

Лекционный материал

Тема семинара:

«Использование БПЛА и данных спутникового мониторинга в контроле состояния посевов с/х культур»

Лектор:



Мақұл Алмасбек - СНС лаборатории цифровых технологий и моделирования.

Эксперт:

Бейлгази́на Сауле Мункановна – заместитель председателя правления по науке, доктор с/х наук, профессор.

**Лекционный материал по семинару на тему:
«Использование БПЛА и данных спутникового мониторинга
в контроле состояния посевов сельскохозяйственных культур»**

План семинара:

1. Дистанционное зондирование в системе точного земледелия.
2. БПЛА в контроле состояния посевов.
3. Спутниковые данные для мониторинга посевов.
4. Интеграция БПЛА, спутников и наземных измерений.

Цель лекции

Цель лекции – сформировать системное представление о применении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и спутниковых данных дистанционного зондирования Земли для оперативного контроля состояния посевов, выявления стрессовых факторов, оценки неоднородности поля и поддержки решений в точном земледелии.

Планируемые результаты обучения

- объяснять физические основы дистанционного зондирования растительного покрова;
- различать возможности БПЛА, спутников Sentinel-2, Landsat и коммерческих платформ;
- интерпретировать основные вегетационные индексы: NDVI, NDRE, GNDVI, SAVI, NDWI, MSI и др.;
- понимать технологическую цепочку: сбор данных – предобработка – расчёт индексов – карта предписаний – агрономическое решение;
- оценивать ограничения метода: облачность, калибровка, пространственное разрешение, стоимость, правовые и организационные требования.

Ключевая идея

Современный контроль посевов основан не только на визуальном осмотре поля, но и на количественной оценке отражательной способности растений в разных спектральных диапазонах. БПЛА дают очень детальные данные на уровне отдельного поля, а спутники обеспечивают регулярное покрытие больших территорий. Наиболее эффективный подход – их совместное использование: спутниковые данные помогают выявить проблемные зоны, а БПЛА уточняют причины неоднородности и позволяют подготовить локальные мероприятия.

1. Дистанционное зондирование в системе точного земледелия

Дистанционное зондирование – это получение информации об объекте без непосредственного контакта с ним. В сельском хозяйстве объектом наблюдения является система «почва – растение – атмосфера». Состояние посевов оценивается по спектральным, тепловым, пространственным и временным признакам. Растения по-разному отражают электромагнитное излучение в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах. Здоровые растения обычно поглощают красный свет хлорофиллом и сильно отражают ближний инфракрасный диапазон благодаря внутренней структуре листа.

В точном земледелии задача мониторинга состоит не только в создании красивой карты поля. Главное – перевести изображение в агрономически значимое решение: где не хватает влаги, где снижена густота стояния, где вероятны болезни или вредители, где нужна дифференцированная подкормка, а где причиной низких индексов является переуплотнение почвы или засоление.

Основные уровни мониторинга

Уровень	Источник данных	Типичные задачи
Регион	Спутники	оценка посевных площадей, засухи, динамики продуктивности
Хозяйство	Спутники + БПЛА	сравнение полей, планирование объезда, раннее выявление проблем
Поле	БПЛА, наземные датчики	карты неоднородности, диагностика стрессов, контроль всходов
Участок/растение	БПЛА высокого разрешения, наземные обследования	точная диагностика причин стресса, верификация моделей

Преимущество цифрового мониторинга

Цифровой мониторинг позволяет перейти от усреднённого управления полем к управлению по зонам. Это особенно важно для зерновых, масличных, кормовых и овощных культур, где неоднородность влаги, питания, рельефа и почвенного покрова может резко менять урожайность в пределах одного поля.

2. БПЛА в контроле состояния посевов

БПЛА – это мобильная платформа для получения изображений высокого пространственного разрешения. В агромониторинге используют мультикоптеры и самолётного типа аппараты. Мультикоптеры удобны для небольших полей, детальной съёмки, зависания над объектом и работы на сложном рельефе. БПЛА самолётного типа эффективны для больших площадей, так как имеют большую продолжительность полёта и покрывают больше территории за один вылет.

