

УДК 004.94

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.40.1.029](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.029)

Автоматизация выращивания агрокультур в стационарном компактном тепличном комплексе с контролируемым микроклиматом на базе гидропонной системы

Д.К. Левоневский¹✉, А.В. Рябинов¹, Н.А. Жукова¹, В.Э. Ковалевский²

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Учебный центр «Амилен», Санкт-Петербург, Российская Федерация
levonevskij.d@ias.spb.su✉

Резюме. В настоящее время в сельском хозяйстве активно идет автоматизация процессов производства. Решения в области автоматизации сельского хозяйства позволяют сократить затраты времени и средств на производство продуктов питания и уменьшить влияние человеческого фактора – ошибок, которые могут повлечь гибель культур и нанести существенный урон предприятию. В статье рассматривается вопрос автоматизации и моделирования технологических процессов выращивания агрокультур в стационарном компактном тепличном комплексе с контролируемым микроклиматом на базе гидропонной системы. Представлена схема и модель поведения подобного комплекса, который позволяет производить циклическое выращивание путем периодического подтопления грунта питательным раствором, очищаемым с помощью биофильтра. Для моделирования поведения мини-теплицы использованы диаграммы состояний в нотации UML. Рассмотрена задача оценки работоспособности подобных модулей и фиксации нарушения технологических процессов выращивания на основе собранных данных. Использованы методы машинного обучения для оценки и прогнозирования климатических параметров в установке. Применение этих методов позволяет выполнять проактивный контроль технологических процессов в теплице, обеспечивать четкое соблюдение регламентов выращивания и экономно использовать ресурсы. Дальнейшие исследования предполагают построение метода проактивного контроля соблюдения технологических процессов на основе их формальных моделей.

Ключевые слова: умное сельское хозяйство, киберфизические системы, автоматизированная теплица, моделирование поведения, автоматизированная система управления технологическим процессом.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Гранта Президента № МК-5056.2022.1.6.

Для цитирования: Левоневский Д.К., Рябинов А.В., Жукова Н.А., Ковалевский В.Э. Автоматизация выращивания агрокультур в стационарном компактном тепличном комплексе с контролируемым микроклиматом на базе гидропонной системы. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1280>
DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.029

Automation of growing crops in a stationary compact greenhouse complex with a controlled microclimate based on a hydroponic system

D.K. Levonevskiy¹✉, A.V. Ryabinov¹, N.A. Zhukova¹, V.E. Kovalevsky²

¹Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation

²*Amilen training center, Saint Petersburg, Russian Federation
levonevskij.d@ias.spb.su*

Abstract. Automation processes are currently being implemented in agriculture. Solutions in the field of agricultural automation and smart agriculture can reduce time expenditure and cost of crop production and lessen the impact of the human factor, i.e. mistakes that can lead to the death of crops and cause significant damage to the enterprise. This article deals with the issue of automation and modeling of technological processes of growing crops in stationary compact greenhouse complexes with a controlled microclimate based on a hydroponic system. A diagram and a model of the behavior of such complex is presented in the article. The complex helps to perform cyclic cultivation by periodic irrigation with a nutrient solution cleaned with a biofilter. To model the behavior of a mini-greenhouse, UML state diagrams were used. The problem of evaluating the performance of such modules and recording disruptions of cultivation process drawing on the collected data was considered. Machine learning methods were employed to estimate and predict climatic parameters in the greenhouse. The application of these methods allows performing proactive control of technological processes in the greenhouse, ensure strict adherence to production regulations and rational use of resources. Further research involves creating a method for proactive control of compliance with technological processes based on the formal models of these processes.

Keywords: smart agriculture, cyber-physical systems, smart greenhouse, behavior modeling, automated process control systems.

Acknowledgements: this research was funded by the President Grant No. MK-5056.2022.1.6.

For citation: Levonevskiy D.K., Ryabinov A.V., Zhukova N.A., Kovalevsky V.E. Automation of growing crops in a stationary compact greenhouse complex with a controlled microclimate based on a hydroponic system. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1280> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.029 (In Russ.).

Введение

Одной из сфер, в которых в настоящее время идет активная автоматизация производственных процессов, является сельское хозяйство. Робототехнические комплексы и киберфизические системы широко используются в различных задачах – при посеве, контроле процесса выращивания, борьбе с вредителями [1, 2]. Для этих задач разрабатываются модели, методы и системы, которые можно отнести к области «умного сельского хозяйства» (smart agriculture) [3]. Важной областью применения таких систем является автоматизация технологических процессов в тепличных комплексах – автономных программируемых установках, в которых выполняется контроль параметров и процессов, необходимых для успешного выращивания культур – температуры, влажности, уровня воды, полива, фильтрации, аэрации питательным раствором и т. п. [4].

Такие решения позволяют сократить затраты времени и средств на выращивание растений и снизить влияние человеческого фактора – ошибок, которые могут повлечь гибель культур и нанести существенный урон предприятию [5]. На актуальность задачи также оказывают влияние такие факторы, как увеличение популяции населения, потребность в снижении пагубного воздействия на окружающую среду, сокращение сельскохозяйственных мощностей ввиду изменений логистических цепей, изменения климата [6, 7].

Для создания и внедрения подобных решений необходимо выполнять моделирование поведения установок, чтобы гарантировать достаточную точность соблюдения технологических процессов и своевременно выявлять отклонения от них.

Целью работы является повышение уровня автоматизации технологических процессов в компактных вертикальных фермах. Для этого выполняется разработка

компактного тепличного комплекса, строится модель его функционирования, а также выполняется моделирование, которое позволит сделать оценку соответствия фактической реализации технологического процесса выращивания заданным требованиям.

