

МЕЛИОРАЦИЯ И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО

УДК 528.85

МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Е. С. КУРЗЕНКОВ, М. С. КУРЗЕНКОВ

Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие
«Геоинформационные системы» НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь, 220012, e-mail: YKurziankou@gis.by; MKurziankou@gis.by

(Поступила в редакцию 20.03.2026)

Мелиоративный комплекс Республики Беларусь имеет стратегическое значение для сельскохозяйственного производства. Эксплуатируется более 2,9 млн га мелиорированных земель, включающих разветвленную сеть открытых каналов, закрытого дренажа и гидротехнических сооружений [1]. Эффективность использования этих земель напрямую зависит от технического состояния мелиоративных сетей. Несвоевременное выявление заиления русел каналов, разрушения креплений откосов, зарастания древесно-кустарниковой растительностью или нарушения работы гидротехнических сооружений ведет к подтоплению сельхозугодий, потере плодородия почв и значительному экономическому ущербу.

В статье рассматриваются современные подходы к мониторингу мелиоративных систем на основе использования данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных систем. Особое внимание уделяется проблеме эффективной эксплуатации осушительных и осушительно-увлажнительных сетей на территории Республики Беларусь. Анализируются возможности мультиспектральной спутниковой съемки для выявления деградации земель, подтоплений, оценки работоспособности гидротехнических сооружений и мероприятий, проводимых на них. Обосновывается необходимость интеграции данных дистанционного зондирования Земли в отраслевые геоинформационные системы для повышения достоверности оценки состояния мелиоративных сетей и сокращения затрат на полевые обследования. Обосновывается необходимость перехода к проактивному управлению мелиоративным фондом на основе регулярно обновляемых пространственных данных.

Ключевые слова: мелиорация, состояние мелиоративных систем, дистанционное зондирование Земли, ГИС-технологии, мониторинг земель, вегетационные индексы, автоматизированный учет.

The reclamation complex of the Republic of Belarus is of strategic importance for agricultural production. More than 2.9 million hectares of reclaimed land are exploited, including an extensive network of open canals, closed drainage, and hydraulic structures. The efficient use of these lands directly depends on the technical condition of the reclamation networks. Failure to promptly detect siltation of canal beds, destruction of slope supports, overgrowth of trees and shrubs, or disruption of hydraulic structures leads to flooding of farmland, loss of soil fertility, and significant economic damage.

This article examines modern approaches to monitoring drainage systems using remote sensing data and geographic information systems. Particular attention is paid to the efficient operation of drainage and drainage-wetting networks in the Republic of Belarus. The potential of multispectral satellite imagery for identifying land degradation and flooding, and assessing the performance of hydraulic structures and the measures taken on them is analyzed. The need to integrate remote sensing data into industry-specific geographic information systems is substantiated to improve the reliability of drainage network condition assessments and reduce field survey costs. A transition to proactive drainage fund management based on regularly updated spatial data is also substantiated.

Key words: land reclamation, drainage system condition, remote sensing, GIS technologies, land monitoring, vegetation indices, automated accounting.

Введение

Традиционные методы наземного обследования мелиоративных систем являются трудоемкими, дорогостоящими и не всегда позволяют оперативно получить полную картину состояния объекта на большой площади. Совершенствование методов мониторинга земель в направлении повышения оперативности получения результатов и обеспечения их визуализации, а также применение современных методов анализа и обработки мониторинговых данных является важным направлением исследований. Ускорить получение информации о состоянии мелиорированных земель возможно посредством комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и функциональных возможностей геоинформационных систем (ГИС) [2]. Данный подход позволит регулярно получать объективную информацию о состоянии мелиоративных сетей и прилегающих территорий.

Целью настоящей работы является разработка и обоснование комплексной методики мониторинга

и оценки технического состояния мелиоративных систем (осушительных и осушительно-увлажнительных сетей) на основе интеграции данных ДЗЗ и ГИС-технологий.

Научная новизна работы заключается в разработке алгоритма выявления изменений мелиоративных сетей на основе гармонического анализа временных рядов NDVI; интеграции спутниковых данных Sentinel-2 и БПЛА в единую ГИС-модель мониторинга; количественной оценке эффективности выявления изменений на основе отклонений от сезонной модели.

Основная часть

Дистанционное зондирование предоставляет уникальные возможности для оценки состояния мелиоративных систем. Дистанционные методы мониторинга включают в себя систему наблюдения с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), спутников и спутниковых систем, а также систему обработки данных ДЗЗ [3–5]. Использование космических снимков высокого и среднего разрешения (Landsat, Sentinel-2, SPOT) позволяет решать широкий круг задач. Наиболее информативными являются мультиспектральные снимки, регистрирующие отражение в видимом, ближнем инфракрасном (NIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах.

Для оценки состояния мелиорированных земель можно использовать вегетационные индексы NDVI, NDWI, MSAVI2. Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) позволяет выявить участки угнетенной растительности. Индекс NDWI (Normalized Difference Water Index) чувствителен к содержанию влаги в растительности и почве, что делает его незаменимым инструментом для картирования зон подтопления вдоль осушительных каналов.

Применение методов автоматизированной классификации снимков дает возможность в полуавтоматическом режиме обновлять карты мелиоративной сети и выявлять изменения, произошедшие за период между обследованиями.