С точки зрения агрономии БПЛА полезны в тех случаях, когда требуется высокая детализация: оценка равномерности всходов, выявление пропусков, локальных очагов стресса, полегания, сорной растительности, повреждений градом, водного стресса или проблем после внесения удобрений. FAO рассматривает беспилотные и автономные системы как один из инструментов современного сельского хозяйства, включая мониторинг посевов, точное опрыскивание, картирование урожайности и применение методов искусственного интеллекта [6].

Основные типы БПЛА

Тип БПЛА	Преимущества	Ограничения	Рекомендуемое применение
Мультикоптер	точный взлёт/посадка, зависание, детальная съёмка	меньшая дальность и время полёта	небольшие поля, опытные участки, проблемные зоны
Самолётный тип	большая площадь покрытия, высокая производительность	нужна площадка для запуска/посадки, менее гибкая траектория	крупные поля и регулярный мониторинг
Гибрид VTOL	вертикальный взлёт + дальность самолётного типа	высокая стоимость и сложность обслуживания	агрохолдинги, сервисные компании

Практическая ценность

БПЛА не заменяют агронома. Они помогают быстро локализовать проблему, построить карту неоднородности и выбрать места для наземного обследования. Научно корректный подход требует обязательной валидации: измерения биомассы, высоты растений, влажности почвы, содержания хлорофилла, густоты стояния или фактической урожайности.

Сенсоры БПЛА и получаемые данные

Качество агромониторинга зависит не только от самого дрона, но и от полезной нагрузки. Наиболее распространены RGB-камеры, мультиспектральные, гиперспектральные и тепловизионные сенсоры. В отдельных задачах применяются LiDAR-системы для построения трёхмерной структуры растительного покрова.

RGB-камеры

RGB-изображения фиксируют отражение в красном, зелёном и синем диапазонах. Они дешевле мультиспектральных камер и подходят для визуального анализа, ортофотопланов, оценки пропусков, полегания, сорной растительности, эрозии, подтоплений и состояния междурядий. Однако RGB-данные ограничены при ранней диагностике физиологического стресса, поскольку признаки нехватки азота, влаги или болезни часто становятся видимыми только после развития проблемы.

Мультиспектральные камеры

Мультиспектральные камеры регистрируют несколько узких диапазонов: blue, green, red, red edge, near infrared. Наличие NIR и red edge резко повышает информативность для оценки биомассы, хлорофилла и азотного статуса. Именно эти диапазоны лежат в основе индексов NDVI, NDRE, GNDVI и других показателей.

Тепловизоры и гиперспектральные камеры

Тепловизионная съёмка измеряет температуру растительного покрова. При дефиците влаги у растений закрываются устьица, снижается транспирация, и температура кроны повышается. Гиперспектральные камеры фиксируют десятки или сотни спектральных каналов, что позволяет точнее различать стрессовые состояния, но такие системы дороги, требуют сложной калибровки и больших вычислительных ресурсов.

Сенсор	Что показывает	Типичные задачи
RGB	видимая структура посевов	пропуски, полегание, сорняки, эрозия
Мультиспектральный	биомасса, хлорофилл, состояние листьев	NDVI, NDRE, дифференцированное внесение
Тепловизионный	температура кроны	водный стресс, неисправности орошения
LiDAR	трёхмерная структура	высота, объём растительной массы, рельеф

3. Спутниковые данные для мониторинга посевов

Спутниковый мониторинг обеспечивает регулярное наблюдение больших территорий. Для сельского хозяйства особенно важны открытые данные Sentinel-2 и Landsat, а также коммерческие спутники с более высоким пространственным разрешением. Sentinel-2 имеет 13 спектральных каналов от видимого до коротковолнового инфракрасного диапазона; ESA подчёркивает значение red edge-каналов для оценки состояния растительности, хлорофилла, водного содержания и роста растений [4].

Copernicus указывает, что Sentinel-2 обеспечивает пространственное разрешение 10–20 м для ключевых каналов, глобальное покрытие и периодичность повторного наблюдения около 5 дней, что создаёт возможности для регионального и глобального сельскохозяйственного мониторинга [1]. Sentinel Hub также подчёркивает наличие 12 спектральных каналов с разрешением 10–20 м и 5-дневной повторяемостью для агромониторинга [8].