Материалы и методы

Существует ряд моделей, методов, алгоритмов и архитектур для автоматизации технологических процессов выращивания культур в закрытых тепличных комплексах. К примеру, в работе [6] предложена автоматизированная система мониторинга тепличных комплексов с применением датчиков температуры, влажности воздуха и почвы, освещенности. Мониторинг выполняется с помощью Google Cloud, а информирование осуществляется по SMS. Однако используемые протоколы не способствуют надежности и расширяемости решения, также нет возможности управлять параметрами. Другое решение в области мониторинга предлагается в работе [8], где авторы также предлагают систему мониторинга температуры, влажности воздуха и влажности почвы в теплице с использованием Arduino и Raspberry Pi и предлагают соответствующую облачную архитектуру.

В работе [9] рассмотрена система с датчиками освещенности, влажности и температуры. Авторы сформулировали правила, в соответствии с которыми на различных датчиках устанавливаются необходимые пороговые значения для поддержания здорового роста тех или иных видов растений. Проведенные эксперименты доказали эффективность использования нечеткой логики для автоматизации системы орошения за счет снижения уровня водопотребления.

В статье [10] представлена архитектура системы автоматического контроля и управления температурой, влажностью воздуха и уровнями освещенности в теплице с помощью программируемого логического контроллера. Управление параметрами выполняется с помощью реле. Однако система не обеспечивает контроль всех параметров технологического процесса. Другое решение в области контроля климата описано в работе [11], где предложена система управления температурой и влажностью в теплице. Реализована распределенная система управления на базе программируемого логического контроллера, подключенного к группе датчиков и исполнительных устройств с помощью шины. Тем не менее, система охватывает лишь часть технологических процессов в теплице.

В статье [12] представлена автоматическая система управления теплицей для сокращения расхода воды при поливе. Система круглосуточно отслеживает влажность почвы и другие параметры, и в случае отклонения использует исполнительные устройства для нормализации микроклимата. Предлагаемая система автоматического полива сочетает в себе капельный полив и распылитель, что позволило добиться экономии воды 48,78 % по сравнению с ручным поливом.

При этом среди известных решений отсутствуют такие, которые позволяют автоматизировать полный технологический процесс выращивания культур в компактных вертикальных фермах (мини-теплицах) с контролем по крайней мере трех необходимых параметров – температуры, влажности и освещенности.

Результаты

Рассмотрим для начала разработанную компактную установку для выращивания культур (далее – мини-теплица), после чего построим модели ее функционирования и контроля технологических процессов. Внешний вид разработанной мини-теплицы приведен на Рисунке 1. Она позволяет производить циклическое выращивание путем

периодического подтопления (орошения) питательным раствором, который очищается через биофильтр. Установка занимает предполагаемую площадь 600*400*600 мм. Питание приборов входного напряжения 220V конвертируется блоком питания в 12V и 5V соответственно подобранным узлам и агрегатам. В установке используется контроллер и модули управления различными приборами (насос, аэратор, УФ-стерилизатор, светильник, вентилятор, увлажнитель) при помощи фиксации показаний датчиков климатических условий и закрывающегося герметичного бокса – камеры выращивания. На Рисунке 2 приведена взрыв-схема мини-теплицы, на которой отмечены ее основные компоненты.



Рисунок 1 – Общий вид мини-теплицы
Figure 1 – General view of the mini-greenhouse

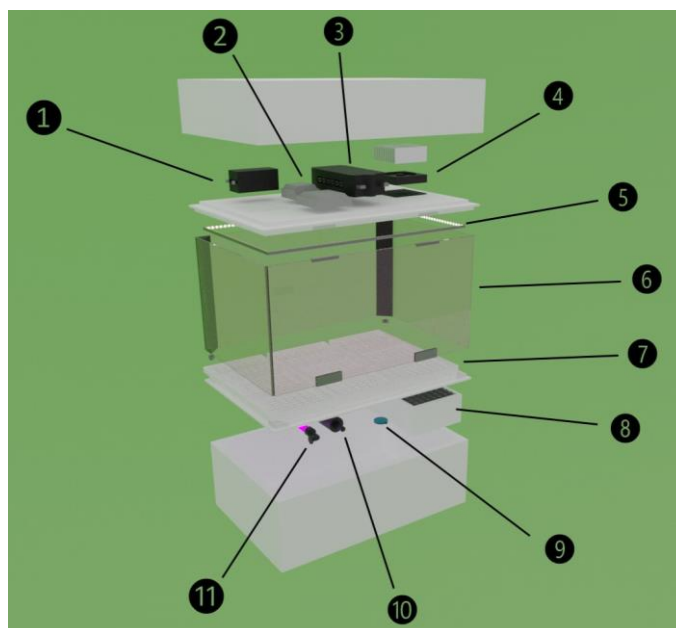


Рисунок 2 – Взрыв-схема мини-теплицы
Figure 2 – Exploded view diagram of the mini-greenhouse

На схеме изображены основные компоненты автоматизированного тепличного комплекса, к которым относятся:

1. Аэратор (компрессор).
2. Блок управления (контроллер).
3. Блок питания.
4. Вентилятор (кулер), над которым расположен радиатор; в крышке около аэратора также имеются вентиляционные прорези для пассивной вытяжки воздуха измещением из бокса.
5. Фитосветильник с усиленным синим и красным спектром.
6. Стекло (обычное, 6-8 мм, триплекс, акрил, поликарбонат монолитный или оргстекло).
7. Многоразовые сменные кассеты для гидропоники.
8. Биологический фильтр (многослойный, многокомпонентный: вулканическая лава, пемза, керамика, нейлон, органическая губка, мраморная крошка).
9. Аэрирующий камень для вывода воздуха из компрессора.
10. Насос (помпа) с собственным фильтром механической очистки.
11. Ультрафиолетовая лампа погружная для дезинфекции воды или раствора.

Кроме этого, тепличный комплекс содержит и другие компоненты – увлажнитель воздуха, датчики, шланги, трубки, емкости, индикаторы, преобразователи.

