

https://doi.org/10.51885/3134-8025_IJCS_2026_3_8

MPHTI 28.23.15

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АЗОТНОГО СТАТУСА ПШЕНИЦЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ, МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ПОЧВЕННЫХ ДАННЫХ

СПУТНИКТІК, МЕТЕОРОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТОПЫРАҚ ДЕРЕКТЕРІ НЕГІЗІНДЕ БИДАЙДЫҢ АЗОТ КҮЙІН БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН ШЕШІМДЕРДІ ҚОЛДАУДЫҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЖҮЙЕСІ

INTELLIGENT SUPPORT SYSTEM FOR DECISION-MAKING IN PREDICTING THE NITROGEN STATUS OF WHEAT BASED ON SATELLITE, METEOROLOGICAL, AND SOIL DATA

Ш.Б. Оспанова  ^{1*}¹Костанайский региональный университет имени А. Байтурсынова, г. Костанай, Казахстан

*Автор-корреспондент: Шынар Бектепбергенқызы Оспанова, e-mail: kikt2015@gmail.com

Ключевые слова:

Система поддержки
принятия решений;
азотный статус;
дистанционное
зондирование;
вегетационные индексы;
точное земледелие;
пшеница.

АННОТАЦИЯ

В условиях развития точного земледелия одной из актуальных задач является повышение эффективности управления азотным питанием пшеницы с учётом пространственной неоднородности агроэкосистем и изменчивости погодных условий. Целью настоящего исследования является разработка и апробация интеллектуальной системы поддержки принятия решений для прогнозирования азотного статуса пшеницы на основе интеграции данных дистанционного зондирования Земли, метеорологической информации и почвенных характеристик. В работе использованы вегетационные индексы, рассчитываемые по спутниковым данным, агрегированные погодные показатели и сведения о свойствах почвы, на основе которых формируется входной вектор признаков для каждого поля. Разработан алгоритм расчёта показателя азотного статуса с последующей нормировкой и пороговой интерпретацией результатов. Экспериментальные расчёты для сельскохозяйственных полей Костанайской области подтвердили чувствительность системы к пространственно-временным изменениям состояния посевов и её практическую применимость для поддержки управленческих решений в системе точного земледелия.

Түйінді сөздер:

шешім қабылдауды
қолдау жүйесі; азоттық
күй; қашықтан зондау;
вегетациялық индекстер;

ТҮЙІНДЕМЕ

Зерттеудің өзектілігі Солтүстік Қазақстанның агроэкожүйелеріне тән кеңістіктік және уақыттық әркелкілік жағдайында бидайдың азоттық қоректенуін басқару тиімділігін арттыру қажеттілігімен айқындалады. Зерттеудің мақсаты спутниктік, метеорологиялық



© 2026 Ш.Б. Оспанова

Данная работа распространяется на условиях лицензии
Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

дәлме-дәл егіншілік;
бидай.

және топырақтық деректерді интеграциялау негізінде бидайдың азоттық статусын болжауға арналған зияткерлік шешім қабылдауды қолдау жүйесін әзірлеу және апробациялау болып табылады. Жұмыста өсімдік жамылғысының индекстері бойынша белгілерді қалыптастыру, ауа райы параметрлерін агрегаттау және топырақ сипаттамаларын автоматты түрде енгізу әдістері, сондай-ақ нәтижелерді шекті мәндер арқылы интерпретациялау алгоритмдері қолданылды. Нәтижесінде азоттық статусты есептеуді, оның уақыт бойынша динамикасын талдауды және түсіндірмелі ұсынымдар қалыптастыруды қамтамасыз ететін веб-негізделген жүйе іске асырылды. Ғылыми жаңалығы практикалық қолдануға бағытталған интеграцияланған есептеу контурын әзірлеумен анықталады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы дәл егіншілік міндеттерінде басқарушылық шешімдерді қолдауда жүйені қолдану мүмкіндігімен сипатталады.

keywords:

decision support system;
nitrogen status; remote
sensing; vegetation indices;
precision agriculture;
wheat.

ABSTRACT

Efficient nitrogen management is a key challenge of modern wheat production, especially under conditions of spatial heterogeneity of soils and climatic variability. This study presents the development and testing of an intelligent decision support system for forecasting the nitrogen status of wheat based on the integration of remote sensing data, meteorological information, and soil characteristics. Vegetation indices derived from satellite imagery, together with aggregated weather parameters and soil properties, were used to form an input feature vector for each field. The nitrogen status indicator was calculated, normalized, and interpreted using a threshold-based approach to generate management recommendations. Experimental calculations for fields in the Kostanay region demonstrated the sensitivity of the proposed system to temporal and spatial changes in crop conditions. The results confirm the practical applicability of the developed approach for supporting nitrogen management decisions in precision agriculture.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития сельскохозяйственного производства одной из ключевых задач становится повышение эффективности использования минеральных ресурсов, в частности азотных удобрений. Азот играет определяющую роль в формировании урожайности и качества зерна пшеницы, однако его применение связано с рядом экономических и экологических рисков. Избыточное внесение приводит к нерациональным затратам и загрязнению окружающей среды, тогда как недостаточное — к снижению продуктивности посевов. Для регионов Северного Казахстана данная проблема усугубляется выраженной пространственной неоднородностью почвенного покрова и высокой межгодовой изменчивостью метеорологических условий, что существенно осложняет принятие обоснованных агротехнологических решений.

В последние годы в научных исследованиях и прикладных разработках всё более широко используются данные дистанционного зондирования Земли и цифровые платформы для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур в рамках процессов цифровизации агропромышленного комплекса. Вегетационные индексы, рассчитываемые по спутниковым снимкам, позволяют оперативно оценивать состояние растительного покрова, выявлять зоны неоднородности и формировать цифровые представления о состоянии посевов на уровне отдельных полей.

Вместе с тем анализ научной литературы показывает, что большинство существующих решений в области цифрового земледелия ориентированы

преимущественно на диагностику состояния растений или визуализацию данных и в меньшей степени направлены на формирование интерпретируемых управленческих рекомендаций в рамках систем поддержки принятия решений (Basso & Antle, 2020; Chen et al., 2023). Такие подходы, как правило, не обеспечивают комплексной интеграции спутниковых, метеорологических и почвенных данных в едином цифровом контуре и не учитывают требования воспроизводимости и управленческой применимости результатов, что ограничивает их использование в условиях реального хозяйства.

