

Разработка автоматизированной системы интеллектуального управления водоснабжением озеленённых территорий

Х. Керимова

Сумгаитский государственный университет, Азербайджан

В статье предложен метод построения интеллектуальной автоматизированной системы управления зелёными территориями вуза (на примере Сумгаитского государственного университета) на основе электронной карты, Internet of Things (IoT), машинного обучения, мобильной робототехники и беспилотного летательного аппарата. Объектом исследования является пространственно распределённая зелёная инфраструктура университетского кампуса, включающая газоны, деревья, кустарники и цветочные зоны, требующие непрерывного мониторинга, оптимального водоснабжения и регулярного обслуживания вуза. Разработана матричная модель электронной карты, в которой территория представляется совокупностью идентифицированных зелёных зон, связанных с датчиками влажности почвы, температуры, влажности воздуха, уровня и расхода воды, автоматическими клапанами и насосным оборудованием. Предложены сценарные модели обнаружения сухих участков, выявления утечек воды и автономного мониторинга состояния зелёных зон мобильным роботом. Для прогнозирования потребности отдельных участков в воде сформирована модель машинного обучения, использующая метеорологические параметры, характеристики растительности, площадь зоны, историю поливов, данные сенсоров и изображения, полученные от мобильного робота и БПЛА. Рассмотрено применение Random Forest, XGBoost, Gradient Boosting, SVR и LSTM/GRU для анализа числовых и временных данных, а CNN/YOLO — для распознавания состояния растительности по изображениям. Предложена схема взаимодействия БПЛА и мобильного робота, при которой БПЛА выполняет обзор территории, а робот осуществляет локальную диагностику и технологическое обслуживание выявленных проблемных зон. Сформирован замкнутый контур «мониторинг → прогнозирование → управление → измерение результата → оценка ошибки → переобучение», обеспечивающий адаптивное совершенствование прогнозов машинного обучения. Предложенный подход позволяет объединить электронную карту, IoT, ML, автоматизированное водоснабжение, робототехнические средства и центральную систему мониторинга в единую интеллектуальную инфраструктуру AI-based Smart Green Campus.

Smart Green Campus; электронная карта; машинное обучение; интеллектуальное орошение; автоматизированное водоснабжение; мобильный робот; беспилотный летательный аппарат; прогнозирование потребности в воде; мониторинг зелёных зон.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста антропогенной нагрузки, изменения климатических условий и необходимости рационального использования водных ресурсов эффективное управление озеленёнными территориями становится важной задачей современной городской инфраструктуры. Парки, скверы, университетские кампусы, спортивные площадки и другие зелёные зоны требуют регулярного полива, контроля состояния растений, очистки территории и стрижки газонов. Традиционные системы, основанные на ручном управлении или фиксированных графиках полива, не всегда учитывают фактическое состояние почвы, погодные условия и потребность растений в воде [Oba22, Sag22, Del24].

Современные автоматизированные системы водоснабжения и орошения переходят к управлению на основе данных, получаемых в реальном времени от датчиков влажности

Керимова Х. Разработка автоматизированной системы интеллектуального управления водоснабжением озеленённых территорий // СИИТ. 2026. Т. 8, № 5(29). С. 76-88. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no5-p76. EDN: AGBQKR.

Kerimova Kh. "Development of an intellectual automated system for management of water supply to green areas" // SIIT. 2026. Vol. 8, no. 5(29), pp. 76-88. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no5-p76. EDN: AGBQKR. (In Russian).

почвы, температуры, влажности воздуха, уровня и расхода воды, давления и метеорологических станций [Jai25, Mou26, Mam19]. Использование IoT обеспечивает объединение сенсоров, контроллеров, исполнительных механизмов и информационных систем в единую сеть мониторинга и управления [Mam02, Mam25]. Такие системы позволяют автоматически определять необходимость полива, регулировать работу насосов и клапанов и контролировать расход воды.

Перспективным направлением является применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения. Анализ накопленных данных о влажности почвы, погоде, состоянии растительности и предыдущем водопотреблении позволяет прогнозировать потребность отдельных зон в воде и формировать адаптивные режимы полива [Tri26, Yus20, Yus22]. Систематические исследования показывают, что ML-модели уже широко применяются в интеллектуальных системах орошения, однако вопросы качества данных, переносимости моделей и интеграции результатов прогнозирования с автоматическими исполнительными устройствами остаются актуальными [Tri26, Yus20]. Интеграция IoT, машинного обучения и автоматического управления рассматривается как основа перехода к автономным системам интеллектуального орошения [Yus22].

Для больших озеленённых территорий одной системы стационарного полива недостаточно. Дополнительные возможности предоставляет применение мобильных роботизированных средств, способных выполнять локальный полив, контролировать состояние газонов и растений, очищать отдельные участки и выполнять технологические операции по уходу за территорией. Робот может использовать электронную карту территории, навигационные датчики, камеры, LiDAR/GNSS и данные стационарных сенсоров для формирования маршрута и выполнения заданных операций [Yus25, Gul25]. Использование беспилотных летательных аппаратов дополнительно позволяет осуществлять визуальный мониторинг больших территорий и выявлять зоны с недостаточным увлажнением или повреждением растительности [Gul16].