Для моделирования поведения мини-теплицы использованы диаграммы состояний в нотации UML. Поскольку система представляет из себя конечный автомат, она наиболее лаконично описывается именно таким типом диаграммы. Общая диаграмма состояний мини-теплицы приведена на Рисунке 3.

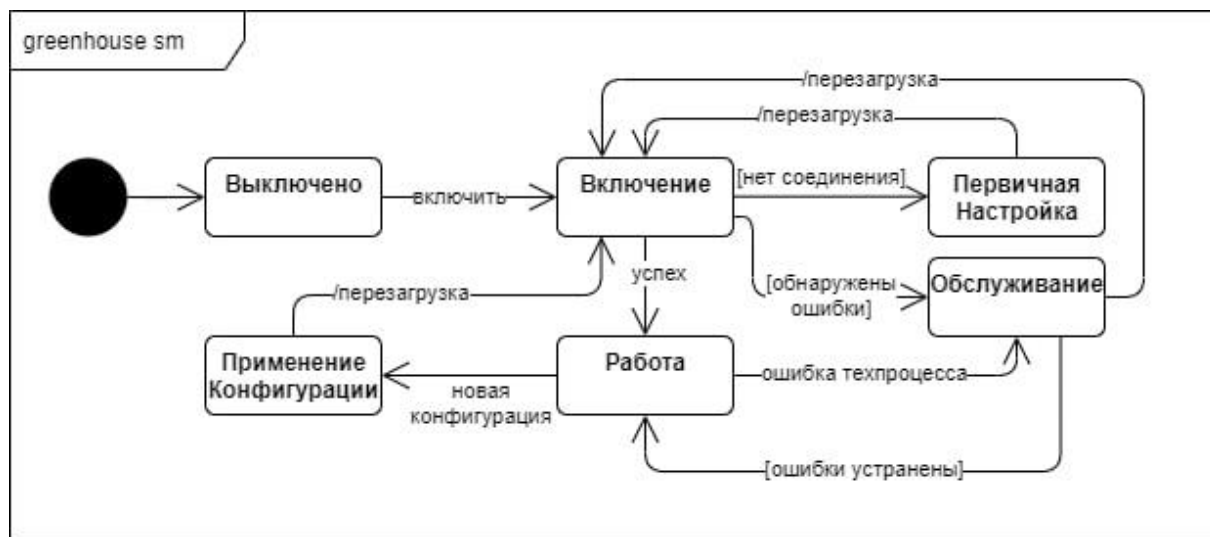


Рисунок 3 – Общая диаграмма состояний мини-теплицы
Figure 3 – General state diagram of the mini-greenhouse

Рассмотрим более подробно описание каждого состояния.

1. «Выключено» – начальное состояние.
2. «Включение». В этом состоянии система производит попытку подключиться к сети Wi-Fi или к устройству Bluetooth (в случае неудачи – переход в состояние «Первичная Настройка»), а затем проводит проверку всех подсистем на наличие ошибок (в случае наличия ошибок – переход в состояние «Обслуживание»). В случае успеха происходит переход в состояние «Работа».

3. «Работа». Основное состояние системы, в котором производятся все необходимые измерения и операции, связанные с технологическим процессом: переключение режимов работы устройств, контроль параметров, отправка данных на сервер. В ходе контроля параметров в том числе отслеживается поступление команд от сервера на изменение конфигурации, при котором происходит переход в состояние «Применение Конфигурации». Также производится постоянный мониторинг наличия неполадок и / или отклонений от технологического процесса и контроль критически важных параметров (например, уровня воды в емкости). При обнаружении ошибок технологического процесса происходит переход в режим «Обслуживание».

4. «Обслуживание». В этом состоянии система отправляет на сервер отчет об обнаруженных неполадках и ожидает исправления этих неполадок путем непрерывного мониторинга параметров.

5. «Первичная Настройка». В этом состоянии система создает хот-спот Wi-Fi и простейший веб-интерфейс для настройки соединения к Wi-Fi сети и первичной настройки параметров работы. Также в этом состоянии производится поиск Bluetooth-соединений. После ввода данных пользователем система перезагружается (переход в состояние «Включение»).

6. «Применение конфигурации». В этом состоянии система производит изменение внутренних переменных и параметров для соответствия новой полученной конфигурации (новому технологическому процессу), после чего перезагружается (переход в состояние «Включение»).

Ключевыми состояниями являются «Включение» и «Работа». Эти состояния являются сложными, и установка, находящаяся в этих состояниях, выполняет ряд действий. Поэтому указанные состояния описываются диаграммами активности. На Рисунке 4 представлена диаграмма для состояния «Включение», на Рисунке 5 – для состояния «Работа».

