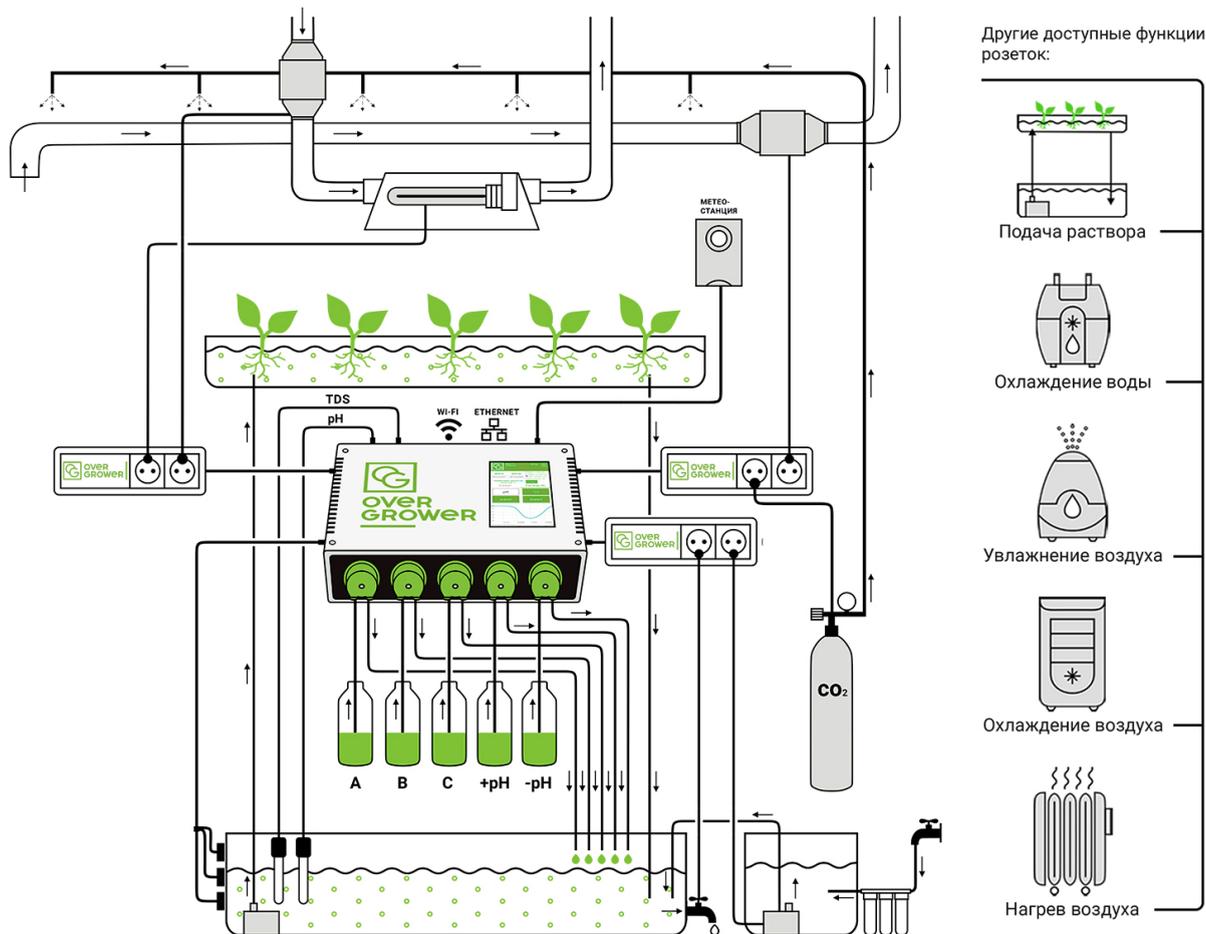


## Цифровые фермы OverGrower

*Травников В. А., Тютюльников М. А., Гарипов Т. А., Колобенко В. В.*

Сегодня большинство людей в мире живут в городах, и, по прогнозам ООН, уже к 2050 году в них будут проживать 86% всех жителей развитых стран. При этом число плодородных земель в мире ежегодно сокращается, и уже через пару десятков лет ресурсов перестанет хватать, станет всё тяжелее обеспечивать мегаполисы свежими продуктами. Одним из возможных решений этой проблемы является новое направление в сельском хозяйстве – сити-фермерство. Как следует из названия, продукты при таком подходе выращиваются в городе, а не за его пределами. Сити-фермерство является общемировым трендом: это дает колоссальную экономию на логистике и ресурсах, что очень актуально для перенаселенных территорий. Ввиду ограниченности площадей, занятие сельским хозяйством существенно отличается в городе и сельской местности. Как правило, сити-фермерство имеет более высокую научную и технологическую составляющую, чем традиционное фермерство.