Особое значение имеет создание электронной карты озеленённой территории, на которой отображаются деревья, кустарники, газоны, цветники, дорожки, зоны полива, резервуары, насосное оборудование и расположение сенсоров. Объединение электронной карты с IoT, SCADA, машинным обучением и мобильной робототехникой позволяет сформировать единую информационно-управляющую среду для пространственного мониторинга и оптимального распределения воды [Mam02, Yus22, Mam19].

Для Сумгаитского государственного университета (СГУ), Азербайджан, создание такой системы представляет практический интерес в связи с необходимостью эффективного обслуживания озеленённых участков университетского кампуса. Концепция Green Campus университета предусматривает развитие экологически устойчивой территории и рациональное использование ресурсов [Mam19]. Поэтому SSU может рассматриваться как практический объект для разработки интегрированной системы, объединяющей стационарные сенсоры, автоматизированное водоснабжение, метеорологический мониторинг, электронную карту, машинное обучение и мобильные роботизированные средства.

Таким образом, современная система управления озеленёнными территориями должна обеспечивать не только автоматический полив, но и мониторинг, прогнозирование, оптимизацию водопотребления и автоматизацию обслуживания территории. Целью настоящего исследования является разработка автоматизированной системы оптимального управления водоснабжением озеленённых территорий вуза на основе IoT, сенсорного мониторинга, искусственного интеллекта, машинного обучения, электронной карты и мобильных роботизированных средств. Предлагаемый подход направлен на рациональное распределение водных ресурсов, своевременное выявление зон недостаточного увлажнения и повышение эффективности эксплуатации зелёной инфраструктуры университета.

ЦЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Целью исследования является разработка автоматизированной интеллектуальной системы оптимального управления водоснабжением и обслуживания озеленённых территорий Сумгаитского государственного университета (Азербайджан) на основе IoT-технологий, сенсорного мониторинга, искусственного интеллекта и машинного обучения, электронной карты территории и мобильных роботизированных средств.

Разрабатываемая система предназначена для автоматического определения потребности различных озеленённых зон университетского кампуса в воде, оптимального распределения водных ресурсов, контроля состояния деревьев, кустарников и газонов, обнаружения утечек и участков недостаточного увлажнения, а также автоматизации отдельных операций по поливу, очистке территории и уходу за газонами.

Для достижения поставленной цели на примере Сумгаитского государственного университета необходимо решить следующие основные задачи:

1. Исследовать территорию Сумгаитского государственного университета как объект автоматизированного управления, определить основные озеленённые зоны, участки полива, источники и резервуары воды, насосное оборудование и существующую инфраструктуру.

2. Разработать архитектуру автоматизированной системы управления, объединяющую системы водоснабжения и полива, IoT-сенсоры, контроллеры, исполнительные механизмы, базу данных и центральную систему мониторинга.

3. Создать электронную карту озеленённых территорий университета с отображением деревьев, кустарников, газонов, цветников, зон полива, сенсоров, трубопроводов, насосного оборудования и маршрутов мобильных роботизированных средств.

4. Разработать интеллектуальную модель мониторинга и прогнозирования потребности в воде на основе данных IoT-сенсоров, метеорологических параметров, состояния почвы и растительности с применением методов искусственного интеллекта и машинного обучения.

5. Разработать алгоритм оптимального распределения и автоматического управления водными ресурсами, обеспечивающий управление насосами, клапанами и зонами полива с учётом текущей и прогнозируемой потребности в воде.

6. Интегрировать мобильные роботизированные средства и беспилотный мониторинг для локального полива, контроля состояния растений и газонов, обнаружения проблемных участков, очистки территории и выполнения отдельных операций по уходу за озеленёнными зонами.

7. Провести моделирование и оценить эффективность разработанной системы на примере Сумгаитского государственного университета по показателям рационального расходования воды, качества полива, своевременности обнаружения неисправностей и эффективности обслуживания озеленённой территории.

МЕТОД И МОДЕЛИ

Анализ зеленого участка и оформление электронной карты

Сумгаитский государственный университет (СГУ) располагает крупной университетской территорией, которая может рассматриваться как перспективный объект для разработки интеллектуальной системы управления озеленением и водоснабжением. Согласно официальной информации университета, кампус занимает более 20 гектаров и включает три учебных корпуса, два общежития и развитую инфраструктуру (рис. 1). Территория кампуса характеризуется большим количеством многолетних и плодовых деревьев, различных видов цветов и кустарников, а также спортивными и рекреационными зонами.

Озеленённая территория университета включает участки вокруг учебных корпусов и общежитий, газоны, древесно-кустарниковую растительность, цветочные зоны, пешеходные

участки и территории, используемые для отдыха студентов и сотрудников. Во дворе университета расположены мини-футбольные, что увеличивает площадь территории, требующей регулярного ухода и контроля состояния покрытия и прилегающих зелёных зон. Поддержание такого кампуса требует регулярного выполнения комплекса работ, включающего полив, уход за деревьями и кустарниками, обслуживание газонов, очистку территории и контроль общего санитарного состояния. Таким образом, озеленённая территория СГУ представляет собой пространственно-распределённый объект управления, включающий различные типы растительности, газоны, рекреационные и спортивные зоны, дорожки и инженерную инфраструктуру. Большая площадь кампуса и необходимость регулярного ухода создают предпосылки для применения автоматизированных средств мониторинга и управления.