Вопросы применения систем поддержки принятия решений в сельском хозяйстве и интеграции цифровых технологий в аграрный сектор рассматриваются в работах Кенжебаевой и Омарова (2021), а также Омарова и Кенжебаевой (2023), где подчёркивается их роль в автоматизации процессов управления и повышении обоснованности агротехнологических решений. Использование спутниковых данных для мониторинга состояния посевов и выявления пространственной неоднородности агроэкосистем отражено в исследованиях Сагинтаева и Жакупова (2023). Проблемы цифровизации агропромышленного комплекса Республики Казахстан и внедрения цифровых платформ рассмотрены Сулейменовым и Алимкуловым (2021), Тлеубердиновым и Ахметовой (2022), а также в аналитических материалах Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан (2022). Вопросы оценки обеспеченности азотом сельскохозяйственных культур в условиях Казахстана исследованы Нурпеисовой и Баймухановым (2020), где показано влияние почвенно-климатических факторов на эффективность азотного питания. Особенности применения технологий точного земледелия в условиях Северного Казахстана рассматриваются в работе Мименбаевой и др. (2024), где подчёркивается значимость учёта пространственной неоднородности агроэкосистем при принятии управленческих решений.

Использование спутниковых данных для мониторинга состояния посевов и выявления пространственной неоднородности агроэкосистем отражено в исследованиях Сагинтаева и Жакупова (2023).

Проблемы цифровизации агропромышленного комплекса Республики Казахстан и внедрения цифровых платформ рассмотрены Сулейменовым и Алимкуловым (2021), а также в аналитических материалах Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан (2022).

Вопросы оценки обеспеченности азотом сельскохозяйственных культур в условиях Казахстана исследованы Нурпеисовой и Баймухановым (2020), где показано влияние почвенно-климатических факторов на эффективность азотного питания.

Особенности применения технологий точного земледелия в условиях Северного Казахстана рассматриваются в работе Мименбаевой и др. (2024), где подчёркивается значимость учёта пространственной неоднородности агроэкосистем при принятии управленческих решений.

Практические аспекты внедрения цифровых технологий и систем поддержки принятия решений в аграрном секторе также отражены в исследованиях Тлеубердинова и Ахметовой (2022), в которых рассматриваются подходы к интеграции данных и автоматизации агротехнологических процессов.

Дополнительно следует отметить, что развитие цифровых платформ в агропромышленном комплексе Республики Казахстан рассматривается на государственном уровне (Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан, 2022), что подтверждает актуальность разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

В связи с этим актуальной научно-практической задачей является разработка интеллектуальных систем поддержки принятия решений, способных объединять разнородные источники данных, выполнять прогнозирование целевых показателей и предоставлять пользователю результаты в форме, пригодной для оперативного

управления. Особый интерес представляет прогнозирование азотного статуса пшеницы как интегрального показателя обеспеченности растений азотом, позволяющего оценивать текущее состояние посевов и выявлять негативные тенденции на ранних стадиях.

Целью настоящего исследования является разработка и апробация интеллектуальной системы поддержки принятия решений для прогнозирования азотного статуса пшеницы на основе интеграции спутниковых, метеорологических и почвенных данных. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи: формирование структуры входных данных на уровне отдельного поля; разработка вычислительного контура расчёта показателя азотного статуса; определение правил интерпретации прогнозируемых значений и генерации рекомендаций; реализация архитектуры веб-ориентированной системы и анализ её работоспособности на основе экспериментальных расчётов.

Объектом исследования является процесс цифровой поддержки управленческих решений в системе земледелия, предметом исследования — методы и алгоритмы прогнозирования азотного статуса пшеницы с использованием разнородных источников данных. Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной системы поддержки принятия решений, обеспечивающей не только расчёт прогнозного показателя, но и его интерпретацию в виде практических рекомендаций, а также анализ динамики состояния посевов во времени. Представленное введение определяет научный вектор исследования и логически подводит к описанию материалов, методов и архитектуры разработанной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект и материалы исследования

Объектом исследования является процесс цифровой поддержки управленческих решений при управлении азотным питанием пшеницы в системе точного земледелия. Исследование ориентировано на уровень отдельного сельскохозяйственного поля, что позволяет учитывать пространственную неоднородность агроэкосистем и специфику локальных условий.

В качестве исходных материалов использовались данные дистанционного зондирования Земли, метеорологическая информация и почвенные характеристики. Спутниковые данные представлены значениями вегетационных индексов NDVI, NDRE, GNDVI и C_{red}, отражающих состояние растительного покрова и уровень фотосинтетической активности. Значения индексов формировались на основе обработанных спутниковых снимков с предварительной атмосферной коррекцией, что обеспечивает сопоставимость данных во времени.

Метеорологические материалы включали агрегированные показатели средней температуры воздуха и суммы осадков за расчётный период, соответствующий фазам вегетации культуры. Почвенные данные содержали сведения о гранулометрическом составе, содержании органического вещества и общем содержании азота. Почвенные характеристики хранились в базе данных системы и автоматически подставлялись при выборе конкретного поля, что снижало влияние субъективного фактора и обеспечивало единообразие входных параметров.

Источники данных и их характеристики. Спутниковые данные дистанционного зондирования Земли использовались на основе открытых данных Sentinel-2, обеспечивающих пространственное разрешение 10–20 м и периодичность повторного наблюдения около 5 дней при благоприятных условиях съёмки. Для расчёта вегетационных индексов применялись предварительно обработанные изображения после атмосферной коррекции и исключения наблюдений с выраженным влиянием облачности.

Метеорологические данные формировались с использованием открытого сервиса Open-Meteo API и включали среднюю температуру воздуха и сумму осадков за выбранный расчётный период. Полученные значения агрегировались по временным окнам, согласованным с датами спутниковых наблюдений. Используемые метеорологические данные сопоставимы с официальными агрометеорологическими наблюдениями и прогнозами, публикуемыми национальными службами (Казгидромет, 2023; Казгидромет, 2024).