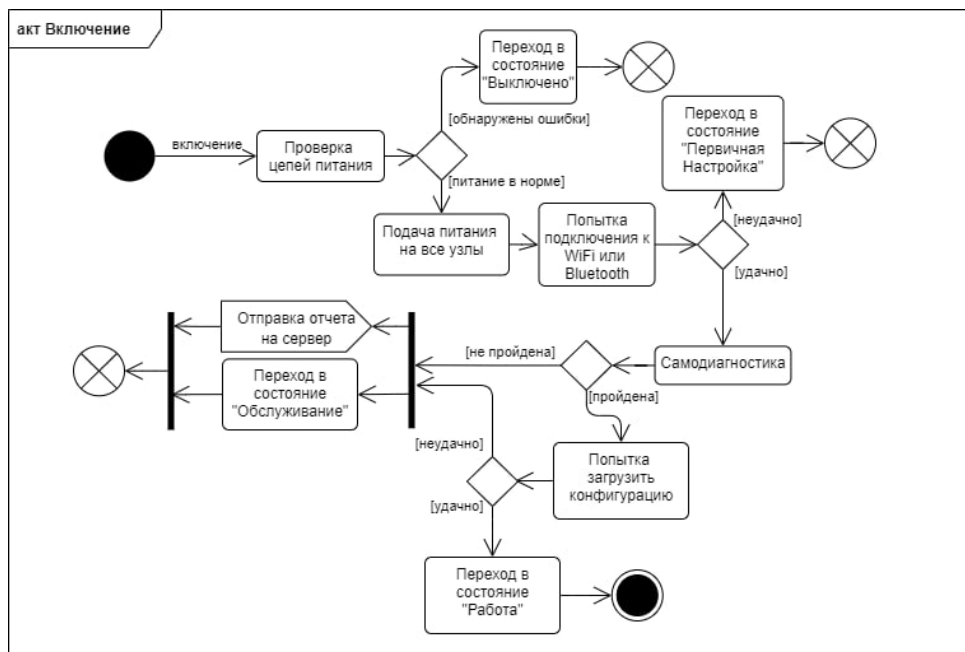


Рисунок 4 – Диаграмма активности для состояния «Включение»
Figure 4 – Activity diagram for “Powering On” state

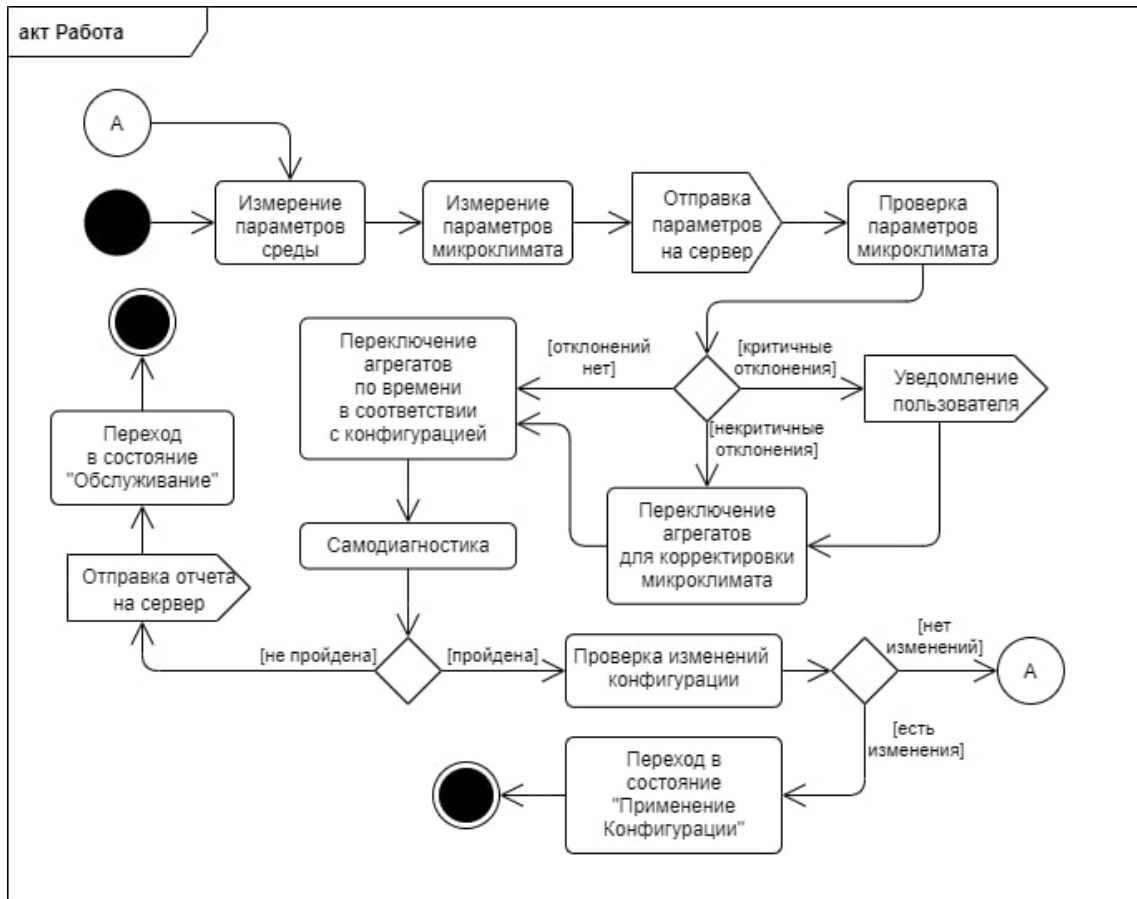


Рисунок 5 – Диаграмма активности для состояния «Работа»
Figure 5 – Activity diagram for “Operation” state

Имеется возможность оценивать работоспособность подобных модулей и фиксировать нарушения технологических процессов, используя собранные данные и инструменты их анализа. В качестве исходных данных использован существующий набор данных «Vertical farming» [13]. Содержащиеся в нем данные относятся к секциям, которые используются для выращивания культур в вертикальных теплицах закрытого типа, аналогичным мини-теплице, предложенной выше. Секции имеют два идентичных вертикальных слоя, в которых реализуются технологические процессы (А и В).

Обсуждение

Рассмотрим гистограммы одной из секций. На Рисунках 6 и 7 изображены гистограммы температуры и влажности.

