов, приводящих к снижению значения выходной переменной, и, тем самым, потенциально опасные режимы функционирования объекта управления.

Полученные результаты подтверждают, что предложенная модель обеспечивает компактное и вычислительно эффективное описание объекта управления, отличается аналитической формой, малым числом параметров и пригодностью для использования в системах автоматического регулирования, ориентированных на стабилизацию физиологического состояния растений. Аналитическая форма зависимости и оптимальное число параметров позволяют применять модель для имитационного анализа режимов управления и при разработке цифровых двойников тепличных комплексов.

Предложенная зависимость (2) может быть использована в качестве математической основы для дальнейшего использования в области компьютерного моделирования работы автоматизированных систем управления технологическими процессами в качестве элемента, имитирующего объективную обратную связь от растения о его физиологическом развитии. Использование модели в системах климат-контроля позволит оптимизировать энергозатраты при поддержании микроклимата и повысить урожайность за счёт снижения стресса растений. Реализация предложенной математической модели в различных средах моделирования позволяет строить стратегии управления микроклиматом в теплицах и разрабатывать алгоритмы управления микроклиматом для встраиваемых систем и управляющих программируемых логических контроллеров, реализующих функцию автоматического управления.

Предложенная модель обладает универсальностью и может быть адаптирована для различных культур выращиваемых растений при корректировке ключевых параметров: Fopt, Topt, σT, m, b.

Список источников

1. Кокиева Г. Е. Исследование эффективности управления технологическим объектом теплицы [Электронный ресурс] / Г. Е. Кокиева, Ж. Ж. Дондоков // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2022. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-effektivnosti-upravleniya-tehnologicheskim-obektom-teplitsy (дата обращения: 26.05.2026).
2. Kim S. Growth and Yield of Cucumber in a High-Wire Growing System with Different Training Methods / S. Kim, J. Lee, M. Park // Korean Journal of Horticultural Science and Technology. 2023. Vol. 41, No. 6. P. 666–673. DOI: 10.7235/HORT.20230057.
3. Ревенко Андрей Сергеевич. Имитационное моделирование работы автоматизированной системы климат-контроля для выращивания растений в закрытом грунте [Электронный ресурс] / Ревенко Андрей Сергеевич, Федянин Артём Владимирович, Горбачев Андрей Александрович // Вестник

Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2019. № 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-raboty-avtomatizirovannoy-sistemy-klimat-kontrolya-dlya-vyraschivaniya-rasteniy-v-zakrytom-grunte (дата обращения: 26.05.2026).