Landsat имеет более длительный архив наблюдений, что важно для анализа многолетних трендов. NASA развивает проект Harmonized Landsat and Sentinel-2 (HLS), который объединяет данные Landsat-8/9 и Sentinel-2A/B в согласованный набор поверхностной отражательной способности. По данным NASA, HLS Version 2.0 обеспечивает почти глобальное покрытие, а виртуальная группировка датчиков позволяет получать наблюдения примерно раз в три дня на экваторе, хотя облачность может ограничивать фактическую доступность чистых изображений [2].

Сравнение спутников и БПЛА

Параметр	БПЛА	Sentinel-2 / Landsat	Комментарий
Разрешение	сантиметры	10–30 м	БПЛА лучше для малых участков
Периодичность	по расписанию хозяйства	регулярный орбитальный цикл	спутники удобны для динамики
Покрытие	одно поле/группа полей	район, область, страна	спутники лучше для масштаба
Ограничения	погода, батареи, правила полётов	облачность, смешанные пиксели	методы дополняют друг друга

Спектральные признаки и вегетационные индексы

Вегетационные индексы – это математические комбинации спектральных каналов, усиливающие связь изображения с состоянием растительности. Они не являются прямым измерением урожайности или содержания азота, но служат индикаторами биомассы, хлорофилла, влажности и стресса. NASA Earthdata в 2025 г. сообщила о выпуске продуктов HLS с набором из девяти вегетационных индексов для мониторинга зелёности, влаги, изменений и других задач при 30-метровом разрешении [3].

Основные индексы

Индекс	Формула	Интерпретация	Типичные ограничения
NDVI	$(\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + \text{Red})$	зелёная биомасса и фотосинтетическая активность	насыщается при высокой биомассе
NDRE	$(\text{NIR} - \text{RedEdge})/(\text{NIR} + \text{RedEdge})$	хлорофилл, азотный статус, поздние фазы	нужен red edge-канал
GNDVI	$(\text{NIR} - \text{Green})/(\text{NIR} + \text{Green})$	хлорофилл, состояние листьев	чувствителен к освещению и фону
SAVI	$((\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + \text{Red} + L)) * (1 + L)$	растительность при заметном влиянии почвы	требует выбора коэффициента L
NDWI	$(\text{NIR} - \text{SWIR})/(\text{NIR} + \text{SWIR})$	водное содержание растительности	зависит от доступности SWIR
MSI	SWIR/NIR	водный стресс, сухость листьев	растёт при снижении влаги

При интерпретации индексов важно учитывать фазу развития культуры. Один и тот же NDVI может иметь разный смысл для всходов, кущения, выхода в трубку, цветения и созревания. Поэтому корректная диагностика строится на временных рядах, сравнении с контрольными участками и полевыми измерениями.

Пороговые значения

Универсальных порогов NDVI для всех культур не существует. Порог должен зависеть от культуры, сорта, даты съёмки, фазы развития, почвы, угла освещения, типа сенсора и условий сезона. Для практики лучше использовать относительные показатели: сравнение зон внутри одного поля, отклонение от исторической нормы, изменение индекса за неделю или две, а также связь с урожайностью.

Контроль состояния посевов по фазам развития

На разных этапах вегетации дистанционные данные решают разные задачи. На ранних стадиях важны равномерность всходов, пропуски, подтопления, корка, повреждения после заморозков и качество посева. В середине сезона на первый план выходят биомасса, азотное питание, водный стресс, сорняки, болезни и вредители. В конце сезона анализируют созревание, полегание, предуборочную неоднородность и прогноз урожайности.

Пример для зерновых культур

Фаза	Что контролировать	Рекомендуемые данные	Агрономическое решение
Всходы	равномерность, пропуски	RGB БПЛА, NDVI Sentinel-2	пересев, корректировка нормы высева в будущем
Кущение	густота, слабые зоны	NDVI, GNDVI, БПЛА	обследование почвы, ранняя подкормка
Выход в трубку	азотный статус, стресс	NDRE, red edge, полевые пробы	дифференцированное внесение N
Колошение/цветение	болезни, водный стресс	тепловые данные, NDWI, RGB	защита растений, управление поливом
Созревание	полегание, неоднородность	RGB, NDVI временной ряд	план уборки, оценка потерь

Для масличных и овощных культур акценты могут отличаться. Например, при подсолнечнике важны оценка равномерности посева, стресс от засухи и состояние корзинки; при картофеле – влажность, болезни листьев, неоднородность междурядий и развитие ботвы; при кукурузе – биомасса, высота растений, потребность в азоте и водный стресс.