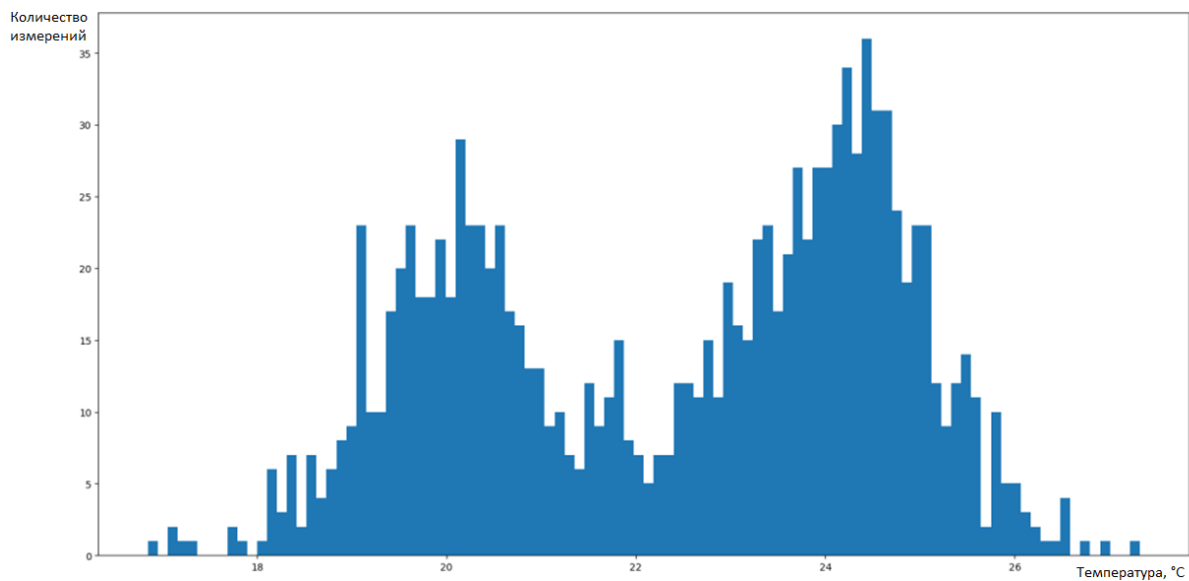


Рисунок 6 – Гистограмма температуры
 Figure 6 – Temperature histogram

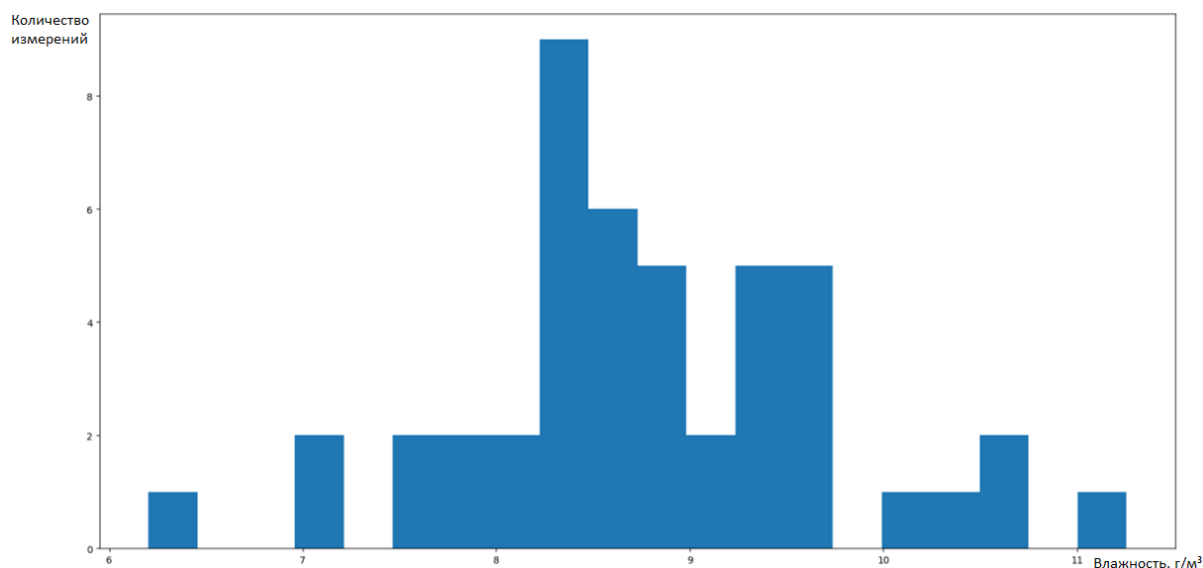


Рисунок 7 – Гистограмма влажности
 Figure 7 – Humidity histogram

На гистограмме температуры видны два локальных максимума, которые соответствуют дневной и ночной температуре. Для влажности используем среднее значение. Рассмотрим изменение температуры относительно времени. Для наглядности возьмем интервал в 7 суток (Рисунок 8).