Почвенные характеристики формировались на основе справочника полей разработанной системы и включали гранулометрический состав, содержание органического вещества и общий азот. Для каждого поля почвенный профиль сохранялся в базе данных и автоматически использовался при последующих расчётах, что обеспечивало единообразие входных параметров и снижало долю ручного ввода.

Источники данных и их характеристики

Спутниковые данные дистанционного зондирования Земли получены из открытых источников (например, спутниковая платформа Sentinel-2), с пространственным разрешением 10–20 м и периодичностью обновления 5–10 дней. Для расчёта вегетационных индексов использовались предварительно обработанные изображения с применением атмосферной коррекции. Используемые метеорологические данные сопоставимы с официальными агрометеорологическими наблюдениями и прогнозами, публикуемыми национальными службами (Казгидромет, 2023; Казгидромет, 2024), что обеспечивает достоверность и применимость используемой информации.

Метеорологические данные формировались с использованием открытых API (например, Open-Meteo) и включали агрегированные показатели средней температуры воздуха и суммы осадков за выбранные временные интервалы.

Почвенные характеристики формировались на основе справочника полей и хранились в базе данных системы.

Предварительная обработка данных включала:

- фильтрацию пропущенных значений;
- диапазонную проверку индексов;
- синхронизацию спутниковых и метеоданных по датам;
- агрегирование по временным окнам;
- нормализацию признаков.

В качестве программного обеспечения использовалась разработанная автором веб-ориентированная интеллектуальная система поддержки принятия решений, реализующая хранение данных по полям, формирование признаков, расчёт прогнозного показателя и анализ динамики результатов. Выбор используемых методов согласуется с подходами, представленными в работах, посвящённых применению данных дистанционного зондирования и цифровых технологий в задачах точного земледелия (Chen et al., 2023; Zhang et al., 2024).

Формирование входных данных и предварительная обработка

На первом этапе исследования выполнялось формирование вектора входных данных для каждого поля. Вектор включал значения спутниковых индексов, метеорологические параметры и почвенные характеристики, объединённые в единую структуру признаков. Для обеспечения корректности расчётов применялись процедуры предварительной проверки данных, включающие контроль заполненности обязательных параметров и диапазонную проверку значений индексов растительности.

Агрегирование метеорологических показателей выполнялось по временным интервалам, согласованным с датами спутниковых наблюдений. Такой подход позволял учитывать влияние погодных условий на физиологическое состояние растений и повышал устойчивость прогнозируемого результата, что подтверждается исследованиями,

посвящёнными применению вегетационных индексов для оценки состояния сельскохозяйственных культур (Chen et al., 2023; Zhang et al., 2024).

Предварительная обработка данных выполнялась в несколько этапов. На первом этапе проводилась проверка полноты входных параметров и исключение записей с отсутствующими критическими значениями. На втором этапе выполнялся диапазонный контроль вегетационных индексов и метеорологических параметров. На третьем этапе спутниковые и метеорологические данные синхронизировались по дате наблюдения: для каждой даты спутникового снимка формировалось временное окно метеорологических показателей продолжительностью 7–14 дней. На четвёртом этапе значения признаков приводились к сопоставимому масштабу путём нормализации, что позволяло учитывать совместное влияние спутниковых, погодных и почвенных параметров при расчёте интегрального показателя N-status.

Подходы к оценке обеспеченности растений азотом условно можно разделить на три группы. К первой группе относятся классические агрономические методы, включающие почвенную и листовую диагностику, а также пробные внесения удобрений. Эти методы обеспечивают высокую точность в точках измерения, однако отличаются высокой трудоёмкостью и ограниченной масштабируемостью. Вторая группа представлена моделями на основе данных дистанционного зондирования Земли, в которых вегетационные индексы используются для выявления зон неоднородности и косвенной оценки состояния растений. Третья группа включает интеллектуальные модели, объединяющие спутниковые, метеорологические и почвенные данные с целью прогнозирования целевых показателей и поддержки принятия управленческих решений.

Анализ существующих подходов показывает, что практическим барьером внедрения интеллектуальных методов является отсутствие целостных DSS-решений, обеспечивающих интеграцию данных, воспроизводимость расчётов и интерпретацию результатов. В связи с этим в работе акцент сделан на формирование сквозного DSS-контура.

Система функционирует на уровне отдельного сельскохозяйственного поля. Для расчёта прогноза используются спутниковые индексы NDVI, NDRE, GNDVI и C_{Ired}, агрегированные метеорологические параметры (температура и осадки), а также почвенные характеристики, автоматически подставляемые из базы данных. Реализованы процедуры контроля качества и журналирования входных данных, обеспечивающие воспроизводимость результатов.

Метод прогнозирования азотного статуса

Азотный статус растений рассматривается как интегральный показатель обеспеченности культуры азотом, отражающий совокупное влияние состояния растительного покрова, погодных условий и почвенных характеристик (Wolters et al., 2021; Ravikumar et al., 2024). В рамках исследования для каждого поля формировался вектор признаков X , включающий спутниковые, метеорологические и почвенные параметры (1):

$$X = \{NDVI, NDRE, GNDVI, C_{Ired}, T, P, C, Si, Sa, O, N_s\}, \quad (1)$$

где: NDVI – нормализованный разностный вегетационный индекс;

NDRE – индекс красного края, чувствительный к содержанию хлорофилла;

GNDVI – зелёный нормализованный разностный вегетационный индекс;

C_{Ired} – хлорофилльный индекс красного края;

T – средняя температура воздуха за расчётный период;

P – сумма осадков за расчётный период;

C, Si, Sa – содержание глины, ила и песка в почве;

O – содержание органического вещества;

N_s – содержание общего азота в почве.

Прогнозируемый показатель азотного статуса рассчитывался как взвешенная сумма нормированных признаков (2):

$$N\text{-status} = \sum w_i x_i, \quad (2)$$

где: x_i – i -й нормированный признак из вектора X ;

w_i – весовой коэффициент соответствующего признака;

n – общее количество признаков.

Выбор вегетационных индексов NDVI, NDRE, GNDVI и Cired обусловлен их чувствительностью к изменениям биомассы, содержанию хлорофилла и физиологическому состоянию растений, что подтверждается современными исследованиями в области дистанционного мониторинга сельскохозяйственных культур.