Рис. 1. Компоновочная схема зданий и зеленых насаждений СГУ

В рамках предлагаемого исследования территория СГУ рассматривается как единая интеллектуальная система управления озеленением, в которой каждая зона может быть представлена на электронной карте (ЭК) и оснащена необходимыми средствами мониторинга. Датчики влажности почвы, температуры, влажности воздуха, уровня и расхода воды позволяют получать текущую информацию о состоянии территории. На основе этих данных система машинного обучения может прогнозировать потребность отдельных зон в воде, а автоматизированная система управления — регулировать работу насосов и клапанов.

ЭК представляется как матричную модель территории СГУ, где каждая ячейка соответствует отдельному зелёному участку и имеет собственный идентификатор. Поскольку точные геометрические границы участков кампуса в исходных данных не заданы, номера ниже являются **предлагаемой системой зонирования для модели**, а не утверждённой фактической нумерацией SSU. Матричная структура электронной карты озеленённых территорий SSU представляется в табл. 1.

Таблица 1

Матричная структура электронной карты озеленённых территорий СГУ

Строка / столбец	C1	C2	C3	C4	C5	C6
R1	Z01	Z02	Z03	Z04	Z05	Z06
R2	Z07	Z08	Z09	Z10	Z11	Z12
R3	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18
R4	Z19	Z20	Z21	Z22	Z23	Z24
R5	Z25	Z26	Z27	Z28	Z29	Z30
R6	Z31	Z32	Z33	Z34	Z35	Z36

Здесь Z01–Z36 — уникальные идентификаторы зелёных участков, а R1–R6 и C1–C6 определяют их положение в электронной карте.

Также определим основные объекты зеленых участков, их Z_{ij} коды зон, контролируемые параметры, используемые типы мониторинга и исполнительные устройства (табл. 2).

Таблица 2

Информационная структура зелёных участков электронной карты

№ участка	Код зоны	Основной объект	Контролируемые параметры	Средства мониторинга	Исполнительное устройство
1	Z01	Газон	W, T, H	SM-01, T-01	V-01
2	Z02	Газон	W, T, H	SM-02, T-02	V-02
3	Z03	Деревья	W, T, H	SM-03, T-03	V-03
4	Z04	Кустарники	W, T, H	SM-04, T-04	V-04
5	Z05	Цветочная зона	W, T, H	SM-05, T-05	V-05
6	Z06	Газон	W, T, H	SM-06, T-06	V-06
7	Z07	Деревья	W, T, H	SM-07, T-07	V-07
8	Z08	Газон	W, T, H	SM-08, T-08	V-08
9	Z09	Кустарники	W, T, H	SM-09, T-09	V-09
10	Z10	Газон	W, T, H	SM-10, T-10	V-10
11	Z11	Деревья	W, T, H	SM-11, T-11	V-11
12	Z12	Цветочная зона	W, T, H	SM-12, T-12	V-12
13–36	Z13–Z36	Различные зелёные зоны	W, T, H, L, Q	SM, T, L, Q	V-13

Здесь W — влажность почвы; T — температура; H — влажность воздуха; L — уровень воды; Q — расход воды; SM — датчик влажности почвы; V — автоматический клапан.

Матричную электронную карту можно представить в виде:

$$Z = [z_{ij}], \quad i = 1, \dots, 6, \quad j = 1, \dots, 6,$$

где z_{ij} — идентификатор зелёного участка, расположенного в координатной ячейке i, j .

Для каждого участка Z_k формируется информационный вектор:

$$Z_k = \{x_k, y_k, A_k, W_k, T_k, H_k, L_k, Q_k, P_k, V_k\},$$

где x_k, y_k — координаты участка; A_k — площадь; W_k — влажность почвы; T_k — температура; H_k — влажность воздуха; L_k — уровень воды; Q_k — расход воды; P_k — прогнозируемая потребность в воде; V_k — состояние исполнительного клапана.

Такая структура позволяет связать каждый зелёный участок электронной карты с конкретными сенсорами, зоной полива, исполнительными устройствами и прогнозом ML-модели. В результате центральная система может определить, что какой-то участок Z_{ij} требует дополнительного полива, автоматического открытия соответствующего клапана V_{ij} , подачи необходимого расхода воды и одновременно передачи мобильному роботу задания на очистку, стрижки газона или дополнительного полива данного участка.

Дополнительным элементом системы предлагается мобильный интеллектуальный робот, способный перемещаться по электронной карте кампуса и выполнять локальный полив, контроль состояния газонов и растений, обнаружение проблемных участков и отдельные операции по уходу за территорией. При необходимости мобильный робот может взаимодействовать с беспилотным летательным аппаратом, который обеспечивает мониторинг больших участков кампуса (рис. 2). Полученные данные передаются в центральную систему мониторинга и используются для формирования оптимального задания на полив и обслуживание территории. Следовательно, территория СГУ может служить практической моделью для разработки автоматизированной системы оптимального управления водоснабжением и интеллектуального обслуживания больших озеленённых территорий. Такая система объединяет водоснабжение, сенсорный мониторинг, IoT, машинное обучение, электронную карту, мобильную

робототехнику и центральную систему управления в единую информационно-техническую инфраструктуру.