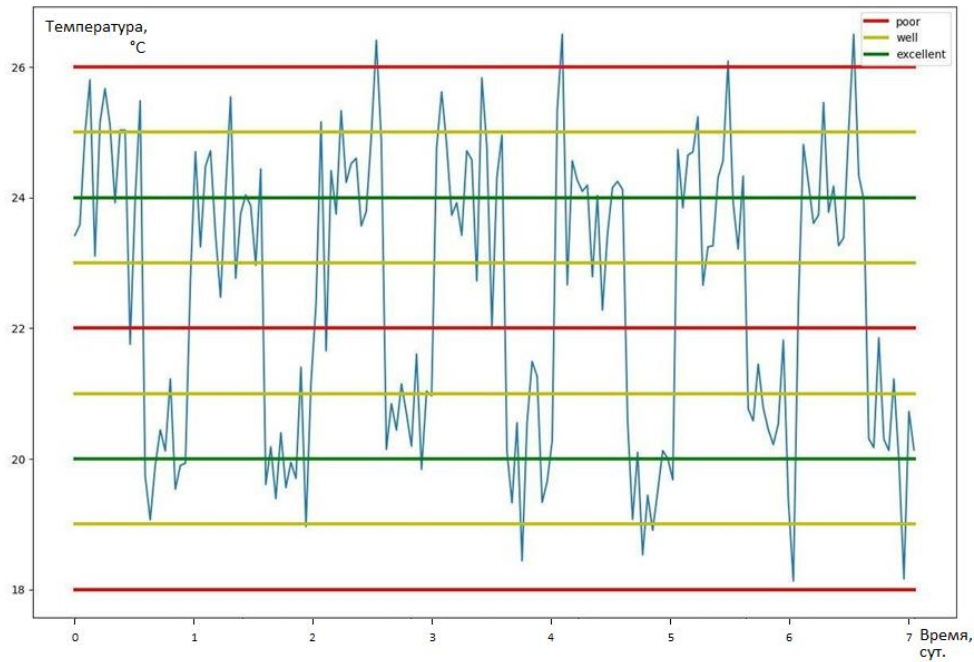


Рисунок 8 – График изменения температуры
 Figure 8 – Temperature chart

Из графика видно, что можно оценить стабильность работы установки по температуре относительно времени. Если температура выходит за заданные рамки ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), то можно заключить, что в секции имеется нарушение технологического процесса.

Рассмотрим поведение влажности. Для нее также наблюдается периодичность. Для наглядности на Рисунке 9 представлена сглаженная функция по значениям относительной влажности в течение 50 суток.

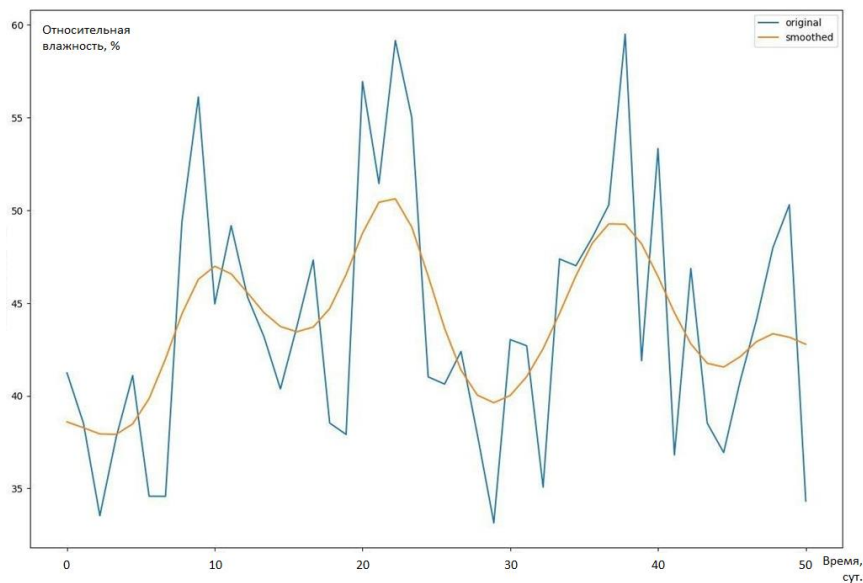


Рисунок 9 – График изменения относительной влажности
 Figure 9 – Relative humidity chart

К контролю по температуре можно добавить пороги для относительной влажности (среднее значение $\pm 10\%$). Сложность реализации такого подхода на выбранном наборе данных состоит в том, что вывод о соблюдении или несоблюдении технологического процесса делается не регулярно, а по факту предоставления влажности и с использованием ближайшего к этому факту по времени значения температуры, которое может быть неактуально.

Решением является более тщательная подготовка или предобработка набора измерений, используемых для принятия решений. Реализация предложенного тепличного комплекса, в котором выполняется систематический сбор данных обо всех параметрах технологического процесса, позволит решить эту проблему.

Кроме того, возможно оценивать работоспособность слоев теплицы и контролировать процесс выращивания проактивно, выполняя прогнозирование параметров климата на основе собранных данных. Для этого в работе использованы проекты Environment for knowledge analysis – WEKA и AutoML – AutoWEKA. В рамках этих фреймворков реализовано около 40 алгоритмов машинного обучения. Фреймворк AutoWEKA также позволяет автоматически выбрать наилучший алгоритм обучения и определить его гиперпараметры, используя байесовскую оптимизацию и комбинированный алгоритм CASH. Этот процесс детально описан в работе [14]. В качестве входных данных использован предобработанный набор данных [13] в табличном формате, приведенный к виду, содержащему следующие поля: ID куба (тепличной установки), отметка времени, температура слоя А, температура слоя В, флаг состояния двери (открыта или закрыта), влажность слоя А, влажность слоя В.

Для оценки работоспособности установки введен атрибут Target (работоспособность), который может принимать одно из следующих значений: 0 – оба слоя не работают, А – работает только слой А, В – работает только слой В, АВ – оба слоя работают. После добавления нового атрибута и присвоении ему значений, с помощью оценки значений температуры и влажности, получившийся набор данных был подан на вход системе AutoWEKA с параметрами работы: 15 минут, 1024Мб, 1 поток. Время обучения составило 23 секунды, доля правильно классифицированных объектов – 99,6 %, оптимальный классификатор – случайный лес. Подобранные параметры модели показаны на Рисунке 10. В частности, максимальная глубина деревьев – 5, количество признаков – 7, количество итераций – 44.