В пилотной реализации весовые коэффициенты задавались экспертно-эвристическим способом с учётом агрономической значимости признаков. При этом больший вклад при интерпретации результата отводился индексам NDRE и Cired, поскольку они чувствительны к изменению содержания хлорофилла и азотного питания растений.

Полученное значение N-status нормировалось к диапазону [0;100], что обеспечивало сопоставимость результатов между различными полями и датами наблюдений. Интеллектуальная составляющая разработанной системы заключается не только в вычислении интегрального показателя, но и в автоматическом объединении разнородных источников данных, формировании признакового пространства, контроле качества входных параметров, пороговой интерпретации результата и генерации текстовой рекомендации. Таким образом, система выполняет переход от набора разрозненных агрономических, спутниковых и метеорологических данных к управленческому выводу, пригодному для практического использования.

Интерпретация результатов и алгоритм расчёта

Для практического использования прогнозируемого показателя в системе применялась пороговая интерпретация значений N-status. В зависимости от полученного значения определялся уровень обеспеченности растений азотом и формировалась текстовая рекомендация для пользователя. Такой подход позволял перейти от числового результата к управленческому решению без необходимости дополнительной экспертной интерпретации.

Для интерпретации результата использовалась пороговая шкала, позволяющая перевести числовое значение N-status в качественный уровень обеспеченности растений азотом. В пилотной реализации применялись следующие интервалы: значения ниже 50 интерпретировались как пониженный уровень обеспеченности, значения от 50 до 70 — как средний уровень, значения выше 70 — как высокий уровень. Указанные пороги использовались как эвристические и могут быть уточнены при расширении экспериментальной базы и накоплении полевых данных.

Алгоритм расчёта реализован в следующей последовательности:

- проверка корректности и полноты входных данных;
- формирование вектора признаков;
- вычисление прогнозного значения N-status;
- нормирование результата и определение уровня обеспеченности;
- генерация интерпретируемой рекомендации;
- сохранение результатов расчёта в истории прогнозов.

Вычислительный контур разработанной системы представлен на рис. 1. Он отражает последовательность перехода от получения спутниковых, метеорологических и почвенных данных к формированию признаков, расчёту показателя N-status, интерпретации результата и сохранению прогноза в базе данных. Фиксация входных параметров и

результатов расчёта обеспечивала воспроизводимость экспериментов и возможность последующего анализа динамики азотного статуса во времени.

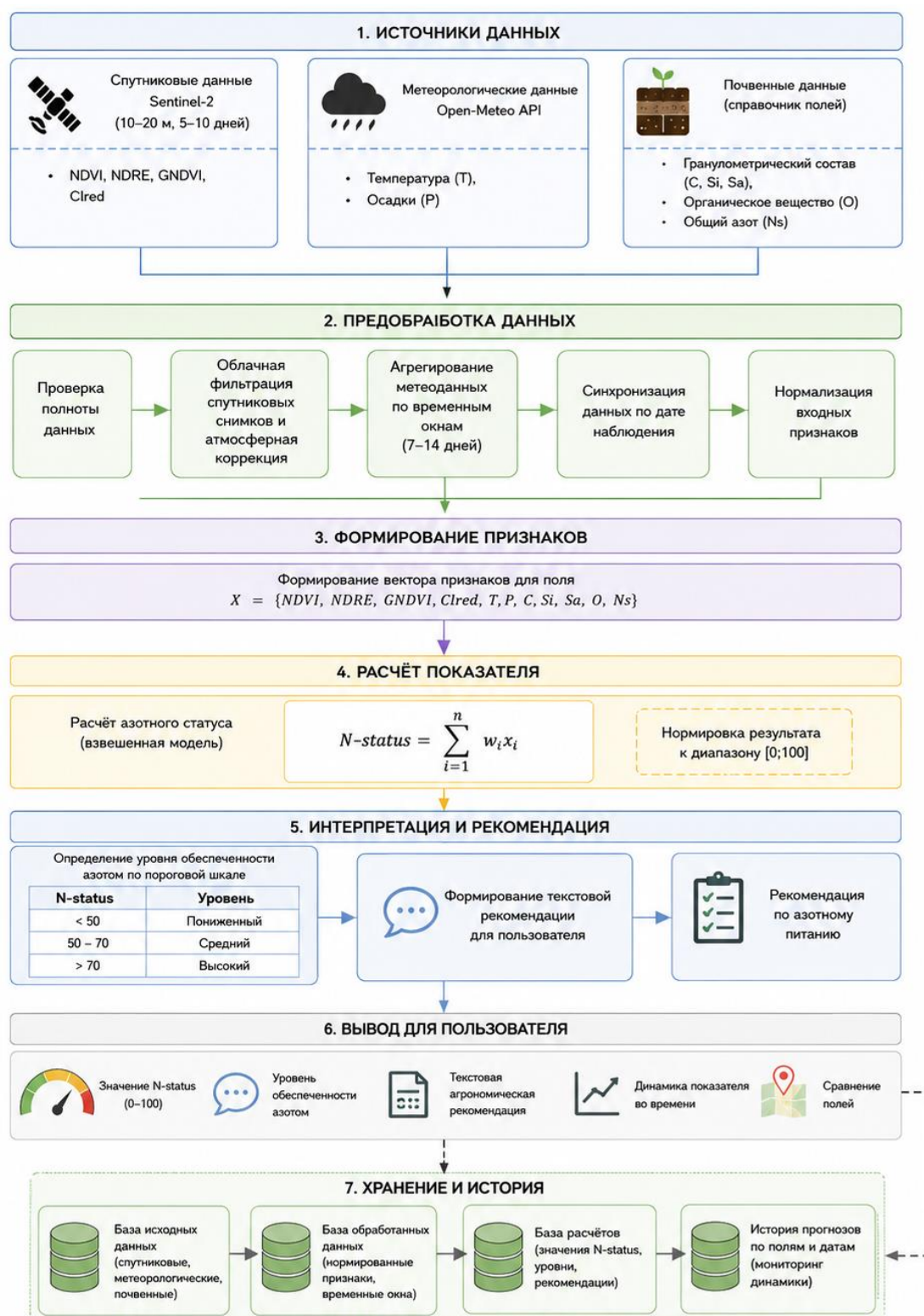


Рисунок 1. Вычислительный контур интеллектуальной системы поддержки принятия решений Wheat DSS

Примечание – составлено автором на основе данных (Оспанова, 2025)

Обоснование выбора методов

Выбор применённых методов обусловлен необходимостью объединения разнородных источников информации и ориентацией на практическое использование результатов. Использование спутниковых индексов позволяет оперативно оценивать состояние посевов на больших территориях, тогда как включение метеорологических и почвенных данных повышает устойчивость прогноза и снижает влияние случайных факторов. Реализация методов в виде интегрированной системы поддержки принятия решений обеспечивает воспроизводимость расчётов и возможность масштабирования подхода в условиях реального сельскохозяйственного производства.

