

АННОТАЦИЯ

Диссертационная работа Арыстанова Асета Амирхановича на тему «Спутниковый мониторинг озимых зерновых культур на юге Казахстана на основе современных геоинформационных систем», представляемая на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D07302 – Геоинформатика».

Южные регионы Республики Казахстан, включая Туркестанскую область и прилегающие предгорные территории, относятся к зонам высокой аграрной значимости и одновременно к природно-климатически уязвимым территориям. Озимые зерновые культуры занимают ведущие позиции в структуре землепользования региона и в условиях ограниченных водных ресурсов и преобладания богарного земледелия формируют основу продовольственной безопасности. Возделывание озимых осуществляется при аридном климате, выраженной межгодовой изменчивости осадков, нестабильном температурном режиме и пространственной неоднородности агроландшафтов.

В указанных условиях возрастает потребность в пространственно детализированной, оперативной и объективной информации о фактическом состоянии посевов, динамике их развития и параметрах устойчивости землепользования. Традиционные подходы мониторинга, основанные преимущественно на статистической отчётности и выборочных наземных обследованиях, не обеспечивают полного территориального охвата, характеризуются низкой временной частотой и задержками поступления данных.

Использование данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных систем переводит мониторинг сельскохозяйственных угодий от статистических обобщений к пространственно ориентированному анализу. Мультиспектральные данные Sentinel-2 обеспечивают высокую временную дискретность и создают условия для систематического наблюдения озимых зерновых в течение всего производственного цикла — от осеннего сева до созревания.

Актуальность исследования

Актуальность темы раскрывается по трём ключевым аспектам:

- продовольственная безопасность;
- внедрение цифровых технологий в агропромышленный комплекс;
- необходимость объективного мониторинга сельскохозяйственных земель юга Казахстана в условиях климатических рисков.

Актуальность определяется потребностью в воспроизводимой методике спутникового мониторинга озимых зерновых культур для богарных условий юга Казахстана. Методика обеспечивает сопоставимое выделение посевных площадей по годам и агроклиматическим зонам (по ГТК), оценку состояния посевов (включая засорённость), определение сроков уборки по временным рядам Sentinel-2, а также обязательную верификацию результатов по данным наземных наблюдений. На государственном уровне в качестве

приоритета обозначено повышение эффективности спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель с использованием методов искусственного интеллекта и углублённый анализ качества земель, продуктивности, состояния сельскохозяйственных культур и их пространственного распределения.

В связи с этим разработана научно обоснованная система спутникового мониторинга озимых зерновых культур на основе современных геоинформационных технологий относится к актуальным научным и прикладным задачам.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационного исследования — разработка и научное обоснование методов спутникового мониторинга озимых зерновых культур в южных регионах Казахстана на основе мультиспектральных данных Sentinel-2 и геоинформационных систем, с последующей пространственно-временной оценкой структуры посевов, динамики вегетационного развития, особенностей повторного сева и устойчивости землепользования.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- разработать методику определения фактически засеянных площадей озимых зерновых культур по осенним спутниковым данным;
- выполнить анализ пространственно-временной динамики вегетационного развития на основе спектральных индексов;
- разработать и апробировать методы автоматизированной классификации сельскохозяйственных культур в условиях богарного земледелия;
- выявить повторный сев озимых зерновых культур и проанализировать его пространственное распределение;
- интегрировать полученные результаты в геоинформационную среду комплексного мониторинга.

Объект, предмет и территориальные границы исследования

Объект исследования — озимые зерновые культуры, возделываемые в южных регионах Республики Казахстан.

Предмет исследования — методы спутникового мониторинга, основанные на использовании данных Sentinel-2, спектральных индексов и геоинформационных систем и ориентированные на оценку состояния и динамики развития озимых зерновых культур.

Территориальные рамки исследования охватывают преимущественно равнинные и предгорные агроландшафты Туркестанской области, характеризующиеся различными агроклиматическими условиями и структурой землепользования.

Исходные данные и методы исследования

Основным источником данных использованы мультиспектральные изображения Sentinel-2 уровня L2A. Пространственное разрешение составляет 10 м, период повторной съёмки — 2–5 суток. Анализ охватывал несколько вегетационных сезонов, что учитывает межгодовую изменчивость природных условий.

В исследовании применены следующие методы:

- расчёт и анализ спектральных индексов NDVI и GRVI;
- анализ временных рядов спутниковых данных;
- методы автоматизированной классификации сельскохозяйственных культур;
- пространственный анализ и картографирование в среде ГИС;
- экспертная оценка результатов и верификация по данным наземных наблюдений.

Обработка и анализ данных выполнены в геоинформационных системах с формированием единой базы пространственных данных.

Основные научные результаты

В ходе диссертационного исследования получен комплекс результатов, охватывающих ключевые аспекты спутникового мониторинга озимых зерновых культур.

Разработана методика определения фактически засеянных площадей озимых зерновых культур по осенним данным Sentinel-2. Подход обеспечивает формирование маски посевов непосредственно после завершения сева и её последующую верификацию весной по динамике NDVI, что задаёт пространственную основу мониторинга.

На основе временных рядов NDVI выполнен анализ пространственно-временных особенностей вегетационного развития озимых зерновых культур. В весенние фазы вегетации значения NDVI характеризуют темпы нарастания биомассы и пространственную неоднородность агроценозов.

Обосновано применение индекса GRVI в период созревания при снижении NDVI. GRVI выделяет участки с сохранённым зелёным растительным покровом и уточняет интерпретацию спутниковых наблюдений.