Почему нужен временной ряд

Один снимок показывает состояние на конкретную дату, но не объясняет причину. Временной ряд показывает динамику: поле развивается нормально, отстаёт с начала сезона или резко ухудшилось после определённого события. Такое различие принципиально важно: постоянная низкая продуктивность может быть связана с почвой, а резкое падение индекса – с засухой, болезнью, вредителями или ошибкой обработки.

Технологическая цепочка получения и обработки данных БПЛА

Работа с БПЛА состоит из нескольких этапов. Ошибки на любом этапе снижают достоверность карты. Поэтому съёмка должна быть стандартизирована: высота, перекрытие, время суток, скорость, радиометрическая калибровка, контрольные точки и журнал полёта.

Этапы выполнения полёта

1. Постановка агрономической задачи: контроль всходов, оценка азотного статуса, поиск стрессовых зон, обследование после града или засухи.
2. Выбор платформы и сенсора: RGB, мультиспектральный, тепловой или комбинированный вариант.
3. Планирование маршрута: высота, продольное и поперечное перекрытие, скорость, направление полёта, учёт ветра и препятствий.
4. Калибровка сенсора: использование отражательной панели, датчика освещённости, проверка экспозиции и фокусировки.
5. Сбор изображений и контроль качества на месте: резкость, отсутствие засветки, полнота покрытия, корректность геотегов.
6. Фотограмметрическая обработка: построение ортофотоплана, цифровой модели поверхности, мозаики индексов.
7. Агрономическая интерпретация и верификация: выезд в проблемные зоны, отбор проб, сравнение с картой урожайности.

Выходные продукты

Основными продуктами БПЛА-съёмки являются ортофотоплан, карта вегетационных индексов, карта высоты растений, карта пропусков, карта сорной растительности, тепловая карта, карта зон управления и карта предписаний для техники. Для научной работы важно сохранять метаданные: дату и время съёмки, модель камеры, высоту полёта, погодные условия, параметры обработки и систему координат.

Типичная ошибка

Частая ошибка – строить выводы только по цветной карте NDVI без полевых данных. Правильная карта должна сопровождаться агрономическим объяснением: что именно измерено, какова неопределённость, какие участки проверены, какое решение предлагается и каким будет экономический эффект.

Обработка спутниковых данных: от снимка к карте поля

Спутниковая обработка начинается с выбора подходящего продукта. Для большинства агрономических задач используют атмосферно скорректированные данные поверхностной отражательной способности. Далее выполняют маскирование облаков и теней, обрезку по границам поля, расчёт индексов и построение временного ряда. Важную роль играет пространственное разрешение: пиксель 10 м соответствует площади 100 м², поэтому границы поля, лесополосы, дороги и смешанные пиксели должны быть исключены из анализа.

Последовательность обработки

8. Получить границы полей в формате Shapefile, GeoJSON или KML.
9. Выбрать спутниковые сцены с минимальной облачностью и подходящей датой.
10. Выполнить атмосферную коррекцию или использовать готовый уровень обработки.
11. Удалить облака, тени, снег, водные поверхности и краевые пиксели.
12. Рассчитать индексы NDVI, NDRE, NDWI, SAVI или другие показатели.
13. Построить график динамики по полю и по зонам поля.
14. Сравнить результаты с погодой, агротехническими операциями и наземными наблюдениями.

Карта неоднородности

Карту индекса следует интерпретировать не как абсолютный диагноз, а как карту вероятных зон различия. Например, низкий NDVI может означать слабые всходы, оголённую почву, засуху, болезнь, повреждение вредителями, засоление, переуплотнение, избыток влаги или фазу созревания. Поэтому спутниковая карта отвечает на вопрос «где смотреть?», а наземная проверка отвечает на вопрос «почему так произошло?».