Валидация и оценка качества модели

На текущем этапе корректность модели оценивалась путём сопоставления расчётного уровня N-status с экспертной оценкой состояния посевов и визуальным анализом динамики вегетационных индексов. Для пилотной проверки использовалось соответствие между рассчитанным уровнем обеспеченности, изменением индексов NDRE и Cired, количеством осадков и итоговой текстовой рекомендацией системы.

Количественная оценка точности рассматривается как следующий этап исследования и предполагает сопоставление прогнозируемых значений N-status с независимыми полевыми и лабораторными данными. Для этого планируется использовать стандартные метрики качества прогнозирования: MAE — среднюю абсолютную ошибку, RMSE — среднеквадратичную ошибку, а также анализ расхождений между расчётным и фактическим уровнями азотной обеспеченности по отдельным полям и фазам вегетации. Реализация предложенного подхода в виде веб-ориентированной цифровой системы поддержки принятия решений соответствует современным направлениям цифровизации агропромышленного комплекса и обеспечивает интеграцию данных, автоматизацию расчётов и доступность результатов для различных категорий пользователей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментальных расчётов азотного статуса

В ходе исследования были выполнены экспериментальные расчёты показателя азотного статуса пшеницы с использованием разработанной интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Расчёты проводились для отдельных сельскохозяйственных полей Костанайской области в различные даты вегетационного периода, что позволило проанализировать чувствительность прогнозируемого показателя к изменению входных параметров. Результаты экспериментальных расчётов азотного статуса пшеницы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментальных расчётов азотного статуса пшеницы

Показатель	12.06.2025	19.06.2025	26.06.2025
NDVI	0,74	0,77	0,71
NDRE	0,31	0,33	0,28
GNDVI	0,52	0,55	0,49
Cired	1,84	1,91	1,72
Средняя температура, °C	18,2	19,0	21,5
Осадки, мм	12	6	2
N-status	54,3	56,1	49,8
Уровень обеспеченности	Средний	Средний	Пониженный
<i>Примечание – составлено автором на основе результатов экспериментальных расчётов с использованием разработанной системы поддержки принятия решений (Оспанова, 2025).</i>			

Анализ данных показывает, что изменение значений вегетационных индексов и погодных параметров сопровождается соответствующей динамикой показателя N-status, что подтверждает чувствительность разработанной модели к изменению внешних условий.

Динамика изменения показателя азотного статуса пшеницы в течение исследуемого периода представлена на рис. 2. Как видно из графика, значение N-status увеличивается с 54,3 до 56,1 в середине периода, а затем снижается до 49,8, что совпадает с уменьшением суммы осадков и снижением значений NDRE и CIred. Такая динамика подтверждает чувствительность разработанной модели к изменению состояния растительного покрова и погодных условий.

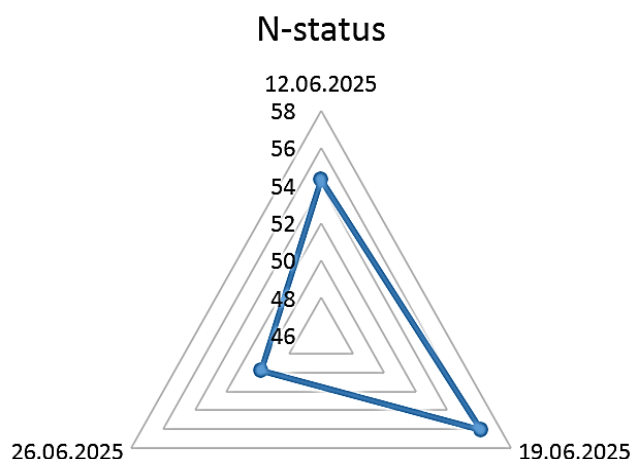


Рисунок 2. Динамика изменения показателя N-status в течение вегетационного периода
Примечание – составлено автором на основе данных (Оспанова, 2025)