Рис. 2. Мобильный робот для дополнительного полива, очистки и стрижки газона

Модели сценарных моделей электронной карты и мобильного робота

В предлагаемой автоматизированной системе территория СГУ представляется в виде электронной карты, состоящей из множества дискретных зелёных зон. Каждая зона имеет собственные координаты, площадь, тип растительности, параметры состояния почвы и водоснабжения.

Сценарий 1. Обнаружение сухой зоны и автоматическое орошение

При поступлении данных от IoT-сенсоров центральная система определяет текущее состояние каждой зелёной зоны. На основе накопленных данных о влажности почвы, температуре, влажности воздуха, площади зоны, метеорологических условиях и состоянии растительности машинное обучение формирует прогноз потребности в воде:

$$P_k(t + \Delta t) = f_{ML}[W_k, T_k, H_k, R_k, V_k, A_k]. \quad (1)$$

Если прогнозируемая потребность превышает установленное критическое значение, зона переводится в состояние приоритетного орошения:

$$P_k > P_{cr}. \quad (2)$$

Для автоматического формирования команды управления используется функция

$$u_i(t) = \begin{cases} 1, & P_k > P_{cr} \\ 0, & P_k \leq P_{cr} \end{cases} \quad (3)$$

При $u_i(t) = 1$ центральная система управления активирует соответствующий клапан и формирует задание мобильному роботу на перемещение к зоне (Z_i). Выбор маршрута осуществляется с учётом расстояния (L), энергетических затрат (E) и времени выполнения задания (T):

$$R^* = \arg \min_R [L(R) + \tau_1 E(R) + \tau_2 T(R)]. \quad (4)$$

В результате формируется замкнутый процесс

$$W_k(t) \downarrow \Rightarrow P_k(t + \Delta t) = f_{ML}(X_k(t)) \uparrow \Rightarrow u_i(t) \Rightarrow R_i^* = \arg \min_{R_i} J(R_i) \Rightarrow Z_i \Rightarrow W_k(t + \Delta t) \uparrow \quad (5)$$

Сценарий 2. Обнаружение утечки воды

Второй сценарий предусматривает автоматическое обнаружение утечки в трубопроводах и элементах системы орошения. Для каждой зоны контролируются фактический расход воды, давление и изменение влажности почвы. В штатном режиме фактический расход соответствует расчётному:

$$Q_i(t) \approx Q_i^{\text{norm}}. \quad (6)$$

При значительном отклонении фактического расхода от нормативного значения система формирует признак возможной утечки:

$$|Q_i - Q_i^{\text{norm}}| > \Delta Q_{\text{cr}} \quad (7)$$

Для автоматической классификации состояния зоны используется логическая функция, которая записывается в виде:

$$L_k = \begin{cases} 1, & |Q_i - Q_i^{\text{norm}}| > \Delta Q_{\text{cr}}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (8)$$

При ($L_k=1$) соответствующая зона выделяется на электронной карте как потенциально аварийная. Центральная система формирует маршрут мобильного робота для проведения локального обследования. Мобильный робот использует видеокамеру, датчики влажности, LiDAR и навигационную систему для определения фактического состояния участка. После подтверждения утечки система автоматически переводит соответствующий клапан в закрытое состояние:

$$V_k = 0. \quad (9)$$

После устранения аварийной ситуации данные о состоянии зоны передаются в центральную систему и используются для актуализации электронной карты.

Сценарий 3. Автономный мониторинг состояния зелёных зон

В третьем сценарии мобильный робот выполняет периодический автономный мониторинг территории университета. Электронная карта содержит множество контрольных маршрутных точек:

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}. \quad (10)$$

Каждая маршрутная точка определяется координатами и набором необходимых измерений:

$$m_j = (x_k, y_k, \text{camera}, \text{soil}, \text{temperature}). \quad (11)$$

Для последовательного прохождения контрольных точек формируется оптимальный маршрут:

$$R^* = \min \sum_{j=1}^{K-1} d(m_j, m_{j+1}). \quad (12)$$

При построении маршрута учитываются энергетические ограничения мобильного робота:

$$E_R \geq E_{\min}. \quad (13)$$

а также безопасное расстояние до обнаруженных препятствий:

$$d_{\text{abstacle}} > d_{\text{safe}}. \quad (14)$$

Во время движения мобильный робот выполняет фото- и видеосъёмку текущих состояний зелёных посадок, измеряет параметры почвы, определяет состояние газонов, кустарников и деревьев, выявляет сухие участки и передаёт полученные данные в центральную систему.

Полученные данные используются для динамического обновления электронной карты:

$$Z_k(t+1) = F[Z_k(t), D_R(t)]. \quad (15)$$

где $D_R(t)$ представляет собой совокупность данных, полученных мобильным роботом в момент времени t .

