Kalima Rakhymbekkyzy Manap – Researcher, Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Almaty, Kazakhstan; e-mail: amanatglobalhalima@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8397-8375.

Сведения об авторах

Шыныбек Нахыпбекулы Уали – студент, кафедра математического и компьютерного моделирования, факультет компьютерных технологий и Кибербезопасности, Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан; e-mail: ualishynybek@gmail.com ; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6180-3990.

Акнур Бердибаевна Сейсенова – PhD, Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Алматы, Казахстан; e-mail: z_aknura@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8981-307X.

Омирзак Сембиулы Капизов – Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Алматы, Казахстан; e-mail: ok-sir@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1979-7625.

Даурен Кабдракимович Муханов* – докторант факультета химии и химической технологии, Казахского национального университета имени аль-Фараби, Center for Advanced Science and Technology, Алматы, Казахстан; e-mail: dd_511@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1645-8625.

Қалима Рахымбеккызы Манап – научный сотрудник, ТОО «Scientific Center for New Technologies», AlAkSan, Алматы, Казахстан, e-mail: amanatglobalhalima@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8397-8375.

Авторлар туралы мәліметтер

Шыныбек Нахыпбекұлы Уали – студент, Математикалық және компьютерлік модельдеу кафедрасы, Компьютерлік технологиялар және киберқауіпсіздік факультеті, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: ualishynybek@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6180-3990.

Акнур Бердибаевна Сейсенова – PhD, Scientific Center For New Technologies; AlAkSan, Алматы, Қазақстан; e-mail: z_aknura@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8981-307X.

Өмірзақ Сембіұлы Қапизов – Scientific Center For New Technologies; AlAkSan, Алматы, Қазақстан; e-mail: ok-sir@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1979-7625.

Даурен Кабдракимович Муханов* – химия және химиялық технология факультетінің, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің докторанты, Center for Advanced Science and Technology, Алматы, Қазақстан; e-mail: dd_511@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1645-8625.

Калима Рахымбекқызы Манап – ғылыми қызметкер, «Scientific Center for New Technologies» ЖШС, AlAkSan, Алматы, Қазақстанж; e-mail: amanatglobalhalima@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8397-8375.

Received 01.06.2026
Revised 10.09.2026
Accepted 14.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-30

ГРНТИ: 28.23.15

CC BY 4.0
Check for updates

Ш.Ж. Сеилов[1], Б.Ш. Журсинбек[1], А.А. Кременчуцкий[1], С.Ж. Казыбаева[2], А.К. Майданов[1]*
[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. К. Сатпаева, 2
[2]ТОО «Казахский НИИ плодоовощеводства»,
050060, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Гагарина, 238/5
*e-mail: makeadil@mail.ru

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ЯБЛОНЕВЫХ САДОВ

Аннотация: *Прогнозирование урожайности яблоневых садов в горно-предгорных зонах Казахстана остаётся открытой задачей: классические агрономические методы субъективны, а методы компьютерного зрения требуют репрезентативных обучающих выборок, отсутствующих для региона. Предложены архитектура информационной системы прогнозирования урожайности и её интерпретируемое полумеханистическое расчётное ядро для сорта Апорт (Malus domestica cv. Aport) в микрозоне предгорий Заилийского Алатау. Ядро реализовано как четырёхзвенный*

©Ш.Ж. Сеилов, Б.Ш. Журсинбек, А.А. Кременчуцкий, С.Ж. Казыбаева, А.К. Майданов, 2026

фенологический каскад (цветение, завязывание плодов, рост плода, формирование урожая); каждый параметр снабжён явным провенансом, диапазоном неопределённости и оценкой структурной идентифицируемости, а логистическая функция роста плода в текущей версии в итоговое уравнение урожайности не входит, оставаясь перспективным модулем. По результатам Монте-Карло-оценки неопределённости и анализа чувствительности изменение базовой температуры на 1°C смещает расчётную дату начала цветения на 5-8 суток, тогда как разброс расчётной урожайности определяется преимущественно завязываемостью и структурой насаждения. Демонстрационный прогон на данных хозяйства «Алмалы» (Алматинская область) даёт 11,05 т/га при 95% интервале параметрической неопределённости ± 2,15 т/га; он выполнен при параметризации по одной полевой точке (n = 1) и не является независимо валидированным производственным прогнозом. Архитектура рассматривается как основа для последующей интеграции в цифровой двойник сада.

Ключевые слова: *яблоня, апорт, полумеханистическая модель, прогноз урожайности, фенологический каскад, анализ чувствительности, структурная идентифицируемость, цифровой двойник сада.*

Введение

Прогнозирование урожайности яблони обслуживает планирование объёмов хранения, логистики и сбыта, оценку потребности в рабочей силе и управление прореживанием [1, 2]; типовой горизонт оперативного прогноза составляет 6-8 недель до уборки, что требует непрерывного сбора разнородных данных и автоматизированного расчёта в контуре системы поддержки принятия решений [3, 4]. Для предгорной зоны Заилийского Алатау задача осложняется высотным градиентом 700-1700 м, создающим изменчивость температурных сумм (даты начала цветения в соседних кварталах различаются на 7-10 суток), микроклиматической мозаикой склонов и отсутствием многолетних калиброванных рядов наблюдений в открытом доступе; климатические изменения дополнительно снижают надёжность оценок по многолетним нормам [5].