Сравнительный анализ по двум полям

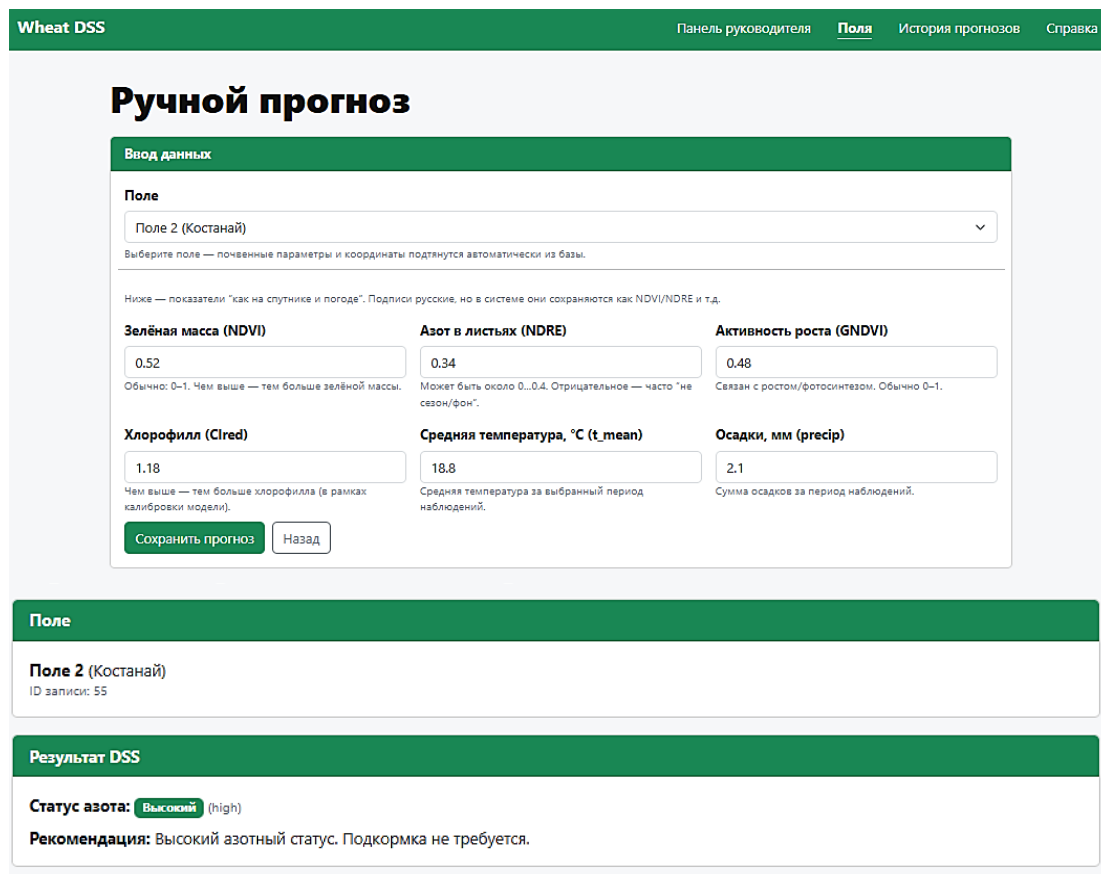
Для оценки пространственной неоднородности азотной обеспеченности был выполнен сравнительный анализ результатов прогнозирования для двух сельскохозяйственных полей при сопоставимых фазах вегетации (табл. 2). Представленные данные позволяют выявить различия, обусловленные почвенными и микроклиматическими условиями, и подтверждают наличие пространственной вариабельности показателя N-status.

Таблица 2. Сравнение прогнозируемого азотного статуса
по двум полям (19.06.2025)

Показатель	Поле 1	Поле 2
NDVI	0,77	0,69
NDRE	0,33	0,29
GNDVI	0,55	0,50
CIred	1,91	1,78
Средняя температура, °C	19,0	19,0
Осадки, мм	6	6
N-status	56,1	51,4
Уровень обеспеченности	Средний	Пониженный

Примечание – составлено автором на основе результатов прогнозирования азотного статуса для исследуемых полей (Оспанова, 2025).

Различия значений N-status обусловлены неоднородностью почвенных характеристик и отражают пространственную вариабельность условий возделывания. Функциональные возможности разработанной системы поддержки принятия решений, включая ввод исходных данных, автоматический расчёт показателя азотного статуса и формирование рекомендации, представлены на рис. 3.



Wheat DSS Панель руководителя Поля История прогнозов Справка

Ручной прогноз

Ввод данных

Поле
Поле 2 (Костанай)
Выберите поле — почвенные параметры и координаты подтянутся автоматически из базы.

Нижне — показатели "как на спутнике и погоде". Подписи русские, но в системе они сохраняются как NDVI/NDRE и т.д.

Зелёная масса (NDVI) 0.52 Обычно: 0–1. Чем выше — тем больше зелёной массы.	Азот в листьях (NDRE) 0.34 Может быть около 0...0.4. Отрицательное — часто "не сезон/фон".	Активность роста (GNDVI) 0.48 Связан с ростом/фотосинтезом. Обычно 0–1.
Хлорофилл (Cfired) 1.18 Чем выше — тем больше хлорофилла (в рамках калибровки модели).	Средняя температура, °C (t_mean) 18.8 Средняя температура за выбранный период наблюдений.	Осадки, мм (precip) 2.1 Сумма осадков за период наблюдений.

Сохранить прогноз Назад

Поле
Поле 2 (Костанай)
ID записи: 55

Результат DSS

Статус азота: Высокий (high)

Рекомендация: Высокий азотный статус. Подкормка не требуется.

Рисунок 3. Основные экранные формы системы поддержки принятия решений
Wheat DSS

Примечание — скриншоты приведены в уменьшенном формате (не более 1/3 страницы). Составлено автором (Оспанова, 2025).

Существенной особенностью разработанной интеллектуальной системы поддержки принятия решений является использование данных дистанционного зондирования Земли и агрометеорологической информации, поступающих из внешних источников. В автоматическом режиме система использует спутниковые вегетационные индексы и агрегированные метеорологические параметры, что снижает долю ручного ввода, повышает оперативность обновления прогнозов и уменьшает влияние субъективных факторов на результаты расчёта.

Реализованный функционал обеспечивает полный цикл цифровой поддержки принятия решений на уровне отдельного сельскохозяйственного поля, включая ведение справочника полей, хранение и автоматическую подстановку почвенных характеристик, расчёт показателя азотного статуса, формирование интерпретируемых рекомендаций и накопление истории прогнозов. Фиксация входных данных и результатов расчётов обеспечивает воспроизводимость вычислений и позволяет анализировать динамику состояния посевов во времени.

Для управленческого уровня в системе реализованы функции сводного мониторинга и формирования отчётов, обеспечивающие агрегированное представление информации по всем полям хозяйства и поддержку принятия управленческих решений. Таким образом, разработанная система может использоваться как инструмент оперативного агрономического контроля и управленческого мониторинга в условиях цифровизации агропромышленного комплекса.

Интерпретация и обсуждение результатов

Сравнение двух полей показывает, что даже при одинаковых метеорологических условиях различия в значениях вегетационных индексов и почвенных характеристик приводят к разным уровням N-status. Это подтверждает возможность использования системы для анализа пространственной неоднородности посевов и приоритизации полей, требующих дополнительного контроля. Анализ результатов, представленных в таблицах 1 и 2, показывает, что разработанная система адекватно реагирует на изменение входных параметров как во времени, так и в пространстве. Снижение значений индексов NDRE и Cired при уменьшении суммы осадков сопровождается снижением прогнозируемого показателя N-status, что согласуется с физиологическими особенностями азотного питания растений.