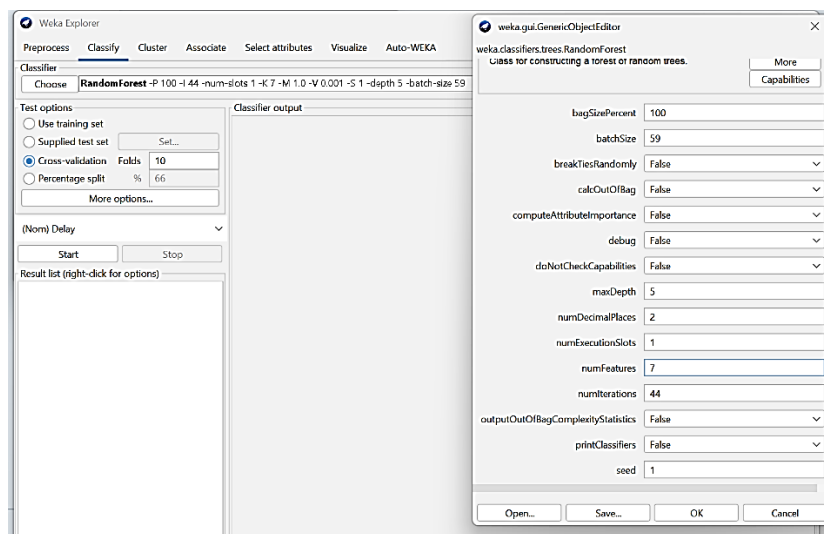


Рисунок 10 – Установка гиперпараметров в AutoWEKA
 Figure 10 – Setting hyperparameters in AutoWEKA

Для проактивного обнаружения отклонений от технологического процесса возможно использовать прогнозирование. Выполнив обучение на наборе уже измеренных климатических параметров, можно предсказать дальнейший ход процесса в теплице и сопоставить его с технологической картой (описанием идеального процесса). Таким образом можно выявить не только фактически произошедшее отклонение от технологического процесса, но и отклонение, которое может произойти в будущем. Это позволит заранее внести изменения в конфигурацию теплицы либо принять меры для устранения неисправности.

В качестве прогнозируемых величин используются параметры технологического процесса, а именно – температура, влажность, освещенность и т. п. В данной работе был проведен эксперимент, состоящий в прогнозировании влажности и температуры для набора входных данных, рассмотренного выше. Для этого также решаются задачи выбора оптимального алгоритма и его гиперпараметров.

К примеру, Таблица 1 иллюстрирует точность классификаторов для прогнозирования влажности в одном из слоев теплицы. Таблица 2 иллюстрирует полученные результаты для температуры в этом же слое.

Таблица 1 – Наиболее точные классификаторы для прогнозирования влажности

Table 1 – The most accurate classifiers for humidity forecasting

№	Параметры (время, выделенная память, потоки)	Время обучения	RMSE	RRSE, %	Количество конфигураций	Лучший классификатор
1	15 мин, 1024МВ, 1	9.4 с	0.66	51	29	AttributeSelected
2	30 мин, 1536МВ, 2	10.2 с	1.13	47	60	REPTree
3	45 мин, 2048МВ, 4	9.6 с	0.51	21	126	RandomForest

Таблица 2 – Наиболее точные классификаторы для прогнозирования температуры

Table 2 – The most accurate classifiers for temperature forecasting

№	Параметры (время, выделенная память, потоки)	Время обучения	RMSE	RRSE, %	Количество конфигураций	Лучший классификатор
1	15 мин, 1024МВ, 1	5.1 с	0.67	21	90	RandomForest
2	30 мин, 1536МВ, 2	4.5 с	0.67	21	171	RandomForest
3	45 мин, 2048МВ, 4	28.2 с	0.67	21	268	RandomForest

Расчеты показали, что наибольшей точности прогнозирования можно добиться с использованием метода случайного леса (RandomForest), в данном случае среднеквадратичная ошибка (RMSE) составляет 21 % в относительном выражении.

Заключение

Решения в области автоматизации сельского хозяйства позволяют сократить затраты времени и средств на выращивание культур и уменьшить влияние человеческого фактора. В данной статье предложена схема и модель компактного тепличного комплекса с контролируемым микроклиматом. Используются методы машинного обучения для оценки и прогнозирования климатических параметров в мини-теплице. Применение этих методов позволяет выполнять проактивный контроль технологических

процессов, обеспечивать четкое соблюдение регламентов выращивания и экономно использовать ресурсы.

Дальнейшие исследования предполагают построение метода проактивного контроля соблюдения технологических процессов на основе их формальных моделей. В ближайших планах выполнение сборки прототипа теплицы с использованием собственных и готовых решений, а также собственного программного обеспечения для проведения экспериментов и сбора данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Vasconez J.P., Kantor G.A., Auat Cheein F.A. Human-robot interaction in agriculture: A survey and current challenges. *Biosystems Engineering*. 2019;179:35–48. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005.
2. Azmi H.N., Hajjaj S.S.H., Gsangaya K.R., Sultan M., Mail M.F., Hua L.S. Design and fabrication of an agricultural robot for crop seeding. *Materials Today: Proceedings*. 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.191.
3. Gzar D.A., Mahmood A.M., Al-Adilee M.K.A. Recent trends of smart agricultural systems based on Internet of Things technology: A survey. *Computers and Electrical Engineering*. 2022;104A. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108453>.
4. Krestovnikov K., Korshunov D., Erashov A., Rogozin A. Scalable Architecture of Distributed Control System for Industrial Greenhouse Complexes. *Data Science and Intelligent Systems. CoMeSySo 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;231:127-132. DOI: 10.1007/978-3-030-90321-3_12.
5. Качанова О.А., Левоневский Д.К. Архитектура программного обеспечения автоматизированного тепличного комплекса на основе облачных технологий. *Программная инженерия*. 2021;12(9):475–489. DOI: 10.17587/prin.12.475-489.
6. Raj J.S., Ananthi J.V. Automation using IoT in greenhouse environment. *Journal of Information Technology and Digital World*. 2019;1(01):38–47. DOI: 10.36548/jitdw.2019.1.005.
7. Shamshiri R., Kalantari F., Ting K.C., Thorp K., Hameed I.A., Weltzien C., Ahmad D., Shad Z. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: a transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018;11(1):1–22. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210.
8. Shah N.P., Bhatt P. Greenhouse automation and monitoring system design and implementation. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2017;8(9):468–471. DOI: 10.26483/ijarcs.v8i9.4981
9. Cosman S.I., Bilatiu C.A., Marțiș C.S. Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. *2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*. 2019:1–4. DOI: 10.1109/EMES.2019.8795186.
10. Ko C.C., Mon S.S. Microcontroller based greenhouse automatic control system. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*. 2014;3(5):0865–70.
11. Gonzalez Perez I., Calderon Godoy A.J. Greenhouse automation with programmable controller and decentralized periphery via field bus. *2009 IEEE International Conference on Mechatronics*. 2009:1–6. DOI: 10.1109/ICMECH.2009.4957160.
12. Sivagami A., Hareeshvare U., Maheshwar S., Venkatachalapathy V.S.K. Automated irrigation system for greenhouse monitoring. *Journal of The Institution of Engineers (India)*. 2018;99(2):183–191. DOI: 10.1007/s40030-018-0264-0.