Разработана и апробирована методика автоматизированной классификации сельскохозяйственных культур в условиях богарного земледелия на основе данных Sentinel-2. Результаты показывают применимость автоматизированных подходов для мониторинга структуры посевов на региональном уровне.

По многолетним спутниковым данным выявлены зоны повторного сева озимых зерновых культур и исследованы их пространственные закономерности. Повторный сев рассмотрен как индикатор устойчивости землепользования.

Научная новизна исследования

Научная новизна диссертационной работы характеризуется следующими положениями:

- Впервые для условий юга Казахстана определён и экспериментально проверен индекс распаханности PLI. Индекс обеспечивает высокоточную идентификацию фактически засеянных озимых культур и включён в алгоритм построения осенней маски посевов с последующей весенней проверкой.

- Научно обоснован дифференцированный подход к спектральной оценке состояния озимых культур по агроклиматическим зонам. При оценке учитываются засорённость посевов, влаготепловые условия территории и особенности повторного сева. Установлено влияние агроклиматических различий на временную динамику NDVI, а также возможность выявления участков с высокой засорённостью по индексу GRVI.

- Разработана комплексная система спутникового мониторинга озимых культур, объединяющая данные Sentinel-2, агрометеорологические показатели и материалы полевых исследований в единой геоинформационной среде и охватывающая дистанционное наблюдение от сева до уборки урожая.

Положения, выносимые на защиту

1. Подход, основанный на использовании разновременных данных Sentinel-2, применении индекса распаханности PLI и весенней проверке по динамике NDVI, обеспечивает точное построение маски посевов. Метод надёжно идентифицирует фактически засеянные площади и формирует пространственную основу системы спутникового мониторинга.

2. Спутниковая оценка состояния озимых культур в вегетационный период основана на анализе временной динамики NDVI с учётом агроклиматического районирования по ГТК. Установлено влияние климатических условий и особенностей возделывания (включая повторный сев) на спектральные кривые развития. Подход используется для корректной оценки состояния посевов, выявления отклонений в темпах накопления биомассы и определения участков с высокой засорённостью по индексу GRVI.

3. Спутниковый мониторинг охватывает полный производственный цикл озимых культур — от сева до уборки. Период уборки определяется после достижения пика вегетации (после максимума NDVI) по резкому и синхронному снижению вегетационных индексов в пределах одного поля. При естественном созревании индекс снижается постепенно; при уборке наблюдается быстрый спад за короткий интервал времени. Данный признак используется для определения сроков уборки и её пространственной динамики в единой геоинформационной системе.

Практическая значимость результатов и области применения

Практическая значимость результатов определяется возможностью применения разработанных методов спутникового мониторинга при решении прикладных задач пространственного анализа и оценки сельскохозяйственных угодий. Подходы основаны на открытых данных Sentinel-2 и не требуют специализированных дорогостоящих источников, что поддерживает их воспроизводимость и масштабирование.

Методика определения фактически засеянных площадей озимых культур применима в деятельности региональных органов управления агропромышленным комплексом для анализа структуры посевов, оценки изменений землепользования и сопоставления с официальной статистикой. Картографические материалы уточняют пространственное распределение

озимых культур на уровнях административных районов и сельскохозяйственных массивов.

Методы вегетационного анализа на основе NDVI и GRVI применимы для контроля состояния посевов на различных фазах вегетации, выявления зон замедленного развития и пространственной неоднородности агроценозов. Указанные методы формируют основу анализа агроклиматических рисков без перехода к прямой оценке урожайности.

Результаты автоматизированной классификации применимы при формировании и актуализации геоинформационной базы данных землепользования, а также при выполнении научно-аналитических работ по спутниковому мониторингу сельскохозяйственных территорий.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационного исследования апробированы в научных публикациях, на научных семинарах и в рамках международного научного сотрудничества. Методические положения и результаты проверены при выполнении научно-исследовательских работ, посвящённых спутниковому мониторингу сельскохозяйственных территорий.

Результаты исследования опубликованы в международных рецензируемых научных журналах, индексируемых в Web of Science Core Collection и Scopus:

1. Arystanov, A., Karabkina, N., Sagin, J., Nurguzhin, M., King, R., & Bekseitova, R. (2024). Use of Indices Applied to Remote Sensing for Establishing Winter–Spring Cropping Areas in the Republic of Kazakhstan. *Sustainability*, 16(17), 7548. <https://doi.org/10.3390/su16177548>.

2. Arystanov, A., Sagin, J., Karabkina, N., Arystanova, R., Yermekov, F., Kabzhanova, G., Bekseitova, R., Aktymbayeva, A., & Kutymova, N. (2025). Automatic Classification of Agricultural Crops Using Sentinel-2 Data in the Rainfed Zone of Southern Kazakhstan. *Agronomy*, 15(9), 2040. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092040>.

3. Arystanov, A., Sagin, J., Kabzhanova, G., Sarsekova, D., Bekseitova, R., Molzhigitova, D., Balkozha, M., Yeleuova, E., & Satvaldiyev, B. (2026). Winter Cereal Re-Sowing and Land-Use Sustainability in the Foothill Zones of Southern Kazakhstan Based on Sentinel-2 Data. *Sustainability*, 18(2), 1053. <https://doi.org/10.3390/su18021053>.

Публикации прошли независимое рецензирование, что подтвердило корректность применённых методов и обоснованность выводов.

Отдельные результаты обсуждались на научных семинарах кафедры картографии и геоинформатики и получили положительную оценку специалистов в области геоинформатики и дистанционного зондирования. В ходе обсуждений уточнялись методические аспекты пространственно-временного анализа.