В отличие от подходов, основанных преимущественно на использовании отдельных вегетационных индексов, предложенный метод учитывает совокупное влияние спутниковых, метеорологических и почвенных факторов. Это повышает информативность прогнозирования и позволяет использовать результат не только для диагностики состояния посевов, но и для формирования интерпретируемых рекомендаций в рамках системы поддержки принятия решений. В традиционных подходах оценка состояния посевов часто основывается на использовании отдельных вегетационных индексов, преимущественно NDVI. Однако такие методы позволяют оценивать главным образом общую плотность растительного покрова и не учитывают влияние погодных условий и почвенных характеристик. В предложенной системе расчёт показателя N-status выполняется на основе интеграции нескольких групп признаков, что обеспечивает более содержательную интерпретацию результатов и расширяет возможности поддержки управленческих решений.

В качестве базового подхода можно рассматривать использование одного вегетационного индекса, например NDVI, для оценки состояния растительного покрова. Такой подход позволяет выявлять общие изменения биомассы, однако не учитывает влияние осадков, температуры и почвенных характеристик. В предложенной системе эти факторы объединяются в едином вычислительном контуре, что делает результат более содержательным для принятия агротехнологических решений.

Сравнение с результатами исследований, представленных в научной литературе, подтверждает, что использование отдельных вегетационных индексов позволяет выявлять зоны неоднородности, однако без интеграции почвенных и метеорологических данных интерпретация таких результатов остаётся ограниченной. В отличие от описанных подходов, предложенная система обеспечивает комплексную оценку состояния посевов и формирование интерпретируемых управленческих рекомендаций, что расширяет возможности практического применения данных дистанционного зондирования.

Полученные результаты демонстрируют, что разработанная система может быть использована не только для мониторинга состояния посевов, но и как элемент цифровой поддержки управленческих решений в хозяйстве. Формирование интерпретируемых рекомендаций на основе показателя N-status позволяет агроному оперативно принимать решения о необходимости дополнительного контроля или корректировки азотного питания без проведения трудоёмких наземных обследований. В управленческом контексте

система может применяться для приоритизации полей, планирования обследований и повышения обоснованности решений в условиях ограниченных ресурсов, что расширяет практическую применимость данных дистанционного зондирования в системе цифрового земледелия. Полученные результаты согласуются с исследованиями, посвящёнными цифровизации аграрного производства и внедрению интеллектуальных систем (Тлеубердинов и Ахметова, 2022; Омаров и Кенжебаева, 2023), что подтверждает практическую значимость разработанного подхода.

Использование спутниковых и агрометеорологических данных в составе разработанной системы соответствует приоритетным направлениям цифровизации агропромышленного комплекса Республики Казахстан, ориентированным на внедрение интегрированных цифровых решений и автоматизацию процессов управления. В этом контексте представленная система может рассматриваться как прикладной инструмент реализации задач цифровизации АПК, обеспечивающий переход от фрагментарного мониторинга к системной поддержке управленческих решений на уровне хозяйства.

Ограничения и практическая применимость

На текущем этапе исследование ориентировано преимущественно на разработку и апробацию архитектуры DSS и вычислительного контура прогнозирования. Проведение количественной оценки точности модели с использованием расширенного набора эталонных полевых измерений рассматривается как отдельный этап дальнейших исследований. Следует отметить, что результаты исследования получены в рамках пилотных расчётов и не включают расширенную выборку наземных эталонных измерений. Это ограничивает возможность количественной оценки точности прогнозирования на текущем этапе. Вместе с тем представленные результаты демонстрируют устойчивость подхода и его применимость для поддержки управленческих решений на уровне отдельного поля.

Полученные данные могут быть использованы в качестве основы для дальнейших исследований, направленных на калибровку модели по фактическим данным урожайности и лабораторным анализам, а также для внедрения системы в практику точного земледелия. Полученные результаты согласуются с выводами исследований, в которых подчёркивается необходимость комплексного учёта спутниковых, почвенных и метеорологических данных при оценке состояния посевов (Basso & Antle, 2020; Zhang et al., 2024). В отличие от указанных работ, предложенный подход ориентирован на практическую реализацию в системе поддержки принятия решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведённого исследования разработана и апробирована интеллектуальная система поддержки принятия решений для прогнозирования азотного статуса пшеницы на основе интеграции спутниковых, метеорологических и почвенных данных. Поставленная во введении цель достигнута: сформирована структура входных данных на уровне отдельного поля, реализован вычислительный контур расчёта показателя N-status, определены правила интерпретации значений и генерации рекомендаций, а также выполнена экспериментальная проверка работоспособности решения на данных полей Костанайской области. В работе уточнён вычислительный контур системы, определены источники спутниковых, метеорологических и почвенных данных, описаны этапы предварительной обработки и формирования признаков, а также предложена формализованная схема расчёта показателя N-status.

Полученные результаты показывают, что система чувствительна к изменениям вегетационных индексов и погодных условий и позволяет выявлять как временную динамику азотной обеспеченности в пределах одного поля, так и различия между полями

при сопоставимых фазах вегетации. Это подтверждает целесообразность комплексного учёта разнородных источников данных для повышения информативности прогнозов и перехода от мониторинга к поддержке управленческих решений.

Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной системы поддержки принятия решений, обеспечивающей не только расчёт прогнозного показателя азотного статуса, но и его интерпретацию в виде практических рекомендаций, а также накопление истории прогнозов для анализа динамики состояния посевов. Вклад автора состоит в формализации вычислительного процесса, объединяющего спутниковые индексы, метеорологические параметры и почвенные характеристики в едином контуре принятия решений на уровне поля.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования разработанной системы в хозяйственной деятельности в качестве цифрового инструмента поддержки принятия решений при управлении азотным питанием пшеницы. Система может быть интегрирована в процессы цифровизации агропромышленного производства для оперативной оценки состояния посевов, снижения неопределённости при принятии агротехнологических решений и повышения эффективности использования минеральных удобрений.