Преимущество временной аналитики

При регулярном мониторинге можно получить профиль развития поля: дата начала вегетации, скорость набора биомассы, максимум индекса, начало старения и устойчивость к стрессовым событиям. Такие признаки используют для оценки продуктивности и сравнения технологий выращивания.

4. Интеграция БПЛА, спутников и наземных измерений

Наиболее надёжная система контроля строится на объединении трёх источников: спутники обеспечивают частую картину больших площадей, БПЛА уточняют детали в пределах поля, а наземные измерения подтверждают причину и позволяют калибровать модели. В литературе по Sentinel-2 подчёркивается, что данные этой миссии полезны для мониторинга биотических и абиотических стрессов, но для уверенной диагностики часто требуется сочетание дистанционного зондирования с полевыми данными [5].

Модель принятия решения

Пример рабочей логики: спутниковый мониторинг выявил поле с резким снижением NDVI в северной части. БПЛА-съёмка показала, что проблема локализована вдоль понижения рельефа и сопровождается повышенной температурой растительного покрова. Наземный осмотр выявил уплотнение почвы и дефицит влаги. После этого агроном принимает решение: изменить режим орошения, провести рыхление в будущем сезоне или скорректировать нормы внесения удобрений по зонам.

Уровни достоверности

Уровень	Источник	Достоверность вывода
Индикатор	спутниковый индекс	показывает зону отклонения
Уточнение	БПЛА-съёмка	показывает пространственную структуру проблемы
Подтверждение	полевой осмотр и пробы	устанавливает причину
Решение	агрономическая карта предписаний	формирует действие и норму воздействия

Интеграция данных особенно важна при создании карт дифференцированного внесения удобрений. Ошибочно повышать норму азота во всех зонах с низким NDVI: там может быть не дефицит питания, а плохие всходы, переувлажнение или почвенная проблема. В таких случаях дополнительные удобрения не решат проблему и могут увеличить затраты.

Диагностика стрессовых факторов

Стресс растений бывает биотическим и абиотическим. Биотические факторы включают болезни, вредителей и сорняки. Абиотические факторы включают засуху, переувлажнение, засоление, недостаток или избыток элементов питания, температурные экстремумы, повреждение гербицидами, переуплотнение почвы и эрозию. Дистанционные методы часто фиксируют не саму причину, а реакцию растения: снижение хлорофилла, уменьшение биомассы, изменение водного содержания или повышение температуры.

Признаки стрессов

Стресс	Возможный дистанционный признак	Рекомендуемый индекс/данные	Необходимая проверка
Дефицит азота	снижение хлорофилла, бледность листьев	NDRE, GNDVI, red edge	листовая диагностика, анализ почвы
Водный стресс	повышение температуры кроны, снижение влаги	тепловые данные, NDWI, MSI	влажность почвы, состояние орошения
Болезни	пятнистость, очаговое снижение индексов	RGB, NDVI, гиперспектр	осмотр растений, лабораторная диагностика
Сорняки	аномальная зелёность в междурядьях	RGB, объектный анализ	полевой осмотр, видовой состав
Переуплотнение	устойчивые полосы низкой продуктивности	NDVI временной ряд, рельеф	пенетрометрия, карта техники

Для раннего выявления стресса важны red edge и тепловые данные. Red edge чувствителен к изменениям хлорофилла, а температура кроны отражает водный режим. Однако ни один индекс не даёт стопроцентной диагностики. Например, низкий NDRE может быть связан не только с нехваткой азота, но и с холодом, повреждением корневой системы или болезнями.

Очаговый и системный стресс

Очаговый стресс проявляется пятнами, полосами или локальными зонами. Системный стресс охватывает всё поле и часто связан с погодой, общей технологией или сортовыми особенностями. Разделение этих типов помогает выбирать стратегию: локальная обработка, изменение нормы внесения, обследование техники или пересмотр технологии на следующий сезон.

Практические решения: удобрения, орошение и защита растений

Главная ценность мониторинга – поддержка управленческих решений. Данные БПЛА и спутников применяются для планирования дифференцированного внесения удобрений, контроля орошения, выявления сорняков, оценки повреждений и планирования уборки. При этом цифровая карта должна быть связана с техникой, экономикой и агрономическими регламентами.