4. Кадиров, Ё. Б. Разработка интеллектуальной системы управления теплицами в сельском хозяйстве [Электронный ресурс] / Е. Б. Кадиров, А. Р. Самадов // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. 2024. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-intellektualnogo-sistemy-upravleniya-teplitsami-v-selskom-hozyaystve (дата обращения: 26.05.2026).
5. Рост, развитие и урожайность гибридов огурца в «умной теплице» в условиях Омской области / А. П. Клинг, В. Н. Кумпан, А. И. Забудский, Ю. Михайлова // Аграрная наука – сельскому хозяйству: Сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции. В 2-х книгах, Барнаул, 09–10 февраля 2021 года. Том Книга 1. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2021. С. 258-260.
6. Бобков В.А. Урожайность огурца (cucumis sativus l.) При выращивании на минеральной вате с применением капельного полива / В.А. Бобков, С.А. Терещенко // Вестник молодежной науки. 2022. № 1 (33).
7. Optimizing water use efficiency in greenhouse cucumber cultivation: A comparative study of intelligent irrigation systems / Behzadipour, F., Ghasemi-Nejad-Raeini, M., Abdanan Mehdizadeh, S. A., Taki, M., Khalili Moghadam, B., Zare Bavani, M. R. Z. // PLoS One. 2024. Vol. 19, no. 10. e0311699. DOI: 10.1371/journal.pone.0311699. PMID: 39432533. PMCID: PMC11493259.
8. A hydroponic greenhouse fuzzy control system: design, development and optimization using the genetic algorithm / Khafajeh, Hamid & Banakar, Ahmad & Minaee, Saeed & Delavar, Majid // Spanish Journal of Agricultural Research. 2023. № 21. e0201. 10.5424/sjar/2023211-19392.
9. Effective Training Methods for Cucumber Production in Newly Developed Nutrient Film Technique Hydroponic System / Samba, N., Nunomura, O., Nakano, A., & Tsukagoshi, S. // Horticulturae. 2023. № 9(4), 478 p. https://doi.org/10.3390/horticulturae9040478.
10. Arab Salmani K. Comparison of Some Morpho-Physiological Characteristics and Fruit Yield of Hybrids of Cucumber (Cucumis sativus) / Arab Salmani K., A. H. Jalali, P. Jafari // [название журнала не указано]. 2024. Vol. 37, No. 4. P. 1179–1190
11. Guo, C. Predicting Fv/Fm and evaluating cotton drought tolerance using hyperspectral and 1D-CNN / C. Guo, L. Liu, H. Sun, N. Wang, K. Zhang, Y. Zhang, J. Zhu, A. Li, Z. Bai, X. Liu, H. Dong, C. Li // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. Art. № 1007150. DOI: 10.3389/fpls.2022.1007150.
12. Estimation of Fv/Fm in Spring Wheat Using UAV-Based Multispectral and RGB Imagery with Multiple Machine Learning Methods // Agronomy. 2023. Vol. 13, no. 4. Art. no. 1003. DOI: 10.3390/agronomy13041003.
13. Sommer, S. G. The Chlorophyll Fluorescence Parameter Fv/Fm Correlates with Loss of Grain Yield after Severe Drought in Three Wheat Genotypes Grown at Two CO_2 Concentrations / S. G. Sommer, E. Han, X. Li, E. Rosenqvist, F. Liu // Plants. 2023. Vol. 12, no. 3. Art. No. 436. DOI: 10.3390/plants12030436.
14. Wang, Y. Integrated modeling of canopy photosynthesis, fluorescence, and the transfer of energy, mass, and momentum in the soil–plant–atmosphere continuum (STEMMUS–SCOPE v1.0.0) / Y. Wang, Y. Zeng, L. Yu [et al.] // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. – 2 Newton. Т. 128, № 4. С. 1–25. DOI: 10.1029/2023JG007567.
15. Xia, Q. Determination of Fv/Fm from Chlorophyll a Fluorescence without Dark Adaptation by an LSSVM Model / Q. Xia, H. Tang, L. Fu, J. Tan, G. Govindjee, Y. Guo // Plant Phenomics. 2023. Vol. 5. Art. No. 0034. DOI: 10.34133/plantphenomics.0034.
16. Poudyal, D. Phenotyping from lab to field – tomato lines screened for heat stress using Fv/Fm maintain high fruit yield during thermal stress in the field / D. Poudyal, E. Rosenqvist, C.-O. Ottosen // Functional Plant Biology. 2018. Vol. 46. P. 44–55. DOI: 10.1071/FP17317.
17. Икконен, Е. Н. Кратковременные ежесуточные понижения температуры могут нивелировать негативный эффект круглосуточного освещения на фотосинтетический аппарат растений / Е. Н. Икконен, Т. Г. Шибаева, Е. Г. Шерудило, А. Ф. Титов // Физиология растений. 2023. Т. 70, № 4. С. 402–409. DOI: 10.31857/S0015330323600092.
18. Белов А.Н. Микросервисный программный комплекс сопровождения испытаний приборов и средств автоматизации на основе асинхронного обмена данными [Электронный ресурс] / А.Н. Белов, Е.В. Курнасов, А.М. Ермолаев // Проблемы искусственного интеллекта. 2026. № 2 (41). С. 158-172. URL: https://paijournal.guiaidn.ru/ru/2026/2(41)-14.html.
19. РД-АПК 1.10.09.01-14. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады.
20. Бобков, В. А. The yield of cucumber (Cucumis sativus L.) when grown on mineral wool with the use of drip irrigation / А. Бобков, С. А. Терещенко // Вестник молодёжной науки. 2022. № 1(33).
21. Сущеня Р.В. Метод балансировки нагрузки узлов распределенных систем с ограничениями состояния на основе многомерной диагностики [Электронный ресурс] / Р.В. Сущеня, В. Е. Петров // Проблемы искусственного интеллекта. 2026. № 2 (41). С. 146-156. URL: https://paijournal.guiaidn.ru/ru/2026/2(41)-13.html.
22. Бурукина А.А. Киберфизическая система мониторинга и управления условиями выращивания растений в совмещенной гидропонно-аэропной установке [Электронный ресурс] / А.А. Бурукина, Е.В. Курнасов, А.М. Володина // Проблемы искусственного интеллекта. 2026. № 2 (41). С. 62-74. URL: https://paijournal.guiaidn.ru/ru/2026/2(41)-6.html.