Сорт Апорт (Malus domestica cv. Aport) исторически районирован в регионе и является предметом программы восстановления промышленных насаждений; его подвойно-привойные комбинации и генетическое положение изучались в рецензируемой литературе [6-8], однако специализированных механистических моделей урожайности Апорта для предгорного микроклимата не представлено. Цель работы – разработать архитектуру информационной системы прогнозирования урожайности сада и её интерпретируемое полумеханистическое расчётное ядро, пригодные к работе при разреженных наблюдениях, охарактеризовать параметрическую неопределённость и чувствительность ядра и сформулировать протокол его независимой валидации. Новизна состоит в параметризации модели урожайности Апорта с явным провенансом каждого параметра и оценкой его структурной идентифицируемости и в интеграции ядра в многослойную информационную систему. Приведённый ниже прогон является демонстрационным, выполнен при n = 1 и не является производственным прогнозом.

Условия и методы исследования

Объект – квартал яблоневого сада хозяйства «Алмалы» (ТОО «Казахский НИИ плодоовощеводства», Алматинская область), сорт Апорт на полукарликовом подвое, возраст около 15 лет, схема посадки 5,0 × 3,0 м. Метеоданные – суточные ряды температуры воздуха и сумм осадков метеостанции «Алмалы» за январь-октябрь 2025 г. Дата начала цветения регистрировалась визуально (≥ 50 % раскрытых цветков, ± 1 сут), числа цветков Nfl и плодов Nfr – на 30 модельных деревьях (погрешность ≈ ± 15 %), средняя масса плода Wharvest – взвешиванием выборки ≥ 200 плодов товарной фракции. Наблюдения сезона 2025 г.: цветение – 3 мая; Nfl ≈ 2200; Nfr ≈ 71; уборка – 25 сентября; Wharvest = 235 г; осадки периода роста плода – 218 мм. Расчёты выполнены на суперкомпьютере PARAM BILIM ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва.

Существующие подходы к прогнозу урожая сада разделяются на несколько классов [1, 2]. Классический агрономический прогноз (произведение числа деревьев, числа плодов на дерево и средней массы плода) интерпретируем, но субъективен и не разрешает временную динамику: его сомножители становятся известны слишком поздно для решений о прореживании. Оценка по объёму кроны средствами лазерного сканирования [9, 10] опирается на допущение о постоянстве коэффициента продуктивности, что для склонного к

альтернансу Апорта является упрощением. Методы компьютерного зрения на базе детекторов YOLO и Mask R-CNN [11] требуют репрезентативных обучающих наборов, отсутствующих для региона: предобученные веса получены на насаждениях с иной геометрией кроны, поэтому без доменной адаптации их перенос даёт систематическое смещение. Цифровой двойник сада [4, 12] – среда интеграции, которой необходимо интерпретируемое механистическое ядро, а системные модели продукционного процесса (APSIM, DSSAT, WOFOST, STICS) параметризованы для однолетних культур. Поэтому базовым слоем системы принято полумеханистическое ядро с явным провенансом параметров.

Архитектура расчётного ядра: фенологический каскад

Ядро реализует четырёхзвенный фенологический каскад, последовательно описывающий цветение, завязывание плодов, рост плода и формирование урожая (рис. 1). Декомпозиция на звенья с независимыми параметрами обеспечивает модульную калибровку по мере поступления полевых данных, атрибуцию расхождений расчёта с фактом конкретному звену (заморозки нарушают звено завязываемости, засуха – звено роста плода) и отображение каждого звена в отдельный сервис цифрового двойника [4]. Архитектура является полумеханистической гибридной: накопление сумм активных температур и логистический рост плода механистичны, итоговая поправка массы плода феноменологична.

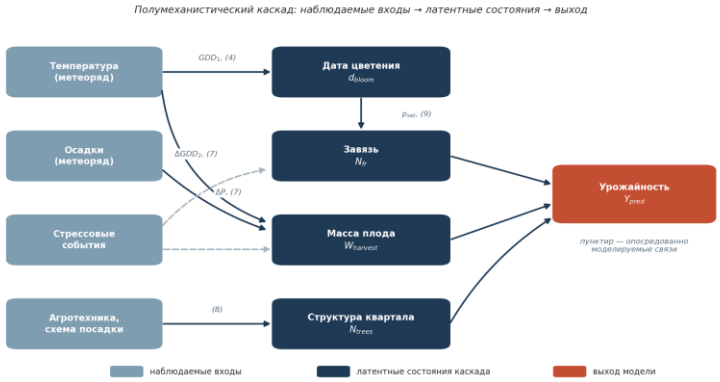


Рисунок 1 – Структурная схема фенологического каскада

Цветение. Начало цветения определяется накоплением суммы активных температур (Growing Degree Days, GDD) выше базовой температуры Tb (1):

$$\mathrm{GDD} = \sum_{d=d_0}^{d_{\mathrm{bloom}}} \max\left(T_{\mathrm{mean,d}} - T_{\mathrm{b}}, 0\right) \qquad (1)$$

где Tmean,d – среднесуточная температура; суммирование ведётся от даты старта накопления d0 до даты начала цветения dbloom. Литературные значения Tb для Malus domestica составляют 4,0-5,5 °C [13, 14]; ввиду отсутствия локальных оценок диапазон расширен до 6,0 °C, что определяет важность анализа чувствительности к этому параметру. Блок накопления часов охлаждения не включён: потребность яблони в охлаждении здесь, по экспертной оценке, удовлетворяется в большинстве лет, а локальные измерения отсутствуют [15].

Завязывание плодов. Коэффициент удержания pset – доля цветков, перешедших в товарный плод, – интегрирует эффективность опыления, оплодотворение завязей и две волны естественной осыпи [16]; он задаётся на цветок и при 2000-3000 цветков на дерево составляет по литературе 2,5-4,5%. В настоящей версии pset принят константой с диапазоном неопределённости и не реализован как функция погодных переменных; это одно из основных упрощений модели.