Одним из перспективных технических подходов системной и математической биологии в задачах сити-фермерства является создание цифровых математических моделей биологических систем - цифровых двойников. Объектом моделирования может стать любая биологическая система, например: вирусы, растения, животные и так далее. Вычислительные системы биологии нацелены на развитие и использование эффективных алгоритмов, структур данных, визуализации и средств коммуникации для компьютерного моделирования биологических систем. Это предполагает использование компьютерного моделирования биологических систем, включая как клеточные подсистемы, так анализ и визуализацию сложных соединений этих клеточных процессов. Глобальной целью проекта, над которой мы планировали работать в ходе Большой математической мастерской, является создание цифровых двойников сельскохозяйственных растений (в нашем проекте, это растение – томат), при помощи которого мы смогли бы вывести более эффективные сорта культур. Опишем далее задачу более конкретно. Для того, чтобы работать с биологическими системами в цифровом виде, необходимо научиться снимать показатели с этой биологической системы. Прибор для съема всех показателей, имеющих значение в процессе выращивания растений на сити-фермах, был разработан научно-производственной компанией «Современные Системы Выращивания», президент которой является заказчиком данного проекта. Этот прибор называется OverGrower™, он предназначен, главным образом, для полной автоматизации выращивания растений гидропонным и другими методами. Схема взаимодействия данного прибора с растениями, с которыми он соединен, представляется примерно следующим образом:



Прибор представляет собой достаточно компактное устройство. Ниже приведен пример фермы, взаимодействующей с OverGrower™.

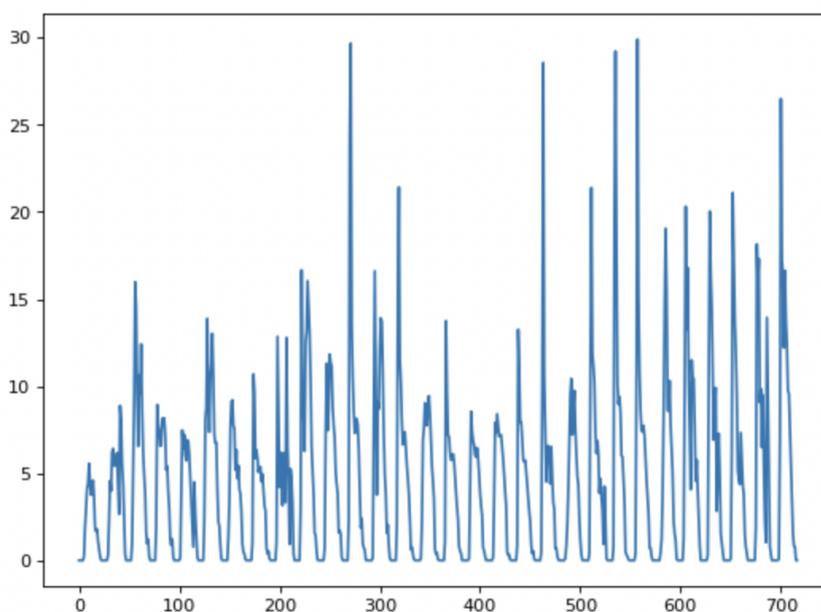


Использование измерительных возможностей прибора OverGrower™ даёт уникальную возможность для создания новых подходов в моделировании и прогнозировании биологических систем. При домашнем выращивании для индивидуального использования прибор позволяет заменить агронома в ряде аспектов и избавить сити-фермера от рутинных задач, связанных с добавлением удобрений и отслеживания

параметров раствора, что фактически снижает риск потери урожая. Но для более масштабного выращивания, например для крупных сити-ферм, автоматического контроля за процессом недостаточно, так как необходимо учитывать множество других факторов, о которых знают только квалифицированные агрономы-технологи. Для таких производств прибор OverGrower™ становится специализированным инструментом, который позволяет не только контролировать процессы сити-фермы, но и прогнозировать возможные проблемы и заранее их устранить, чтобы снизить риск потери продукции и затраты, а также улучшить показатели урожайности. Совместно используя прибор OverGrower™ с научным оборудованием для фитомониторинга, можно проводить исследования культур и даже выводить новые улучшенные сорта.

В ходе работы над проектом на Большой математической мастерской наша команда осознала большой масштаб задачи, в связи с чем было принято решение изучить один из множества факторов, влияющих на рост томата. Этим фактором был выбран индекс водного стресса – это величина, характеризующая необходимость полива растения в данный момент времени. Она необходима для того, чтобы исключить чрезмерный или недостаточный полив.

Работа над индексом водного стресса началась с поиска неточностей в существующем алгоритме. В компании уже предпринимались попытки рассчитать этот индекс, но они не увенчались успехом, поскольку значения, выдаваемые этим алгоритмом, лежали в интервале (-5000; 5000) и фактически не имели никакого практического смысла. В первую неделю межмодуля эта ошибка была найдена и исправлена. При тестировании на исторических данных алгоритм выдавал значение в интервале (0; 40) со средним значением 4 (график 1).