References

1. Кокиева Г. Е. Research Of The Efficiency Of Management Of The Technological Object Of The Greenhouse [Электронный ресурс] / Г.Е. Кокиева, Ж.Ж. Дондоков // International journal of applied sciences and technologies «Integral». – 2022. - № 4. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-effektivnosti-upravleniya-tehnologicheskim-obektom-teplitsy (accessed on: 26.05.2026).
2. Kim S. Growth and Yield of Cucumber in a High-Wire Growing System with Different Training Methods / S. Kim, J. Lee, M. Park // Korean Journal of Horticultural Science and Technology. – 2023. – Vol. 41, No. 6. – Pp. 666-673. – DOI: 10.7235/HORT.20230057.
3. Ревенко Андрей Сергеевич. Имитационное моделирование работы автоматизированной системы климат-контроля для выращивания растений в закрытом грунте [Электронный ресурс] / Ревенко Андрей Сергеевич, Федянин Артём Владимирович, Горбачев Андрей Александрович // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. – 2019. – № 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-raboty-avtomatizirovannoy-sistemy-klimat-kontrolya-dlya-vyraschivaniya-rasteniy-v-zakrytom-grunte (accessed on: 26.05.2026).
4. Кадиров, Ё. Б. Development Of An Intelligent Greenhouse Management System In Agriculture [Электронный ресурс] / Ё. Б. Кадиров, A. P. Samadov // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2024. – № 1. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-intellektualnogo-sistemy-upravleniya-teplitsami-v-selskom-hozyaystve (accessed on: 26.05.2026).
5. Рост, развитие и урожайность гибридов огурца в «умной теплице» в условиях Омской области / А. П. Клинг, В. Н. Кумпан, А. И. Забудский, Ю. Mikhailova // Agrarian science – agriculture: Collection of materials of the XVI International scientific and practical conference: в 2-х книгах (Барнаул, 09–10 февраля 2021 года). Том Книга 1. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2021. – С. 258-260.
6. Бобков В.А. The yield of cucumber (cucumis sativus l.) When grown on mineral wool with the use of drip irrigation / В.А. Бобвков, С.А. Терещенко // Bulletin of Youth Science. – 2022. - № 1 (33).
7. Optimizing water use efficiency in greenhouse cucumber cultivation: A comparative study of intelligent irrigation systems / Behzadipour, F., Ghasemi-Nejad-Raeini, M., Abdanan Mehdizadeh, S. A., Taki, M., Khalili Moghadam, B., Zare Bavani, M. R. Z. // PLoS One. – 2024. – Vol. 19, no. 10. – e0311699. – DOI: 10.1371/journal.pone.0311699. – PMID: 39432533. – PMCID: PMC11493259.
8. A hydroponic greenhouse fuzzy control system: design, development and optimization using the genetic algorithm / Khafajeh, Hamid & Banakar, Ahmad & Minaee, Saeed & Delavar, Majid // Spanish Journal of Agricultural Research. – 2023. – № 21. – e0201. 10.5424/sjar/2023211-19392.
9. Effective Training Methods for Cucumber Production in Newly Developed Nutrient Film Technique Hydroponic System / Samba, N., Nunomura, O., Nakano, A., & Tsukagoshi, S. // Horticulturae. – 2023. – № 9 (4). – 478 p. – https://doi.org/10.3390/horticulturae9040478 .
10. Arab Salmani, K. Comparison of Some Morpho-Physiological Characteristics and Fruit Yield of Hybrids of Cucumber (Cucumis sativus) / K. Arab Salmani, A. H. Jalali, P. Jafari // [journal name not specified]. – 2024. – Vol. 37, No. 4. – Pp. 1179-1190
11. Guo, C. Predicting Fv/Fm and evaluating cotton drought tolerance using hyperspectral and 1D-CNN / C. Guo, L. Liu, H. Sun, N. Wang, K. Zhang, Y. Zhang, J. Zhu, A. Li, Z. Bai, X. Liu, H. Dong, C. Li // Frontiers in Plant Science. – 2022. – Vol. 13. – Art. № 1007150. – DOI: 10.3389/fpls.2022.1007150.
12. Estimation of Fv/Fm in Spring Wheat Using UAV-Based Multispectral and RGB Imaging with Multiple Machine Learning Methods // Agronomy. – 2023. – Vol. 13, no. 4. – Art. no. 1003. – DOI: 10.3390/agronomy13041003.
13. Sommer, S. G. The Chlorophyll Fluorescence Parameter Fv/Fm Correlates with Loss of Grain Yield after Severe Drought in Three Wheat Genotypes Grown at Two CO_2 Concentrations / S. G. Sommer, E. Han, X. Li, E. Rosenqvist, F. Liu // Plants. – 2023. – Vol. 12, no. 3. – Art. No. 436. – DOI: 10.3390/plants12030436.
14. Wang, Y. Integrated modeling of canopy photosynthesis, fluorescence, and the transfer of energy, mass, and momentum in the soil–plant–atmosphere continuum (STEMMUS–SCOPE v1.0.0) / Y. Wang, Y. Zeng, L. Yu [et al.] // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. – 2 Newton. – Т. 128, № 4. – С. 1–25. – DOI: 10.1029/2023JG007567.
15. Xia, Q. Determination of Fv/Fm from Chlorophyll to Fluorescence without Dark Adaptation by an LSSVM Model / Q. Xia, H. Tang, L. Fu, J. Tan, G. Govindjee, Y. Guo // Plant Phenomics. – 2023. – Vol. 5. – Art. No. 0034. – DOI: 10.34133/plantphenomics.0034.
16. Poudyal, D. Phenotyping from lab to field - tomato lines screened for heat stress using Fv/Fm maintain high fruit yield during thermal stress in the field / D. Poudyal, E. Rosenqvist, C.-O. Ottosen // Functional Plant Biology. – 2018. – Vol. 46. – Pp. 44-55. – DOI: 10.1071/FP17317.
17. Икконен, Е. Н. Кратковременные ежесуточные понижения температуры могут нивелировать негативный эффект круглосуточного освещения на фотосинтетический аппарат растений / Е. Н. Икконен, Т. Г. Шибаева, Е. Г. Шерудило, А. Ф. Титов // Физиология растений. – 2023. – Т. 70, № 4. – С. 402–409. – DOI: 10.31857/S0015330323600092.