Рост плода. Рост массы плода описывается трёхпараметрической логистической функцией (2):

$$W(t) = \frac{W_{\max}}{1 + \exp\left(-k(t - t_0)\right)} \qquad (2)$$

, где Wmax – асимптотическая масса плода (г), k – параметр скорости роста (сут$^{-1}$), t0 – точка перегиба. Для Апорта Wmax = 180-300 г, k = 0,03-0,06 сут$^{-1}$ по близкородственным крупноплодным сортам [18]; асимметричные кривые (Ричардса, гибкая сигмоида) требуют четвёртого параметра, неидентифицируемого при одной сезонной кривой [17]. Статус блока

оговаривается явно: соотношение (2) даёт внутрисезонную траекторию накопления массы для промежуточных оценок на произвольную дату, однако масса плода на дату уборки задаётся соотношением (3), поэтому Wmax, k и t0 в итоговое уравнение (6) не входят и в расчёте урожайности не участвуют. Логистический блок является, таким образом, не действующим звеном текущего расчёта, а перспективным модулем; его замыкание на (3) отнесено к дальнейшей работе.

Поправка средней массы плода. Масса плода при уборке корректируется линейной функцией метеорологических аномалий сезона (3):

$$W_{\text{harvest}} = a_0 + a_1 \cdot \Delta\text{GDD}_2 + a_2 \cdot \Delta P \quad (3)$$

, где a0 – базовая масса плода при климатической норме, ΔGDD2 и ΔP – отклонения суммы активных температур периода роста плода и суммы осадков от многолетних норм (1800 °C·сут и 209 мм). Использование аномалий удерживает поправочные члены в физически разумных пределах. При n = 1 коэффициенты a0, a1, a2 заданы как априорные оценки на основе моделей-аналогов и не являются результатом локальной подгонки.

Структура квартала и итоговое уравнение. Число деревьев на гектар определяется схемой посадки (4):

$$N_{\text{trees}} = \frac{10^4}{d_{\text{row}} \cdot d_{\text{tree}}} \quad (4)$$

, где drow — междурядье, dtree – расстояние в ряду (м). Среднее число плодов на дерево раскрывается через субмодели цветения и завязываемости (5):

$$N_{\text{fr}} = N_{\text{fl}} \cdot p_{\text{set}} \quad (5)$$

, где Nfl — среднее число цветков на дерево; при прямом полевом учёте Nfr наблюдается непосредственно. Расчётная урожайность квартала (т/га) вычисляется по уравнению (6):

$$Y_{\text{pred}} = N_{\text{trees}} \cdot N_{\text{fr}} \cdot W_{\text{harvest}} \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

, где множитель 10−6 переводит граммы в тонны. Обозначения пояснены при первом употреблении и используются единообразно во всём тексте; сводный глоссарий приведён в online-приложении.

Параметризация с явным провенансом и распределения параметров

Каждый параметр сопровождается источником (Л – литература, П – полевые данные, Э – экспертная оценка), центральным значением с диапазоном неопределённости, типом распределения и уровнем критичности (табл. 1). Для параметров с известным центральным значением использовано нормальное распределение, усечённое границами диапазона, с σ, равным одной шестой ширины диапазона; для параметров, о которых известен только диапазон (прежде всего a0, a1, a2), – равномерное распределение как наименее информативное. Параметры с пометкой «критический» — первоочередные цели полевой программы 2026-2027 гг.

Таблица 1 – Параметризация модели для Апорта и распределения параметров при Монте-Карло-моделировании

Параметр	Ед.	Центр	Диапазон	Распределение	Ист.	Критичность
Tb	°C	4,5	4,0-6,0	усеч. норм., σ = 0,33	Л	критический
GDD1	°C·сут	350	280-420	усеч. норм., σ = 23	Л+Э	средний
GDD2	°C·сут	1850	1600-2100	усеч. норм., σ = 83	Л+Э	средний
pset	–	0,032	0,025-0,045	усеч. норм., σ = 0,0033	Л+Э	критический
Nfl	шт	2200	1500-3000	усеч. норм., σ = 250	П+Э	средний
Wmax	г	240	180-300	усеч. норм., σ = 20	Л+П	средний
k	сут$^{-1}$	0,045	0,03-0,06	равномерное	Л	низкий
t0	сут	65	55-75	равномерное	Л	низкий
a0	г	230	200-260	равномерное (prior)	Л+Э	критический
a1	г/(°C·сут)	0,025	0,010-0,040	равномерное (prior)	Л+Э	критический
a2	г/мм	0,30	0,10-0,50	равномерное (prior)	Л+Э	критический
drow	м	5,0	4,5-6,0	усеч. норм., σ = 0,25	П	низкий
dtree	м	3,0	2,5-3,5	усеч. норм., σ = 0,17	П	низкий
P	мм	218	150-320	усеч. норм., σ = 28	П	низкий

Примечание: GDD1 – сумма активных температур от старта накопления до начала цветения, GDD2 – от начала цветения до уборки. «Э» – экспертная оценка авторов; «усеч. норм.» – нормальное распределение, усечённое границами диапазона. Диапазоны отражают разброс правдоподобных значений по кварталам и сезонам микрозоны, поэтому оценка неопределённости консервативна.

Идентифицируемость параметров при n = 1 различна. Геометрия схемы посадки (drow, dtree, Ntrees) и число плодов Nfr определяются прямым полевым учётом. Базовая температура Tb идентифицируема слабо: единственная наблюдённая дата цветения не позволяет отделить Tb от даты старта накопления d0. Коэффициенты a0, a1, a2 (три параметра при одной точке) и pset как функция погоды структурно неидентифицируемы и заданы априорно.