Полученные результаты формируют основу для внедрения цифровых решений в систему точного земледелия и могут быть использованы при масштабировании подхода на уровне хозяйства и региона. Ограничением исследования является пилотный характер расчётов, что определяет необходимость дальнейшей калибровки модели по данным урожайности и лабораторных анализов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку и консультации при выполнении исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: ИИ-помощник использовался для разработки рис. 1. вычислительного контура интеллектуальной системы поддержки принятия решений Wheat DSS. Научные результаты, интерпретация данных и выводы сформулированы автором самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254–256. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>
- Chen, X., Wang, J., Huang, W., Zhang, J., & Li, D. (2023). Estimation of winter wheat plant nitrogen concentration from UAV hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, 15(11), 2831. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/11/2831>
- Ravikumar, S., Reddy, V., & Prasad, P. V. V. (2024). Real-time nitrogen monitoring and management to improve crop performance: A review. *Smart Agricultural Technology*, 6, 100365. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416624000676>
- Wolters, S., Schmidhalter, U., & Maidl, F.-X. (2021). Upscaling proximal sensor nitrogen uptake predictions in winter wheat for decision support. *Precision Agriculture*, 22(4), 1107–1127. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09783-7>
- Zhang, S., Li, Z., Chen, X., & Yang, G. (2024). Integrating spectral and thermal features for crop nitrogen diagnosis. *Agricultural Systems*, 228, 103737. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169924004137>
- Казгидромет. (2023). Агрометеорологические условия и прогнозы для сельского хозяйства. <https://www.kazhydromet.kz/ru/agrometeorology> // Казгидромет. (2023).

Agrometeorologicheskie usloviya i prognozy dlya sel'skogo khozyaystva [Agrometeorological conditions and forecasts for agriculture]. <https://www.kazhydromet.kz/ru/agrometeorology> (In Russ.)

- Казгидромет. (2024). Прогноз агрометеорологических условий в зерновой зоне Казахстана. <https://www.kazhydromet.kz/ru/post> // Kazgidromet. (2024). Prognoz agrometeorologicheskikh usloviy v zernovoy zone Kazakhstan [Forecast of agrometeorological conditions in the grain-producing zone of Kazakhstan]. <https://www.kazhydromet.kz/ru/post> (In Russ.)
- Кенжебаева, А. Т., & Омаров, Н. Ж. (2021). Информационные системы поддержки принятия решений в сельском хозяйстве. Вестник науки и образования, 6(114), 21–27. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46211894> // Kenzhebayeva, A. T., & Omarov, N. Zh. (2021). Informatsionnye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v sel'skom khozyaystve [Information systems for decision support in agriculture]. Vestnik nauki i obrazovaniya, 6(114), 21–27. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46211894> (In Russ.)
- Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан. (2022). Цифровизация агропромышленного комплекса Республики Казахстан: аналитический обзор. <https://www.gov.kz/memleket/entities/moa> // Ministerstvo sel'skogo khozyaystva Respubliki Kazakhstan. (2022). Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa Respubliki Kazakhstan: analiticheskiy obzor [Digitalization of the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan: Analytical review]. <https://www.gov.kz/memleket/entities/moa> (In Russ.)
- Мименбаева, Г. К., Сулейменов, Б. У., & Нуртазин, С. А. (2024). Применение технологий точного земледелия в условиях Северного Казахстана. Аграрная наука Казахстана, 1(85), 45–53. <https://kazniizhik.kz/ru/science/journal> // Mimenbayeva, G. K., Suleimenov, B. U., & Nurtazin, S. A. (2024). Primenenie tekhnologiy tochnogo zemledeliya v usloviyakh Severnogo Kazakhstan [Application of precision agriculture technologies in Northern Kazakhstan]. Agramnaya nauka Kazakhstan, 1(85), 45–53. <https://kazniizhik.kz/ru/science/journal> (In Russ.)
- Нурпеисова, Р.К., & Баймуханов, А.Б. (2020). Оценка обеспеченности азотом посевов пшеницы в условиях сухостепной зоны Казахстана. Агрохимия, 7, 56–63. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43876211> // Nurpeisova, R. K., & Baimukhanov, A. B. (2020). Otsenka obespechennosti azotom posevov pshenitsy v usloviyakh suhostepnoy zony Kazakhstan [Assessment of nitrogen supply of wheat crops under the dry-steppe conditions of Kazakhstan]. Agrokimiya, 7, 56–63. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43876211> (In Russ.)
- Омаров, Н. Ж., & Кенжебаева, А. Т. (2023). Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в аграрном секторе. Информационные технологии, 2, 41–49. <https://journals.kazitu.kz/> // Omarov, N. Zh., & Kenzhebayeva, A. T. (2023). Intellektual'nye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v agrarnom sektore [Intelligent decision support systems in the agricultural sector]. Informatsionnye tekhnologii, 2, 41–49. <https://journals.kazitu.kz/> (In Russ.)
- Сагинтаев, А. С., & Жакупов, А. К. (2023). Использование спутниковых данных для мониторинга состояния посевов зерновых культур. Вестник КазАТК, 4(112), 88–96. <https://vestnik.alt.edu.kz/> // Sagintaev, A. S., & Zhakupov, A. K. (2023). Ispol'zovanie sputnikovyykh dannykh dlya monitoringa sostoyaniya posevov zernovykh kul'tur [Use of satellite data for monitoring the condition of cereal crops]. Vestnik KazATK, 4(112), 88–96. <https://vestnik.alt.edu.kz/> (In Russ.)
- Сулейменов, М. К., & Алимкулов, С. А. (2021). Цифровизация агропромышленного комплекса Республики Казахстан. Экономика: стратегия и практика, 16(2), 98–107. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46392089> // Suleimenov, M. K., & Alimkulov, S. A. (2021).

Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa Respubliki Kazakhstan [Digitalization of the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan]. *Ekonomika: strategiya i praktika*, 16(2), 98–107. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46392089> (In Russ.)

Тлеубердинов, А.К., & Ахметова, Л.К. (2022). Цифровые технологии в управлении аграрным производством. *Проблемы агрорынка*, 3, 32–40. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49876543> // Tleuberdinov, A.K., & Akhmetova, L.K. (2022). Tsifrovyte tekhnologii v upravlenii agrarnym proizvodstvom [Digital technologies in agricultural production management]. *Problemy agrorynka*, 3, 32–40. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49876543> (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Оспанова Шынар Бектепбергенқызы – докторант, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., Қазақстан

Оспанова Шынар Бектепбергенқызы – докторант, Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, г. Костанай, Казахстан

Ospanova Shynar Bektepbergenkyzy – Doctoral Student, Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly, Kostanay, Kazakhstan

e-mail: kikt2015@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8528-3475>