18. Belov A.N. Microservice Software Complex For Testing Instruments And Automation Tools Based On Asynchronous Data Exchange [Электронный ресурс] / A.N. Belov, E.V. Kurnasov, A.M. Ermolaev // Problems of Artificial Intelligence. – 2026. – No. 2 (41). – Pp. 158-172. – URL: https://paijournal.guiaidn.ru/ru/2026/2(41)-14.html.
19. RD-APK 1.10.09.01-14. Methodological recommendations for the technological design of greenhouses and greenhouse complexes for growing vegetables and seedlings.
20. Bobkov, V. A. The yield of cucumber (Cucumis sativus L.) when grown on mineral wool with the use of drip irrigation / V. A. Bobkov, S. A. Tereshchenko // Bulletin of Youth Science. – 2022. – No. 1(33).
21. Sushchenya R.V. A Method For Balancing The Load Of Nodes In Distributed Systems With State Constraints Based On Multidimensional Diagnosis [Электронный ресурс] / R.V. Sushchenya A.N. Belov, V.E. Petrov // Problems of Artificial Intelligence. – 2026. – No. 2 (41). – Pp. 146-156. – URL: https://paijournal.guiaidn.ru/ru/2026/2(41)-13.html.
22. Burukina A.A. Cyberphysical System For Monitoring And Control Of Plant Growing Conditions In A Combined Hydroponic-Aeroponic System [Элект ронный ресурс] / A.A. Burukina, E.V. Kurnasov, A.M. Volodina // Problems of Artificial Intelligence. – 2026. – No. 2 (41). – Pp. 62-74. – URL: https://paijournal.guiaidn.ru/ru/2026/2(41)-6.html.

RESUME

A. Y. Karpovsky, D. N. Kuznetsov, I. I. Strelnikov

A Mathematical Model of the Dependence of the Quantum Yield of Fluorescence on the parameters of the microclimate in greenhouses

The article is devoted to the problem of mathematical modeling of the photochemical efficiency of photosystem II of common cucumber (Cucumis sativus L.) plants using the chlorophyll fluorescence parameter Fv/Fm. The relevance is due to the need to formalize feedback from a biological object to create automated greenhouse climate control systems.

The input parameters of the model are air temperature and relative humidity, integrated through the water vapor pressure deficit indicator (VPD). The methodological framework includes a Gaussian-type temperature dependence and an empirical dependence of stomatal conductivity on VPD, adapted to evaluate the Fv/Fm response. The model is implemented on the Engee platform (ngscript language).

A nonlinear analytical model is obtained that formalizes a plant as a control object with a measurable output variable. The region of optimal microclimate values (T≈24°C, VPD ≈1.1 kPa), at which Fv/Fm ≈0.83, as well as a monotonous decrease in the indicator with a deviation of the parameters, is revealed. The computational efficiency of the model and its suitability for simulation analysis are demonstrated.