Таким образом, электронная карта становится динамической моделью территории, в которой состояние каждой зелёной зоны постоянно обновляется на основе данных сенсоров и мобильного мониторинга.

Для мониторинга значительных по площади зелёных территорий целесообразно использовать совместную работу беспилотного летательного аппарата и наземного мобильного робота. Дрон осуществляет первичный обзор территории и выявляет зоны, состояние которых отличается от нормативного.

Множество потенциально проблемных зон определяется следующим образом:

$$D = \{Z_k > P_{cr} \vee S_k = S_{\text{problem}}\}. \quad (16)$$

После получения информации от дрона центральная система рассчитывает приоритет обслуживания каждой зоны:

$$P_{\text{priority } k} = \alpha P_k + \beta L_k + \tau S_k + \delta C_k, \quad (17)$$

где P_k — характеризует потребность зоны в воде; L_k — вероятность возникновения утечки; S_k — состояние растительности; C_k — критичность соответствующей зоны; α , β , τ , δ — соответственно являются весовыми коэффициентами.

На основании рассчитанных значений определяется зона, требующая первоочередного обследования:

$$Z^* = \arg \max_k \text{Priority } k. \quad (18)$$

После определения Z^* мобильный робот получает координаты соответствующей зоны с электронной карты и выполняет локальное обследование. Таким образом, дрон обеспечивает обзор территории, а мобильный робот выполняет детальную наземную диагностику. Результаты совместной работы дрона и мобильного робота используются для обновления состояния электронной карты:

$$Z_k(t+1) = F[Z_k(t), D_R(t), D_U(t)]. \quad (19)$$

где $D_R(t)$ — данные мобильного робота; $D_U(t)$ — данные, полученные от беспилотного летательного аппарата.

На основании рассмотренных сценариев формируется замкнутый интеллектуальный контур управления зелёными территориями университета:

В результате электронная карта выполняет функции пространственной базы данных и цифрового представления состояния зелёных зон, машинное обучение обеспечивает прогнозирование потребности в воде, а мобильный робот реализует физический мониторинг и выполнение локальных технологических операций. Данные, получаемые от сенсоров, робота и дрона, постоянно возвращаются в центральную систему и используются для последующего обновления электронной карты и формирования новых управляющих воздействий.

Map → IoT → ML → Control → Mobile robot → Monitoring → Map.

На операторском уровне на полного представления текущего положения зеленых зон в СГУ на экране монитора отображается: СГУ Campus Map → Green Zones → Water Network → Mobile Robot position → Drone → Sensors → Pump Status → Water consumption → AI Recommendations. В результате чего получается не просто система автоматического полива, а цифровой интеллектуальный комплекс управления зелёной инфраструктурой университета.

Для прогнозирования потребность каждого зеленого участка СГУ в воде и заранее формирования оптимальное задания для мобильного робота и дрона есть потребность в использовании системы машинного обучения. Система машинного обучения строится по принципу поэтапного сбора данных, машинного обучения, прогнозирования, оптимизации, управления и обратной связи.

Модель машинного обучения получает: влажность почвы; температуру воздуха; температуру почвы; солнечную радиацию; влажность воздуха; скорость ветра; количество осадков; прогноз погоды; расход воды; состояние растений; тип растения; площадь зелёной зоны; историю поливов; данные мобильного робота; изображения с дрона.

На основании этих данных система прогнозирует:

$$\hat{W}_k(t + \Delta t) = f(M_k, T, H, S, R, V, A, P, \dots), \quad (20)$$

где $\hat{W}_k$ — прогнозируемая потребность зоны k в воде.

Для каждой зеленой зоны СГУ система определяет:

- потребность в воде

$$W_k^{\text{pred}} = \text{ML}(X_k); \quad (21)$$

- время следующего полива

$$t_k^{\text{next}} = \text{ML}(X_k); \quad (22)$$

- необходимый объём воды

$$Q_k^{\text{opt}} = \text{ML}(X_k); \quad (23)$$

- вероятность пересыхания

$$P_{\text{dry}} = \text{ML}(X_k); \quad (24)$$

- вероятность аномального состояния растения

$$P_{\text{stress}} = \text{ML}(I_k, X_k), \quad (25)$$

где I_k — изображение зеленого участка, полученное дроном или камерой робота.

Для точности прогнозирования потребности в воде также реализуется машинное обучение по числовым данным на базе Random Forest; XGBoost; Gradient Boosting; SVR; LSTM/GRU — для временных рядов. В качестве примера напомним последовательность соответственно для сенсоров на зеленых участках и камер мобильного робота, дрона, которые классифицируются как нормальное состояние; недостаток воды; пересыхание; повреждение; загрязнение; нарушение состояния газона.