Дифференцированное внесение удобрений

Карты NDVI и NDRE помогают выделить зоны высокой, средней и низкой продуктивности. На продуктивных зонах может быть целесообразно поддерживать потенциал урожая, а на проблемных – сначала установить причину ограничения. Для азотных подкормок особенно полезны red edge-индексы, так как они менее быстро насыщаются при развитой биомассе, чем NDVI.

Орошение

Водный стресс можно отслеживать по тепловым данным, NDWI, MSI и динамике вегетационных индексов. При дефиците воды температура кроны повышается, а индекс водного содержания снижается. В орошаемых системах БПЛА помогают обнаруживать неисправные форсунки, засорённые участки, неравномерность полива и зоны переувлажнения.

Защита растений

RGB- и мультиспектральные данные позволяют локализовать очаги болезней, сорняков и повреждений вредителями. Однако дистанционная диагностика болезней требует осторожности, так как разные причины могут давать похожую спектральную реакцию. Поэтому карты используют для маршрутизации обследования: агроном идёт не случайно по полю, а в зоны максимального отклонения.

Контроль эффективности мероприятий

После внесения удобрений, обработки средствами защиты растений или изменения режима полива повторная съёмка позволяет оценить эффект. Если индекс и визуальное состояние улучшаются в обработанной зоне, мероприятие считается результативным. Если изменений нет, необходимо пересмотреть диагноз.

Прогнозирование урожайности и оценка продуктивности

Прогноз урожайности – одна из наиболее сложных задач дистанционного мониторинга. Он зависит от культуры, сорта, погоды, почвы, агротехники, болезней и сроков уборки. Вегетационные индексы обычно используют как входные признаки модели, но для точного прогноза их объединяют с метеоданными, картами почв, рельефом, историей поля, нормами удобрений и фактической урожайностью прошлых лет.

Подходы к прогнозу

15. Эмпирические модели: регрессия между индексами и урожайностью по историческим данным хозяйства.
16. Фенологические модели: анализ формы временного ряда NDVI/NDRE и дат ключевых фаз.
17. Машинное обучение: random forest, gradient boosting, нейронные сети с использованием спектральных, погодных и почвенных признаков.
18. Гибридные модели: совмещение биофизических моделей роста растений и данных дистанционного зондирования.

Обзор Sentinel-2 для точного земледелия показывает, что эта платформа применяется для классификации культур, оценки стрессов, водных потребностей, азотного статуса и урожайности; при этом открытая доступность данных расширяет возможности применения в хозяйствах и исследовательских организациях [5].

Карта урожайности как инструмент валидации

Если комбайн оснащён датчиком урожайности, его данные можно сопоставлять с картами индексов. Это позволяет понять, какие зоны действительно дают стабильный урожай, а какие регулярно ограничивают продуктивность. Наиболее ценной является не карта одного года, а многолетняя карта стабильности: зоны высокой, средней, нестабильной и низкой продуктивности.

Ограничения прогноза

Высокий NDVI в середине сезона не всегда означает высокий урожай. Избыточная вегетативная масса может привести к полеганию, а поздний стресс может снизить налив зерна. Поэтому прогноз должен обновляться в течение сезона и учитывать критические фазы культуры.

Программные инструменты и организация работ

Для работы со спутниковыми данными применяют QGIS, SNAP, Google Earth Engine, Copernicus Data Space, Sentinel Hub, NASA Earthdata, ArcGIS и специализированные агроплатформы. Для обработки БПЛА-изображений используют фотограмметрические программы, формирующие ортофотопланы и облака точек. Для анализа данных применяют Python, R, геоинформационные системы и облачные сервисы.

Минимальная цифровая инфраструктура хозяйства

- цифровые границы полей с правильной системой координат;
- журнал агротехнических операций: посев, обработка, удобрения, полив, уборка;
- архив спутниковых снимков и индексов по каждому полю;
- результаты БПЛА-съёмки с метаданными;
- полевые наблюдения, фотографии, пробы почвы и растений;
- карты урожайности или хотя бы фактическая урожайность по полям.