The proposed model has an analytical form, a small number of parameters and versatility (adapts to different cultures). It is recommended for use in greenhouse climate control systems, digital counterparts of agricultural facilities and in the model-oriented design of automatic control algorithms in order to optimize energy consumption and reduce plant stress.

РЕЗЮМЕ

А. Ю. Карповский, Д. Н. Кузнецов, И. И. Стрельников

Математическая модель зависимости квантового выхода флуоресценции от параметров микроклимата в условиях теплиц

Статья посвящена задаче математического моделирования фотохимической эффективности фотосистемы II растений огурца обыкновенного (Cucumis sativus L.) по параметру флуоресценции хлорофилла Fv/Fm. Актуальность обусловлена необходимостью формализации обратной связи от биологического объекта для создания автоматизированных систем управления микроклиматом теплиц.

Входными параметрами модели являются температура воздуха и относительная влажность, интегрированные через показатель дефицита давления водяного пара (VPD). Методическая основа включает температурную зависимость гауссовского типа и эмпирическую зависимость устьичной проводимости от VPD, адаптированную для оценки отклика Fv/Fm. Модель реализована на платформе Engee (язык ngscript).

Получена нелинейная аналитическая модель, формализующая растение как объект управления с измеряемой выходной переменной. Выявлена область оптимальных значений микроклимата (T≈24°C, VPD ≈1.1 кПа), при которых Fv/Fm ≈0.83, а также монотонное снижение показателя при отклонении параметров. Продемонстрирована вычислительная эффективность модели и её пригодность для имитационного анализа.

Предложенная модель обладает аналитической формой, малым числом параметров и универсальностью (адаптируется под разные культуры). Она рекомендуется для использования в системах климат-контроля теплиц, цифровых двойниках агрообъектов и при модельно-ориентированном проектировании алгоритмов автоматического управления с целью оптимизации энергозатрат и снижения стресса растений.

Карповский Артур Юрьевич – первый заместитель директора по научной работе, Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», г. Донецк. *Область научных интересов*: приборостроение и радиоэлектроника, эл. почта oagm308@mail.ru, адрес 283003, г. Донецк, пр. Ильича, дом 93, телефон +7949 336-05-66. ORCID 0000-0003-0478-0182.
Кузнецов Дмитрий Николаевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронной техники ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет». *Область научных интересов*: разработки в области электроники, приборостроения и робототехники, эл. почта kuzen2000@rambler.ru, адрес 283001, г. Донецк, ул. Артема, дом 58, телефон +79493470976. ORCID 0000-0003-2136-7760.
Стрельников Иван Игоревич – к.б.н., заведующий лабораторией экологической информатики и моделирования ФГБ НУ «Донецкий ботанический сад». *Область научных интересов*: экологическая пластичность растений; анатомо-морфологическая изменчивость; роль климата в формировании адаптивного потенциала продуцентов; оптические свойства листовых пластин; анализ цифровых изображений; машинное обучение, эл. почта ivanstrel87@gmail.com, адрес 283023, г. Донецк, пр. Ильича, 110, телефон +79493734730. ORCID 0000-0002-5580-0641.

Karpovsky Artur Yurievich – First Deputy Director for Scientific Work, State Budgetary Institution "Scientific Research and Design Institute for Automation of Mining Machines "Automatgormash named after V.A. Antipov", Donetsk. Research interests: instrument engineering and radio electronics, e-mail oagm308@mail.ru , address: 93 Ilyich ave., Donetsk, 283003, phone: +7949 336-05-66. ORCID 0000-0003-0478-0182.
Kuznetsov Dmitry Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electronic Engineering, Donetsk National Technical University. *Research interests:* developments in the field of electronics, instrumentation and robotics, e-mail kuzen2000@rambler.ru, address: 58 Artyom str., Donetsk, 283001, phone: +79493470976. ORCID 0000-0003-2136-7760.
Strelnikov Ivan Igorevich – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Environmental Informatics and Modeling at the Donetsk Botanical Garden. *Area of scientific interests*: ecological plasticity of plants; anatomical and morphological variability; the role of climate in the formation of adaptive potential of producers; optical properties of leaf plates; digital image analysis; machine learning, e-mail ivanstrel87@gmail.com, address: 110 Ilyich Ave., Donetsk, 283023, phone: +79493734730. ORCID 0000-0002-5580-0641.

Статья поступила в редакцию 27.03.2026;
одобрена после рецензирования 30.06.2026; принята к публикации 02.09.2026
The article was submitted 27.03.2026; approved after reviewing 30.06.2026;
accepted for publication 02.09.2026.