*График 1. Почасовой график индекса водного стресса*

Такой результат, безусловно, был лучше, но тем не менее не удовлетворял по ряду причин. Во-первых, разброс значений не устраивал полностью. Периодическое наличие выбросов далеко за пределы единицы и среднее значение равно четырем не позволяло окончательно доверять этому методу. Скорее всего, это можно связать с коэффициентами в формулах, которые находятся из условий выращивания и определяются с некоторой неточностью. Во-вторых, данный способ никак не учитывал показаний с датчиков, установленных на растениях, так как использовал только информацию об условиях окружающей среды и, исходя из этого, рассчитывал теоретическое потребление воды и уровень стресса. В связи с этим нами были предприняты попытки найти способы, использующие информацию с растений (температуру листьев, интенсивность сокодвижения, колебания диаметров стебля и плодов). Проведя поиск, мы остановились на методах с использованием температуры листа и интенсивностью сокодвижения.

Рассмотрим подробнее способ с использованием температуры листа. Так выглядят основные формулы его расчета.  $T_c$  – температура листа,  $T_a$  – температура воздуха.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{ll}}{(T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_{ll}}$$

$$(T_c - T_a)_{ll} = b + a(VPD)$$

$$(T_c - T_a)_{ul} = b - a|VPG|$$

$$VPD = e_s(T_a) - e_a$$

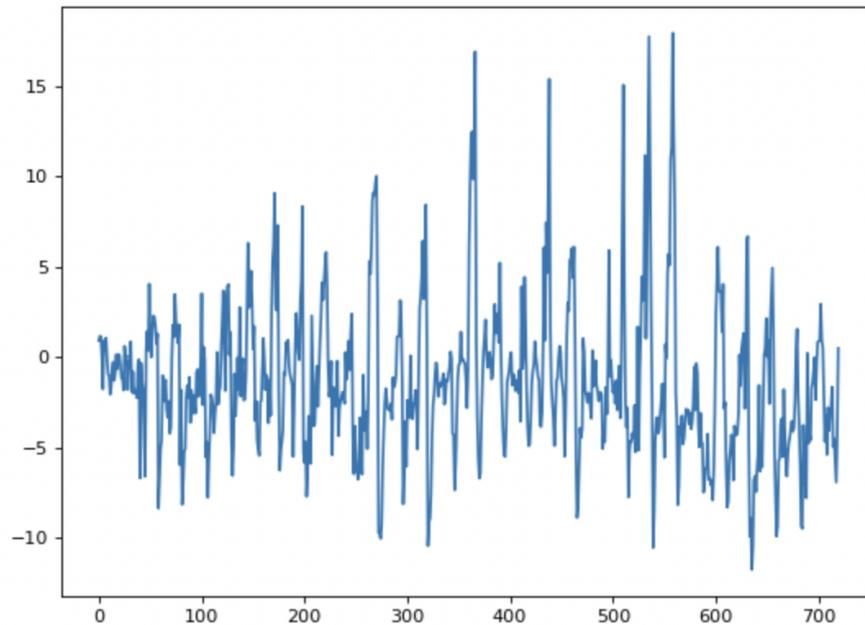
$$VPG = e_s(a + T_a) - e_s(T_a)$$

$$e_s(T_a) = (0.6108 \times EXP(\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3}))$$

$$e_a = e_s(T_a) \times (\frac{RH}{100})$$

В качестве входных параметров для определения CWSI (Crop water stress index) используются температура воздуха, температура листа, дефицит давления водяного пара. Эти данные приходят с датчиков. Помимо параметров среды, также необходимо знать регрессионные коэффициенты  $a$  и  $b$ , которые в свою очередь нужно получить из исторических данных. Для получения этих коэффициентов, а также для дальнейшей валидации модели, необходимы данные о росте томатов при «краевых» условиях среды, то есть при достаточном увлажнении и засухе. Из-за того, что данные были собраны при неконтролируемых условиях среды и в отсутствии какой-либо постановки

эксперимента, такие условия не моделировались. В связи с этим не удалось выявить явные закономерности и полностью настроить модель. Аналогичная ситуация обстояла и с датчиком сокодвижения.



*График 2. Почасовой график CWSI*

На этом наша работа над проектом не завершается. Ближайшей целью является доведение этого алгоритма до состояния, при котором он будет иметь достаточную точность для применения в индустрии. Поскольку для данного алгоритма нет аналогов на рынке, мы планируем также подать заявку на грант, подходящий по тематике нашего проекта, или выступить в бизнес-акселераторе с целью привлечения дополнительных средств для проведения экспериментов, которые необходимы для уточнения работы алгоритма.