Уравнение (6) детерминировано при фиксированных параметрах; распределение расчётной урожайности получено маргинализацией методом Монте-Карло (N = 10 000 итераций, seed = 20250925, розыгрыш из распределений таблицы 1 и полный прогон каскада на каждой итерации). Параметры разыгрываются независимо, поскольку при n = 1 корреляционная структура из данных не оценивается; отрицательные связи (Nfl-pset, Nfr-Wharvest, Tb-GDD1) уменьшают дисперсию произведения, поэтому допущение независимости даёт консервативную оценку. Интервал охватывает только параметрическую неопределённость и не включает структурную, поэтому именуется 95 % интервалом параметрической неопределённости (ИПН), а не доверительным интервалом. Анализ чувствительности выполнен в скрининговой постановке; глобальная декомпозиция дисперсии методами Соболя или Морриса [19] отнесена к байесовскому этапу.

Различаются три режима использования модели: P1 – диагностический прогон по фактическим данным, проверяющий согласованность звеньев каскада и корректность единиц; P2 – демонстрационное моделирование по априорным параметрам таблицы 1, дающее Ypred с 95% ИПН и результаты анализа чувствительности; P3 – независимый прогноз до уборки по параметрам, откалиброванным на независимых сезонах и кварталах. Работа выполнена в режимах P1 и P2; режим P3 не выполнялся, и ни одна из приведённых ниже величин производственным прогнозом не является.

Работоспособность архитектуры и точность прогноза – разные утверждения. Для независимой валидации (режим P3) заранее фиксируется набор метрик на независимой выборке: MAE и RMSE в т/га, MAPE и коэффициент детерминации R^2, поскольку отчёт по одной метрике допускает неоднозначную интерпретацию [20, 21]. При n = 1 ни одна из них статистически не определена: MAE и RMSE вырождаются в модуль единичного отклонения, R^2 не определён при нулевой межобъектной дисперсии. Программа валидации 2026-2027 гг. предусматривает не менее трёх хозяйств по три квартала с разной экспозицией и высотой, не менее двух сезонов, перекрёстную проверку leave-one-orchard-out и leave-one-season-out, фиксацию прогноза за 6-8 недель до уборки и ориентиры MAPE не более 15% при покрытии 95% ИПН не ниже 0,90; развёрнутый протокол приведён в online-приложении.

Архитектура информационной системы и программная реализация

Расчётное ядро – лишь один из слоёв системы. Информационная система построена как четырёхслойная архитектура (рис. 2), в которой каждый слой имеет свою зону ответственности, темп обновления и определённый интерфейс к соседним слоям [3, 22]. Программно реализовано расчётное ядро (слой L3); слои L1, L2 и L4 описаны на уровне проектных решений и интерфейсов, их развёртывание входит в программу работ 2026-2027 гг.

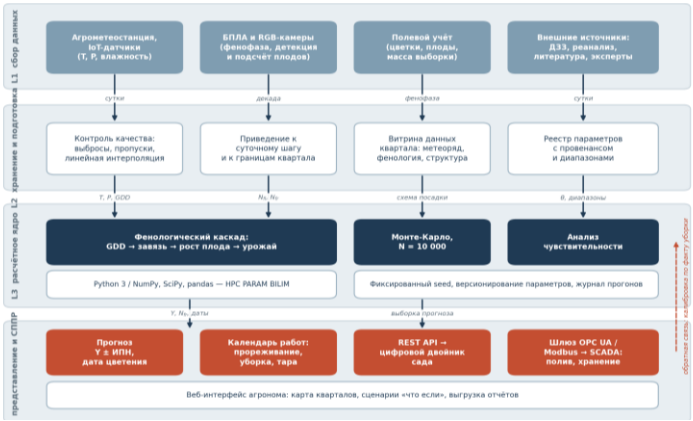


Рисунок 2 – Архитектура информационной системы прогнозирования урожайности яблоневого сада

L1 – сбор данных: агрометеостанция и IoT-датчики температуры, осадков и влажности с суточным темпом опроса, съёмка БПЛА и стационарные RGB-камеры для датировки фенофаз, полевой учёт через мобильное приложение агронома, данные дистанционного зондирования [22]. L2 – хранение и подготовка данных: контроль качества, приведение рядов к единому суточному шагу и к границам квартала, ведение реестра параметров; ключевое проектное решение – отделение реестра от кода модели, при котором параметр хранится вместе с источником, диапазоном, типом распределения и датой обновления, что делает параметризацию версионируемой. L3 – расчётный слой: фенологический каскад, модуль Монте-Карло и модуль анализа чувствительности. L4 – представление и поддержка решений: прогноз Ypred с интервалом ИПН, расчётная дата цветения, календарь агротехнических работ, REST API для цифрового двойника сада и шлюз OPC UA/Modbus для систем автоматизации полива, сортировки и хранения [11, 12]. Пунктирная обратная связь на рисунке 2 – контур калибровки: данные уборки возвращаются в реестр параметров. Обмен между слоями организован в форматах CSV и JSON.

Программная реализация. Ядро реализовано на языке Python 3 (NumPy, SciPy, pandas); Монте-Карло-прогон векторизован и выполнен на суперкомпьютере PARAM BILIM. Порядок вычислений: контроль качества метеоряда; накопление GDD до порога GDD1 и определение dbloom по (1); расчёт Nfr по (5) либо подстановка из полевого учёта; накопление GDD2 и расчёт аномалий ΔGDD2, ΔP; расчёт Wharvest по (3); расчёт Ntrees по (4) и Ypred по (6). Воспроизводимость обеспечивается фиксированным зерном генератора, версионированием реестра параметров и журналом прогонов с контрольными суммами входных файлов; псевдокод алгоритмов приведён в online-приложении.