13. Sammari S. Vertical farming. Cubes which are used for advanced vertical farming. Доступно по: <https://www.kaggle.com/datasets/midouazerty/work-for-parmavir> (дата обращения: 15.10.2022).
14. Kotthoff L., Thornton C., Hoos H.H., Hutter F., Leyton-Brown K. Auto-WEKA: Automatic Model Selection and Hyperparameter Optimization in WEKA. *Automated Machine Learning. The Springer Series on Challenges in Machine Learning*. 2019:81–95. DOI: 10.1007/978-3-030-05318-5_4.

REFERENCES

1. Vasconez J.P., Kantor G.A., Auat Cheein F.A. Human-robot interaction in agriculture: A survey and current challenges. *Biosystems Engineering*. 2019;179:35–48. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005.
2. Azmi H.N., Hajjaj S.S.H., Gsangaya K.R., Sultan M., Mail M.F., Hua L.S. Design and fabrication of an agricultural robot for crop seeding. *Materials Today: Proceedings*. 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.191.
3. Gzar D.A., Mahmood A.M., Al-Adilee M.K.A. Recent trends of smart agricultural systems based on Internet of Things technology: A survey. *Computers and Electrical Engineering*. 2022;104A. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108453>.
4. Krestovnikov K., Korshunov D., Erashov A., Rogozin A. Scalable Architecture of Distributed Control System for Industrial Greenhouse Complexes. *Data Science and Intelligent Systems. CoMeSySo 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;231:127-132. DOI: 10.1007/978-3-030-90321-3_12.
5. Kachanova O.A., Levonevskiy D.K. Software architecture of an automated greenhouse complex based on cloud technologies. *Programmnyaya inzheneriya = Software Engineering*. 2021;12(9):475–489. DOI: 10.17587/prin.12.475-489. (In Russ.).
6. Raj J.S., Ananthi J.V. Automation using IoT in greenhouse environment. *Journal of Information Technology and Digital World*. 2019;1(01):38–47. DOI: 10.36548/jitdw.2019.1.005.
7. Shamshiri R., Kalantari F., Ting K.C., Thorp K., Hameed I.A., Weltzien C., Ahmad D., Shad Z. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: a transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018;11(1):1–22. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210.
8. Shah N.P., Bhatt P. Greenhouse automation and monitoring system design and implementation. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2017;8(9):468–471. DOI: 10.26483/ijarcs.v8i9.4981
9. Cosman S.I., Bilatiu C.A., Martiş C.S. Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. *2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*. 2019:1–4. DOI: 10.1109/EMES.2019.8795186.
10. Ko C.C., Mon S.S. Microcontroller based greenhouse automatic control system. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*. 2014;3(5):0865–70.
11. Gonzalez Perez I., Calderon Godoy A.J. Greenhouse automation with programmable controller and decentralized periphery via field bus. *2009 IEEE International Conference on Mechatronics*. 2009:1–6. DOI: 10.1109/ICMECH.2009.4957160.
12. Sivagami A., Hareeshvare U., Maheshwar S., Venkatachalapathy V.S.K. Automated irrigation system for greenhouse monitoring. *Journal of The Institution of Engineers (India)*. 2018;99(2):183–191. DOI: 10.1007/s40030-018-0264-0.

13. Sammari S. Vertical farming. Cubes which are used for advanced vertical farming. Available from: <https://www.kaggle.com/datasets/midouazerty/work-for-parmavir> (accessed on 15.10.2022).
14. Kotthoff L., Thornton C., Hoos H.H., Hutter F., Leyton-Brown K. Auto-WEKA: Automatic Model Selection and Hyperparameter Optimization in WEKA. *Automated Machine Learning. The Springer Series on Challenges in Machine Learning*. 2019:81–95. DOI: 10.1007/978-3-030-05318-5_4.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Левоневский Дмитрий Константинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Dmitriy Konstantinovich Levonevskiy, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation.
e-mail: levonevskij.d@ias.spb.su
ORCID: [0000-0003-3994-2567](https://orcid.org/0000-0003-3994-2567)

Рябинов Артём Валерьевич, программист, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Artem Valerievich Ryabinov, Programmer, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation.
e-mail: ryabinov.a@ias.spb.su
ORCID: [0000-0002-3572-4493](https://orcid.org/0000-0002-3572-4493)

Жукова Наталия Александровна, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Nataliya Aleksandrovna Zhukova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation.
e-mail: nazhukova@mail.ru
ORCID: [0000-0001-5877-4461](https://orcid.org/0000-0001-5877-4461)

Ковалевский Владислав Эдуардович, преподаватель, учебный центр "Амилен", Санкт-Петербург, Российская Федерация.
Vladislav Eduardovich Kovalevsky, Lecturer, Amilen training center, Saint Petersburg, Russian Federation.
e-mail: darkeol@mail.ru
ORCID: [0000-0002-0414-906X](https://orcid.org/0000-0002-0414-906X)

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 09.02.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 09.02.2023; accepted for publication 20.03.2023.