1. Sensor Data → ML Model → Water Demand Prediction.

2. Camera → Image Processing → CNN/YOLO → Plant Condition.

Система машинного обучения изучает историю предыдущих процессов. Например, для зеленых участков СГУ в летнее время база данных имело структуру в виде табл. 3:

Таблица 3

Текущие метеорологические данные, влияющие на состояния зеленых посадок

Time	Zone	Moisture	Temp.	Solar	Rain	Water	Plant State
08:00	G-01	42%	24°C	420 W/m ²	0	120 L	Normal
10:00	G-01	35%	27°C	650 W/m ²	0	150 L	Normal
12:00	G-01	27%	31°C	820 W/m ²	0	220 L	Stress
14:00	G-01	20%	33°C	900 W/m ²	0	280 L	Dry

На основе таких данных модель постепенно устанавливает зависимость:

$$\text{Water}_{\text{Demand}} = f(\text{Moisture, Temperature, Solar, Rain, PlantType, Time}).$$

Со временем система машинного обучения становится способной прогнозировать потребность воды для зеленого участка без постоянного участия оператора.

После каждого полива система сравнивает:

$$W_{\text{predicted}} \text{ и } W_{\text{actual}}.$$

При возникновении ошибки $e(t) = W_{\text{actual}}(t) - W_{\text{predicted}}(t)$, осуществляется последующее переобучения модели. Таким образом, схема надежного функционирования системы машинного обучения реализуется в следующем виде: наблюдение → прогноз → полив → измерение результата → ошибка → переобучение → улучшенный прогноз.

На основе интеграции информационного, математического и реализованного программного обеспечения формируется центральный диспетчерский экран, где на экране AI Green Campus Control Center можно одновременно показывать: цифровую карту университета; местоположение мобильного робота; положение дрона; состояние каждого дерева; состояние кустарников; состояние газонов; влажность каждой зоны; прогноз потребления воды; работающие насосы; открытые клапаны; расход воды; прогноз дождя; ML-рекомендации.

Это уже позволяет представить проект как AI-based Smart Green Campus, а не обычную систему автоматического полива. Основную новизну можно сформулировать как интеграцию машинного обучения с мобильной робототехникой, БПЛА, цифровой картой озеленения и автоматизированным управлением водоснабжением. При этом ML прогнозирует, оптимизатор выбирает режим, нечёткий контроллер формирует управляющее воздействие, а робот и дрон проверяют фактическое состояние территории. Это даёт значительно более содержательную научную модель для статьи или проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработан концептуальный метод построения интеллектуальной автоматизированной системы управления зелёными территориями Сумгаитского государственного университета на основе электронной карты, IoT-мониторинга, машинного обучения, мобильной робототехники и беспилотного летательного аппарата. В отличие от традиционной системы автоматического полива, предложенная структура рассматривает территорию университета как пространственно-распределённый динамический объект управления, состояние которого непрерывно изменяется во времени.

Разработана матричная модель электронной карты территории СГУ, в которой зелёная территория разделяется на 36 условных зон Z01–Z36. Каждая зона имеет пространственный идентификатор и собственный информационный вектор, включающий координаты, площадь, влажность почвы, температуру, влажность воздуха, уровень воды, расход воды, прогнозируемую потребность в воде и состояние исполнительного клапана. Такая структура обеспечивает пространственную привязку измерительной информации, прогнозов и управляющих воздействий к конкретному участку территории.

Сформирована информационно-функциональная структура зелёных зон, связывающая электронную карту с датчиками влажности почвы, температуры, влажности воздуха, уровня и расхода воды, автоматическими клапанами и насосным оборудованием. Это позволяет реализовать переход от периодического ручного контроля к непрерывному автоматизированному мониторингу состояния зелёной инфраструктуры.

Разработаны три основных сценария функционирования системы. В первом сценарии осуществляется обнаружение сухой зоны и автоматическое формирование команды на орошение. Во втором сценарии определяется возможная утечка воды на основе анализа фактического и расчётного расхода, после чего зона локализуется на электронной карте, а мобильный робот направляется для дополнительного обследования. В третьем сценарии мобильный робот выполняет автономный мониторинг контрольных точек, осуществляет фото- и видеосъёмку, измеряет параметры почвы и передаёт полученную информацию в центральную систему.

Предложена модель совместного использования БПЛА и мобильного наземного робота. Беспилотный аппарат выполняет первичный обзор значительной территории и выявляет потенциально проблемные зоны, тогда как мобильный робот осуществляет детальное наземное обследование выбранного участка. Такая двухуровневая схема позволяет объединить преимущества дистанционного и локального мониторинга и использовать результаты наблюдений для динамического обновления электронной карты.

В работе сформирована структура машинного обучения, предназначенная для прогнозирования потребности каждой зелёной зоны в воде. Входными признаками модели являются влажность почвы, температура воздуха и почвы, солнечная радиация, влажность воздуха, скорость ветра, осадки, прогноз погоды, расход воды, состояние растений, тип растения, площадь зоны, история поливов, данные мобильного робота и изображения, полученные с камеры робота или БПЛА. На основе этих данных предполагается прогнозирование потребности в воде, времени следующего полива, необходимого объёма воды, вероятности пересыхания и вероятности аномального состояния растения.

Для числовых данных предложено использовать ансамблевые алгоритмы Random Forest, XGBoost и Gradient Boosting, а также SVR и рекуррентные модели LSTM/GRU для временных последовательностей. Для анализа изображений предусмотрено применение методов компьютерного зрения, включая CNN и YOLO. Такой подход позволяет объединить числовой и визуальный анализ состояния зелёных зон в единой интеллектуальной системе.