Результаты исследований

Базовая температура Tb – наиболее критичный параметр для предгорного микроклимата: в начале вегетации среднесуточная температура часто колеблется в диапазоне 3-7°C, и небольшое смещение порога резко изменяет число «активных» суток. При вариации Tb в диапазоне 3,0-6,0°C с шагом 0,5°C по метеоряду сезона 2025 г. расчётная дата начала цветения смещается с 25 апреля (Tb = 3,0 °C) до 14 мая (Tb = 6,0°C), а расчётная урожайность изменяется от 12,3 до 9,7 т/га относительно базовых 11,05 т/га при Tb = 4,5°C: смещение даты цветения при фиксированной дате уборки изменяет продолжительность периода роста плода, вследствие чего пересчитываются GDD2 и аномалия ΔGDD2, а через (3) – масса плода и урожайность по (6). Изменение Tb на 1°C смещает расчётную дату цветения на 5-8 суток, а урожайность – примерно на 7,5%.

Скрининговый анализ типа «один-за-раз» по пяти агрегированным факторам, входящим в (6) либо однозначно определяющим его сомножители (Nfl, pset, Ntrees = 476-889 дер./га, Wharvest = 200-270 г и Tb = 3,0-6,0°C), показывает, что разброс расчётной урожайности определяется преимущественно завязываемостью и структурой насаждения, тогда как абсолютный вклад Tb умеренный. Параметры логистической кривой Wmax, k и t0 в анализ не включены, поскольку в текущей версии не входят в (6). Без локальной калибровки Tb связанный с ним разброс составляет около ± 7,5 %, поэтому модуль автоматической детекции даты начала цветения (RGB-камеры либо БПЛА) имеет приоритет № 1 в инструментальном оснащении хозяйства.

Демонстрационный прогон каскада

Демонстрационный прогон (режим P2) выполнен на реальных входных данных одной полевой точки – квартала хозяйства «Алмалы», сезон 2025 г.; промежуточные выходы звеньев каскада приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Промежуточные выходы звеньев каскада при демонстрационном прогоне

Звено каскада	Выход	Значение
Цветение	Накопленная сумма GDD	343 °C·сут к 1 мая; порог GDD1 = 350 °C·сут достигнут 3 мая
Завязь	Число плодов на дерево Nfr	70,4 (расч. по (5)); 71 (полевой учёт)
Рост плода	GDD2 цветение–уборка	1850 °C·сут
Рост плода	Wharvest по (3)	234 г (наблюдено 235 г)
Урожай	Ntrees по (4)	667 дер./га
Итог	Ypred (среднее Монте-Карло-выборки)	11,05 т/га

Распределение расчётной урожайности оценено методом Монте-Карло (N = 10 000): Ypred = 11,05 ± 2,15 т/га при границах 95 % ИПН [7,1; 15,6] т/га, то есть около ± 39 % от центрального значения, что отражает априорный характер большинства параметров при n = 1; итоговая величина является средним выборки, а не произведением округлённых значений таблицы 2. Отклонения расчётных величин от наблюдённых для того же квартала и сезона составили: дата начала цветения – 0 сут; Nfr – 0,6 шт/дерево (0,8 %); Wharvest – 1 г (0,4 %); урожайность – 0,08 т/га (0,7 %; 11,05 против оценки 11,13 т/га по фактическим Ntrees = 667 дер./га, Nfr = 71 шт и Wharvest = 235 г). Все отклонения относятся к той единственной точке, по которой задана параметризация, поэтому характеризуют внутреннюю согласованность модели, но не являются метриками прогностической точности: совпадение даты цветения – слабая проверка при априорных Tb и GDD1; отклонение по Wharvest квазинезависимо, поскольку a0, a1, a2 под эту точку не подгонялись; отклонение по урожайности независимой проверкой не является, так как Ntrees и Nfr служат общими входами расчёта и оценки. При погрешности полевого учёта ≈ ± 15 % для Nfr согласие на уровне долей процента само по себе не свидетельствует о высокой точности модели.

Обсуждение

Работа устанавливает воспроизводимую базовую линию: структуру информационной системы и расчётного ядра с задокументированными параметрами, указанными источниками и количественно охарактеризованной параметрической неопределённостью. Звенья каскада корректно передают значения по цепочке, промежуточные величины остаются в физически допустимых пределах, расчётная дата цветения совпала с наблюдённой, а расчётная масса плода отличается от наблюдённой на 1 г. Не показано и в рамках имеющихся данных показано быть не может: прогностическая точность на независимой выборке, устойчивость между сезонами и объектами и пригодность для производственного планирования. Полумеханистическое ядро занимает промежуточное место между классическим агрономическим прогнозом и методами компьютерного зрения и цифровых двойников: оно сохраняет интерпретируемость и оперативность при средних требованиях к данным и позволяет атрибутировать выходы модулей машинного обучения физическим факторам.

Ограничения. Параметризация по одной полевой точке обусловливает высокую параметрическую неопределённость (± 39 %) и неопределимость метрик точности. Константный pset не учитывает заморозки и дефицит опылителей; коэффициенты поправки массы плода априорны, а сама поправка феноменологична, поэтому вне диапазона наблюдённых условий возможно смещение. Симметричная логистическая кривая не воспроизводит асимметрию реального роста [17], отсутствие многолетнего ряда не разрешает альтернанс, скрининговый анализ чувствительности не разлагает дисперсию выхода [19], а метеоряд по одной станции не описывает микроклиматическую неоднородность склонов, учёт которой требует собственных агрометеостанций хозяйств [22] и данных дистанционного зондирования [2].