Качество данных

Качество анализа определяется качеством исходных данных. Для спутников критичны облачность, тени и смешанные пиксели. Для БПЛА – радиометрическая калибровка, стабильность освещения, перекрытие снимков, геопривязка и высота полёта. Для полевых данных – репрезентативность проб и правильная привязка к координатам.

Организация мониторинга в сезоне

Период	Частота мониторинга	Основная задача
Ранний сезон	1 раз в 7–10 дней	контроль всходов и проблемных зон
Активный рост	1 раз в 5–7 дней при наличии данных	азот, водный стресс, болезни
Перед уборкой	1–2 раза в период созревания	полегание, неоднородность, план уборки
После уборки	1 анализ за сезон	сравнение с урожайностью и планирование зон управления

Ограничения, безопасность и выводы

Дистанционное зондирование не является универсальной заменой агрономической экспертизе. Его задача – увеличить скорость, объективность и пространственную детализацию наблюдений. Наиболее надёжные выводы получаются при сочетании спутников, БПЛА и наземных измерений. При работе с БПЛА необходимо соблюдать правила полётов, требования безопасности, защиту персональных данных и ограничения вблизи населённых пунктов, дорог, аэродромов и объектов инфраструктуры.

Ключевые выводы

19. Спутниковые данные эффективны для регулярного мониторинга больших территорий, анализа динамики и выявления полей с отклонениями.
20. БПЛА обеспечивают высокую детализацию и позволяют уточнять причины неоднородности внутри поля.
21. Вегетационные индексы являются индикаторами состояния растений, но не заменяют полевую диагностику.
22. Временные ряды ценнее одиночных снимков, так как показывают развитие проблемы во времени.
23. Лучший практический результат даёт интеграция данных: спутник – БПЛА – поле – агрономическое решение – контроль результата.

Контрольные вопросы

24. Чем отличается спутниковый мониторинг от мониторинга с БПЛА?
25. Почему NDVI может быть недостаточным для оценки азотного статуса в поздние фазы развития?
26. Какие причины могут привести к низкому NDVI на участке поля?
27. Почему для диагностики стресса необходима наземная валидация?
28. Как построить технологическую цепочку от снимка к карте дифференцированного внесения?

Рекомендуемые источники

1. Copernicus. Sentinel-2 for Agriculture. Указаны возможности Sentinel-2 для сельскохозяйственного мониторинга: разрешение 10–20 м, 5-дневная повторяемость, глобальное покрытие.
2. NASA Scientific Visualization Studio. Landsat and Sentinel NDVI, 2022. Описание проекта Harmonized Landsat and Sentinel-2 и особенностей временной периодичности наблюдений.
3. NASA Earthdata. The Harmonized Landsat Sentinel-2 Project Releases Vegetation Indices, 2025. Описание продуктов HLS с наборами вегетационных индексов.
4. European Space Agency. Sentinel-2: Plant health. Описание 13 спектральных каналов, red edge-диапазона и применения для оценки роста, хлорофилла и водного содержания растений.
5. Segarra, J.; Buchailot, M.L.; Araus, J.L.; Kefauver, S.C. Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy* 2020, 10, 641. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>.

6. FAO. International workshop on unmanned vehicles and their utilization in modern agriculture, 2025. Материалы о применении БПЛА, автономных систем, ИИ и спутниковых индексов в сельском хозяйстве.
7. FAO Digital Agriculture Innovation Hubs. Drones training for FAO Libya, 2024. Пример обучения применению дронов в сельском хозяйстве и управлении водными ресурсами.
8. Sentinel Hub. Agriculture. Сведения о применении Sentinel-2 для агромониторинга, включая 12 каналов, разрешение 10–20 м и 5-дневную повторяемость.
9. Liu, P.; Zhuang, R. Remote Sensing Agent: Reshaping the Paradigm of Remote Sensing Information Processing. *Remote Sens.* **2026**, *18*, 1980. <https://doi.org/10.3390/rs18121980>
10. Shi, B.; Liu, Y.; Zhang, Y.; Cao, G. Class-Aware Semantic Calibration for Cross-Scene Hyperspectral Image Classification. *Remote Sens.* **2026**, *18*, 1976. <https://doi.org/10.3390/rs18121976>