Предложенная система объединяет электронную карту, IoT-сенсоры, машинное обучение, автоматическое водоснабжение, мобильную робототехнику, БПЛА и центральный диспетчерский уровень. На операторском уровне предусмотрено отображение карты SSU, зелёных зон, водопроводной сети, положения мобильного робота и БПЛА, состояния сенсоров, насосов и клапанов, текущего расхода воды и рекомендаций AI.

Научная новизна предложенного подхода заключается в интеграции пространственной электронной карты озеленения с прогнозной ML-моделью и физическими исполнительными средствами — мобильным роботом, БПЛА, насосами и автоматическими клапанами. В результате электронная карта выполняет функцию динамической пространственной базы данных, машинное обучение — функцию прогнозирования, алгоритмы оптимизации — функцию выбора режима обслуживания, а робототехнические средства — функции физической диагностики и выполнения локальных операций.

Предложенная модель может рассматриваться как основа для создания прототипа **AI-based Smart Green Campus** Сумгаитского государственного университета. Дальнейшие исследования должны быть направлены на накопление реальных данных с территории кампуса, экспериментальное сравнение ML-моделей, определение фактических параметров водопотребления различных типов зелёных зон, разработку алгоритма оптимизации маршрутов робота и экспериментальную оценку экономии воды, энергетических затрат, точности прогнозирования и надёжности автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- [Oba22] Obaideen Kh., Yousef B., et al. An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*. 2022. Vol. 7. Article 100124. [10.1016/j.nexus.2022.100124](https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124).
- [Sag22] Saggi M., Jain S. A survey towards decision support system on smart irrigation scheduling using machine learning approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. Vol. 29. P. 4455–4478. [10.1007/s11831-022-09746-3](https://doi.org/10.1007/s11831-022-09746-3).
- [Del24] Del-Coco M., Leo M., Carcagnì P. Machine Learning for Smart Irrigation in Agriculture: How Far along Are We? *Information*. 2024. Vol. 15, No. 6. Article 306. [10.3390/info15060306](https://doi.org/10.3390/info15060306).
- [Jai25] Jaiswal N., Kumar T.V., Shukla C. Smart drip irrigation systems using IoT: a review of architectures, machine learning models, and emerging trends. *Discover Agriculture*. 2025. Vol. 3. Article 253. [10.1007/s44279-025-00430-1](https://doi.org/10.1007/s44279-025-00430-1).
- [Mou26] Moustafa A., Abdelwahab O. M. M., et al. Internet of Things-enabled smart irrigation systems for precision water management: A systematic review. *Agricultural Water Management*. 2026. Vol. 333. Article 110615. [10.1016/j.agwat.2026.110615](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110615).

- [Mam19] Mammadov J., Abdullayev K., Aliyev I., Safarova T. Developing Flexible Manufacture Cell in University Industrial Park and its Modeling. In: *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2019. [10.1109/RUSAU-TOCON.2019.8867810](#).
- [Mam02] Mammadov J. F., Objectives and Stages in the Development of Automated Selection and Design of Flexible Manufacturing Systems (2002). Technical Literature Editorial Office, Baku University Press, 175 pp.
- [Mam25] Mammadov J., Nikolov N., Mammadova S., Safarova T., Ganjaliyeva G. Research and Application of Information-Energy Indicators of Analog Type Electromagnetic Transmitters in the Different Industry Fields. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2025. No. 3. P. 62–75. [10.21303/2461-4262.2025.003745](#).
- [Tri26] Trillo J. R., Mammadov J., et al. Automation of the control process of the research and flexible production areas of the technopark. *AI*. 2026. Vol. 7, No. 5. Article 173. [10.3390/ai7050173](#).
- [Yus20] Yusifbayli N., Guliyev H., Aliyev A. Voltage control system for electrical networks based on fuzzy sets. In: *11th World Conference "Intelligent System for Industrial Automation"*. Springer, 2020. P. 55–63. [10.1007/978-3-030-68004-6](#).
- [Yus22] Yusifbayli N., Nasibov V. Some Problems of Energy Security in the Context of Widespread Use of RES. *SOCAR Proceedings*. 2022. Special Issue. [10.5510/OGP2022SI100701](#).
- [Yus25] Yusifbayli N., Guliyev H., et al. challenges in the integration of green energy sources and the application of fuzzy control techniques for wind turbine power regulation. *Machine Science*. 2025. No. II. P. 4–13. [10.61413/NKAT9944](#).
- [Gul25] Guliyev H. B., Ibrahimov F. S. Probabilistic-statistical analysis of power and energy distortion in an electric network with non-sinusoidal supply voltage. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2025. Vol. 83. Article 104630. [10.1016/j.seta.2025.104630](#).
- [Gul16] Guliyev H. B. Method and algorithm of fuzzy control of reactive capacity and voltage providing regime reliability of electric networks. *Reliability: Theory & Applications*. 2016. Vol. 11, No. 2(41). [VBBTIN](#).
- [Mam19] Мамедов Д. Ф., Абдуллаев Г. С. и др. Автоматизированный выбор и проектирование элементов системы управления гибкого автоматизированного производства // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 1. С. 107–111. [VUESSE](#). [Mammadov D. F., Abdullayev G. S., et al. Automated selection and design of control system elements for flexible automated manufacturing. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2019, 15(1), 107–111. [VUESSE](#). (In Russian).]