Дальнейшая работа предполагает переход от константного pset к его зависимости от погодных переменных периода цветения, замену логистической кривой кривой Ричардса с замыканием этого блока на расчёт Wharvest [17, 18], включение блока накопления холода [5, 15], байесовскую оценку параметров с корреляционной структурой и глобальный анализ чувствительности [19]. Главным направлением является многоточечная полевая программа 2026-2027 гг., которая позволит впервые вычислить метрики точности на независимой выборке.

Заключение

Предложена четырёхслойная архитектура информационной системы прогнозирования урожайности яблоневого сада с определёнными источниками и потоками данных, алгоритмом работы расчётного ядра и интерфейсами интеграции с IoT-датчиками, агрометеостанциями, БПЛА, цифровым двойником сада и системами промышленной автоматизации. Расчётным ядром служит интерпретируемая полумеханистическая модель урожайности сорта Апорт – четырёхзвенный фенологический каскад с явным провенансом каждого параметра, оценкой структурной идентифицируемости и документированными распределениями. Показана высокая чувствительность фенологической датировки к базовой температуре (1°C соответствует смещению расчётной даты цветения на 5-8 суток) и установлено, что разброс

расчётной урожайности определяется преимущественно завязываемостью, числом цветков и плотностью насаждения. Демонстрационный прогон (11,05 т/га; 95 % ИПН [7,1; 15,6] т/га) выполнен при n = 1, подтверждает внутреннюю согласованность архитектуры, но не её прогностическую точность; для перевода результата в статус производственного прогноза сформулирован протокол независимой валидации с метриками MAE, RMSE, MAPE и R^2, реализация которого запланирована на 2026-2027 гг. Архитектура рассматривается как основа для последующей интеграции расчётного ядра в цифровой двойник сада.

Дополнительные материалы (online-приложение). Глоссарий переменных; таблица и графики одномерного анализа чувствительности к Tb; диаграмма «торнадо»; распределение Ypred по результатам Монте-Карло-моделирования; развёрнутый протокол независимой валидации; структура потоков данных; сравнение параметров Апорта и сортов-аналогов; сравнение подходов к прогнозированию; псевдокод алгоритмов расчётного ядра.

Список литературы

1. Fruit yield prediction and estimation in orchards: a state-of-the-art comprehensive review for both direct and indirect methods / L. He et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2022. – Vol. 195. – Art. 106812. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106812.
2. Tree crop yield estimation and prediction using remote sensing and machine learning: a systematic review / C. Trentin et al // Smart Agricultural Technology. – 2024. – Vol. 9. – Art. 100556. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100556.
3. Decision support systems for agriculture 4.0: survey and challenges / Z. Zhai et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2020. – Vol. 170. – Art. 105256. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256.
4. Digital twins in smart farming / C. Verdouw et al // Agricultural Systems. – 2021. – Vol. 189. – Art. 103046. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046.
5 Unusually warm winter seasons may compromise the performance of current phenology models – predicting bloom dates in young apple trees with PhenoFlex / E. Fernandez et al // Agricultural and Forest Meteorology. – 2022. – Vol. 322. – Art. 109020. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109020.
6. Identifying fire blight-resistant Malus sieversii rootstocks grafted with cultivar «Aport» using monitoring data / A. Taskuzhina et al // Horticulturae. – 2024. – Vol. 10, № 10. – Art. 1052. https://doi.org/10.3390/horticulturae10101052.
7. Apple varieties from Kazakhstan and their relation to foreign cultivars assessed with RosBREED 10K SNP array / D. Gritsenko et al // European Journal of Horticultural Science. – 2022. – Vol. 87, № 1. – Art. 6. https://doi.org/10.17660/eJHS.2022/006.
8. Genetic diversity of apple cultivars growing in Kazakhstan / M.E. Omasheva et al // Russian Journal of Genetics. – 2018. – Vol. 54, № 2. – P. 176-187. https://doi.org/10.1134/S1022795418020138.
9. Lidar-based tree recognition and platform localization in orchards / J.P. Underwood et al // Journal of Field Robotics. – 2015. – Vol. 32, № 8. – P. 1056-1074. https://doi.org/10.1002/rob.21607.
10. Mapping almond orchard canopy volume, flowers, fruit and yield using lidar and vision sensors / J.P. Underwood et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2016. – Vol. 130. – P. 83-96. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.09.014.
11. Sapkota R. Comparing YOLOv8 and Mask R-CNN for instance segmentation in complex orchard environments / R. Sapkota, D. Ahmed, M. Karkee // Artificial Intelligence in Agriculture. – 2024. – Vol. 13. – P. 84-99. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.07.001.
12. Digital twins in agriculture and forestry: a review / A.C. Tagarakis et al // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 10. – Art. 3117. https://doi.org/10.3390/s24103117.
13. A comprehensive overview of the spatial and temporal variability of apple bud dormancy release and blooming phenology in Western Europe / J.-M. Legave et al // International Journal of Biometeorology. – 2013. – Vol. 57, № 2. – P. 317-331. https://doi.org/10.1007/s00484-012-0551-9.
14. Agroclimatic requirements and phenological responses to climate change of local apple cultivars in northwestern Spain / A. Delgado et al // Scientia Horticulturae. – 2021. – Vol. 283. – Art. 110093. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110093.

15. Petri J.L. Consequences of insufficient winter chilling on apple tree bud-break / J.L. Petri, G.B. Leite // Acta Horticulturae. – 2004. – Vol. 662. – P. 53-60. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.662.4.
16. Sheffield C.S. Perfect syncarpy in apple (Malus × domestica «Summerland McIntosh») and its implications for pollination, seed distribution and fruit production (Rosaceae: Maloideae) / C.S. Sheffield, R.F. Smith, P.G. Kevan // Annals of Botany. – 2005. – Vol. 95, № 4. – P. 583-591. https://doi.org/10.1093/aob/mci058.
17. A flexible sigmoid function of determinate growth / X. Yin et al // Annals of Botany. – 2003. – Vol. 91, № 3. – P. 361-371. https://doi.org/10.1093/aob/mcg029.
18. Fruit growth patterns of four apple cultivars using nonlinear growth models / P. Zadravec et al // European Journal of Horticultural Science. – 2014. – Vol. 79, № 2. – P. 52-59. https://doi.org/10.1079/ejhs.2014/4258554.
19. Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow / F. Pianosi et al // Environmental Modelling & Software. – 2016. – Vol. 79. – P. 214-232. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008.
20. Chicco D. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M.J. Warrens, G. Jurman // PeerJ Computer Science. – 2021. – Vol. 7. – Art. e623. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623.
21. Saldaña-Villota T.M. Comparison of statistical indices for the evaluation of crop models performance / T.M. Saldaña-Villota, J.M. Cotes-Torres // Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. – 2021. – Vol. 74, № 3. – P. 9675-9684. https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n3.93562.
22. The potential of low-cost IoT-enabled agrometeorological stations: a systematic review / C.M. Al Kalaany et al // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 19. – Art. 6020. https://doi.org/10.3390/s25196020.

Благодарность:

Финансирование. Работа выполнена в рамках программы грантового финансирования научных исследований (№ AP 23488699). Источник финансирования не участвовал в проектировании модели, анализе данных и подготовке рукописи.

Ш.Ж. Сеилов[1], Б.Ш. Жүрсінбек[1], А.А. Кременчуцкий[1], С.Ж. Қазыбаева[2], А.К. Майданов[1]*

[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ.,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қ. Сәтбаев көшесі, 2
[2]«Қазақ жеміс-көкөніс шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты» ЖШС,
050060, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Гагарин даңғылы, 238/5
*e-mail: makeadil@mail.ru

АЛМА БАҚТАРЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІН БОЛЖАУ ЖҮЙЕСІНІҢ МОДЕЛІ

Қазақстанның таулы және тау бөктеріндегі аймақтарында алма бақтарының өнімділігін болжау өзекті мәселе болып қала береді: дәстүрлі агрономиялық әдістер субъективті, ал компьютерлік көру әдістері өңір үшін қолжетімді емес репрезентативті оқыту деректерін қажет етеді. Жұмыста Іле Алатауының тау бөктеріндегі микрозонаға арналған Апорт сортының (Malus domestica cv. Aport) өнімділігін болжайтын ақпараттық жүйенің архитектурасы және оның түсіндірілетін жартылай механистік есептеу өзегі ұсынылған. Өзек гүлдену, жемістің түйінденуі, жемістің өсуі және өнімнің қалыптасуы кезеңдерін сипаттайтын төрт буынды фенологиялық каскад түрінде іске асырылған; әрбір параметр шығу тегімен, белгісіздік диапазонымен және құрылымдық сәйкестендірілу деңгейімен сипатталған, ал жемістің өсуін сипаттайтын логистикалық функция маусым ішіндегі масса жинақталу траекториясын береді және модельдің қазіргі нұсқасында өнімділіктің қорытынды теңдеуіне кірмей, перспективалық модуль болып қалады. Параметрлік белгісіздік Монте-Карло әдісімен бағаланды: базалық температураның 1°C өзгеруі гүлденудің есептік басталу мерзімін 5-8 тәулікке жылжытады, ал өнімділік болжамының өзгергіштігі негізінен түйіндену коэффициенті мен екпе құрылымына тәуелді. «Алмалы» шаруашылығының (Алматы облысы) деректері бойынша PARAM BILIM суперкомпьютерінде жүргізілген демонстрациялық есептеу 11,05 т/га мәнін және 95 % параметрлік белгісіздік аралығының ± 2,15 т/га шамасын берді; есептеу бір далалық нүкте бойынша параметрленген (n = 1), демонстрациялық сипатта және тәуелсіз валидацияланған өндірістік болжам емес. Ұсынылған архитектура бақтың цифрлық егізіне кейіннен біріктірудің негізі ретінде қарастырылады.

Түйін сөздер: *алма ағашы, Апорт, жартылай механистік модель, өнімділікті болжау, фенологиялық каскад, сезімталдықты талдау, құрылымдық сәйкестендірілушілік, бақтың цифрлық егізі.*

Sh.Zh. Seilov[1], B.Sh. Zhursinbek[1], A.A. Kremenchutsky[1], S.Zh. Kazybayeva[2], A.K. Maidanov[1]*
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
2 K. Satpayev Street, Astana 010008, Republic of Kazakhstan
[2]LLP «Kazakh Research Institute of Fruit and Vegetable Growing»,
238/5 Gagarin Avenue, Almaty 050060, Republic of Kazakhstan
*e-mail: makeadil@mail.ru

MODEL OF A YIELD FORECASTING SYSTEM FOR APPLE ORCHARDS

Yield forecasting for apple orchards in the mountainous and foothill regions of Kazakhstan remains an open challenge: conventional agronomic methods are subjective, while computer vision approaches require representative training datasets that are unavailable for this region. This paper presents the architecture of a yield forecasting information system and its interpretable semi-mechanistic computational core for the regionalized Aport cultivar (Malus domestica cv. Aport) in the foothill microzone of the Trans-Ili Alatau. The core is implemented as a four-stage phenological cascade describing flowering, fruit set, fruit growth and yield formation, with explicit provenance, an uncertainty range and a structural identifiability assessment for every parameter; the logistic fruit growth function describes the within-season trajectory of mass accumulation and, in the present version, does not enter the final yield equation, remaining a prospective module. Parametric uncertainty is propagated by the Monte Carlo method: a one-degree Celsius change in the base temperature shifts the computed flowering date by five to eight days, whereas the variability of the computed yield is governed mainly by the fruit set coefficient and orchard structure parameters. A demonstration run on data from the Almaly farm (Almaty Region), performed on the PARAM BILIM supercomputer, gives 11.05 t/ha with a 95 % parametric uncertainty interval of ± 2.15 t/ha; the run is parameterised from a single field point (n = 1), is illustrative in nature and is not an independently validated operational forecast. The proposed architecture is regarded as a basis for subsequent integration into a digital twin of an orchard.