ОБ АВТОРЕ | ABOUT THE AUTHOR

КЕРИМОВА Хураман

Сумгаитский государственный университет, Азербайджан.

Cavan62@mail.ru.

Преподаватель каф. математики и информатики.

KERIMOVA Khuraman

Sumgayit State University, Azerbaijan.

Cavan62@mail.ru.

Teacher of department "Mathematic and informatic".

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Разработка автоматизированной системы интеллектуального управления водоснабжением озеленённых территорий.

Авторы: Керимова Х.

Аннотация: В статье предложен метод построения интеллектуальной автоматизированной системы управления зелёными территориями вуза (на примере Сумгаитского государственного университета) на основе электронной карты, Internet of Things (IoT), машинного обучения, мобильной робототехники и беспилотного летательного аппарата. Объектом исследования является пространственно распределённая зелёная инфраструктура университетского кампуса, включающая газоны, деревья, кустарники и цветочные зоны, требующие непрерывного мониторинга, оптимального водоснабжения и регулярного обслуживания вуза. Разработана матричная модель электронной карты, в которой территория представляется совокупностью идентифицированных зелёных зон, связанных с датчиками влажности почвы, температуры, влажности воздуха, уровня и расхода воды, автоматическими клапанами и насосным оборудованием. Предложены сценарные модели обнаружения сухих участков, выявления утечек воды и автономного мониторинга состояния зелёных зон мобильным роботом. Для прогнозирования потребности отдельных участков в воде сформирована модель машинного обучения, использующая метеорологические параметры, характеристики растительности, площадь зоны, историю поливов, данные сенсоров и изображения, полученные от мобильного робота и БПЛА. Рассмотрено применение Random Forest, XGBoost, Gradient Boosting, SVR и LSTM/GRU для анализа числовых и временных данных, а CNN/YOLO —

Title: Development of an intellectual automated system for management of water supply to green areas.

Authors: Kerimova Kh.

This paper proposes a method for developing an intelligent automated management system for the green areas of a university campus, using Sumgayit State University as a case study, based on an electronic map, the Internet of Things (IoT), machine learning, mobile robotics, and an unmanned aerial vehicle (UAV). The research object is the spatially distributed green infrastructure of a university campus, including lawns, trees, shrubs, and flower zones that require continuous monitoring, optimal water supply, and regular maintenance. A matrix-based electronic map model is developed, in which the campus territory is represented as a set of identified green zones associated with soil-moisture, air-temperature, air-humidity, water-level, and water-flow sensors, as well as automated valves and pumping equipment. Scenario-based models are proposed for detecting dry areas, identifying water leaks, and autonomously monitoring the condition of green zones using a mobile robot. A machine-learning model is developed to predict the water requirements of individual zones using meteorological parameters, vegetation characteristics, zone area, irrigation history, sensor data, and images obtained from the mobile robot and UAV. Random Forest, XGBoost, Gradient Boosting, SVR, and LSTM/GRU models are considered for numerical and time-series data analysis, while CNN/YOLO models are used to identify vegetation conditions from images. A UAV–mobile robot interaction scheme is proposed in which the UAV performs an aerial survey of the territory, while the mobile robot conducts local diagnostics and technological maintenance of identified problem areas. A closed-loop architecture,

для распознавания состояния растительности по изображениям. Предложена схема взаимодействия БПЛА и мобильного робота, при которой БПЛА выполняет обзор территории, а робот осуществляет локальную диагностику и технологическое обслуживание выявленных проблемных зон. Сформирован замкнутый контур «мониторинг → прогнозирование → управление → измерение результата → оценка ошибки → переобучение», обеспечивающий адаптивное совершенствование прогнозов машинного обучения. Предложенный подход позволяет объединить электронную карту, IoT, ML, автоматизированное водоснабжение, робототехнические средства и центральную систему мониторинга в единую интеллектуальную инфраструктуру AI-based Smart Green Campus..

Ключевые слова: Smart Green Campus; электронная карта; машинное обучение; интеллектуальное орошение; автоматизированное водоснабжение; мобильный робот; беспилотный летательный аппарат; прогнозирование потребности в воде; мониторинг зелёных зон.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2026 г.

“monitoring → prediction → control → result measurement → error evaluation → retraining,” is established to enable adaptive improvement of machine-learning predictions. The proposed approach integrates the electronic map, IoT, machine learning, automated water supply, robotic systems, and a central monitoring and control system into a unified intelligent AI-based Smart Green Campus infra-structure.

Key words: Smart Green Campus; electronic map; machine learning; smart irrigation; auto-mated water supply; mobile robot; unmanned aerial vehicle; water demand forecasting; green space monitoring.

Language: Russian.

The editors received the article on 28 September 2026.