Key words: *apple tree, Aport, semi mechanistic model, yield forecasting, phenological cascade, sensitivity analysis, structural identifiability, digital twin of an orchard.*

Сведения об авторах

Шахмаран Журсинбекович Сеилов – к.т.н., профессор кафедры компьютерной и программной инженерии, ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Бибинур Шахмарановна Журсинбек – докторант кафедры компьютерной и программной инженерии, ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Анатолий Анатольевич Кременчуцкий – к.т.н., директор India-Kazakhstan Centre of Excellence in ICT ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; e-mail: ankrem@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4179-7880.

Сауле Жамбуловна Казыбаева – к.с.-х.н., академик НААН РК, ТОО «Казахский НИИ плодоовощеводства», Алматинская область, Казахстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6833-0466.

Адиль Кокенович Майданов* – магистр, преподаватель кафедры компьютерной и программной инженерии, ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Авторлар туралы мәліметтер

Шахмаран Жүрсінбекұлы Сеилов – т.ғ.к., компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Бибінұр Шахмаранқызы Жүрсінбек – компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Анатолий Анатольевич Кременчуцкий – т.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің India-Kazakhstan Centre of Excellence in ICT директоры, Астана, Қазақстан; e-mail: ankrem@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4179-7880.

Сәуле Жамбылқызы Қазыбаева – а.ш.ғ.к., ҚР ҰААҒА академигі, «Қазақ жеміс және көкөніс шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, Алматы облысы, Қазақстан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6833-0466.

Адиль Кокенович Майданов* – магистр, компьютерлік және бағдарламалық инженерия кафедрасының оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Information about the authors

Shakhmaran Seilov – Cand. Sc. (Eng.), Professor, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: seilov_shzh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7057-0461.

Bibinur Zhursinbek – PhD student, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: zhursinbek99@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4505-470X.

Anatoliy Kremenchutskiy – Cand. Sc. (Eng.), Director of the India-Kazakhstan Centre of Excellence in ICT, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: ankrem@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4179-7880.

Saule Kazybaeva – Cand. Sc. (Agric.), Academician of the National Academy of Agrarian Sciences of Kazakhstan, LLP «Kazakh Research Institute of Fruit and Vegetable Growing», Almaty Region, Kazakhstan. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6833-0466.

Adil Maidanov* — Master, Lecturer, Department of Computer and Software Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: makeadil@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2392-5164.

Поступила в редакцию 02.06.2026
Поступила после доработки 09.09.2026
Принята к публикации 11.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-31

CC BY 4.0
Check for updates

ISTIR: 20.15.05

S. Aibagarov*, D. Marlambekov, A. Mukhanbet
Al-Farabi Kazakh National University,
71 Al-Farabi Ave., Almaty, Republic of Kazakhstan, 050040
*e-mail: awer1307dot@gmail.com

SAC-BASED UPLINK POWER CONTROL IN 5G NR: DEEP REINFORCEMENT LEARNING FOR JOINT THROUGHPUT AND ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION

Abstract: *In this paper, the application of the Soft Actor-Critic (SAC) approach to uplink power control in 5G New Radio networks is investigated. A Gymnasium-compatible simulator for a 10-user uplink cell is constructed using the 3GPP TR 38.901 Urban Macro NLOS path-loss model with stochastic shadowing and Rayleigh fading at 3.5 GHz. The SAC agent observes SINR, transmit power, and path loss for all users and jointly selects continuous transmit powers in the range [0, 30] dBm. The training reward combines throughput (0.50), an energy-efficiency term (0.25), SINR quality (0.15), and fairness (0.10). Three SAC policies are trained for 500,000 timesteps and evaluated on 100 common scenarios against Full Power, Equal Power, and a simplified 3GPP-inspired Fractional Power Control (FPC) baseline. Using the standard network-level energy-efficiency metric, SAC achieves 14.866 Mbit/J at a mean transmit power of 9.905 dBm and a mean throughput of 2.540 Mbps. Network energy efficiency is significantly higher than Full Power and simplified FPC, while its difference from Equal Power is not statistically significant after multiplicity correction. A reward-weight sensitivity study confirms that changing objective priorities shifts the learned throughput-energy-efficiency operating point rather than yielding one universally dominant configuration.*

Key words: *5G NR, uplink power control, soft actor-critic, energy efficiency, SINR, Jain's fairness index, 3GPP channel model, deep reinforcement learning.*

1. Introduction

The quick development of connected devices in the framework of the 5G NR technology made the problem of radio resource management in the uplink much more complicated. In contrast to downlink scheduling when the gNB can centrally manage the process of transmission, the process of uplink power control implies that each User Equipment should make the decision about its transmit power using partial channel state information. This decentralized character of the problem, interference between users and time varying fading make it one of the most challenging open problem in the sphere of cellular network optimization [1, 2].

©S. Aibagarov, D. Marlambekov, A. Mukhanbet, 2026