ГИС выполняет роль интеграционной платформы, объединяющей данные ДЗЗ, данные БПЛА, результаты полевых обследований и вспомогательную информацию. Современная ГИС мелиоративной сети должна включать в себя:

1. Цифровую модель рельефа (ЦМР) территории для гидрологического анализа.
2. Векторные слои элементов мелиоративной сети (каналы, дрена, дороги, гидротехнические сооружения) с атрибутивной информацией.
3. Базу данных паспортов мелиоративных систем и сооружений.
4. Архив разновременных космических и аэрофотоснимков.

Ярким примером успешной реализации ГИС-подхода в Беларуси является автоматизированная система государственного учета мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений «ГИСМЕЛИО ГОСУЧЕТ», разработанная Институтом мелиорации. Система, функционирующая на базе ГИС-технологий, обеспечивает формирование паспортов, ведомостей и реестров утвержденной формы на районном, областном и республиканском уровнях. Важной особенностью системы является возможность геопривязки мелиоративных систем и их элементов на электронной карте с использованием планов, схем, материалов инвентаризации и актуальных спутниковых снимков [1].

На основе проанализированного опыта по данной тематике, можно предложить комплексную методику мониторинга состояния мелиоративных сетей с применением данных ДЗЗ и ГИС-технологий, которая включает несколько этапов.

На предварительном этапе осуществляется сбор и анализ имеющихся материалов: проектной документации, растровых карт, ведомостей дефектов. Проводится создание или актуализация цифровой основы мелиоративной сети в ГИС.

Второй этап предполагает подбор и предварительную обработку данных ДЗЗ. Для оперативного мониторинга целесообразно использовать находящиеся в общем доступе данные спутников Sentinel-2 с разрешением 10 м. Для детального анализа состояния гидротехнических сооружений и русел каналов необходимы снимки сверхвысокого разрешения, такие как WorldView, GeoEye или данные Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли (БКА, Канопус-В).

Третий этап – дешифрирование и интерпретация данных. С использованием методов визуального и автоматизированного дешифрирования выявляются:

1. Участки переувлажнения вдоль каналов (по снижению значений NDVI и повышению значений NDWI в сравнении со средними показателями по массиву).
2. Зарастание русел каналов древесно-кустарниковой растительностью (по текстурным признакам и значениям NDVI, характерным для многолетней растительности).
3. Состояние гидротехнических сооружений (по прямым признакам на снимках сверхвысокого разрешения).
4. Нарушения пахотных земель (водная эрозия, размывы).

Четвертый этап включает полевую верификацию результатов. Выявленные по снимкам проблемные участки подлежат выборочной проверке наземными методами с использованием GPS-приемников для точной привязки дефектов либо с использованием БПЛА для картирования точных границ объектов. Данные полевых наблюдений и полученные с помощью БПЛА ортофотопланы или панорамные снимки вносятся в ГИС и используются для уточнения алгоритмов дешифрирования.

Заключительный этап – оценка состояния и подготовка отчетной документации. На основе интегрированного анализа всех данных формируются карты состояния мелиоративной сети, ведомости дефектов и рекомендации по проведению ремонтно-эксплуатационных работ. Использование ГИС позволяет автоматически рассчитывать площади и протяженности участков, требующих вмешательства.

Экономическая эффективность внедрения технологий ДЗЗ и ГИС в практику эксплуатации мелиоративных систем обусловлена несколькими факторами. Во-первых, сокращаются затраты на проведение полевых обследований. Спутниковые данные позволяют обследовать до 100 % площади мелиоративного объекта, выделяя лишь 10-15% территории для детального наземного осмотра. Во-вторых, повышается оперативность получения информации: периодичность обновления спутниковых данных Sentinel-2 2-3 дня, что позволяет вести мониторинг в режиме, близком к реальному времени. В-третьих, обеспечивается объективный и документальный контроль.

Платформа Google Earth Engine хранит данные и предлагает свои вычислительные мощности для обработки – пользователи могут получить доступ к десяткам или сотням изображений, упорядоченных по времени, и количественно оценить изменения за десятилетия. Благодаря возможностям вычислительной статистики можно построить прогнозную модель для временных рядов индекса NDVI. Моделирование временных рядов направлено на построение объяснительной модели данных без переобучения набора задач – использовать как можно более простую модель, учитывающую при этом как можно больше данных. Почти неизбежно удаление не валидных пикселей, что приводит к удалению значительной части спутниковой съемки. Также необходимо учитывать атмосферные условия, которые могут исказить визуальные результаты, поскольку оттенок растительности резко меняется от изображения к изображению из-за атмосферных условий (туман, влажность почвы, облачность).

В качестве анализируемого сигнала временного ряда используется нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI, принимающий значения в диапазоне $[-1; 1]$ Для растительности, находящейся в удовлетворительном состоянии, характерны положительные значения индекса, как правило, в интервале 0,2 – 0,8.

Метод выявления изменений основан на аппроксимации сезонной динамики NDVI гармонической моделью и последующем анализе отклонений фактических значений от модельных. В качестве аппроксимирующей функции используется первая гармоника тригонометрического ряда:

$$NDVI = a_1 + a_2 \cos(2\pi t) + a_3 \sin(2\pi t), \quad (1)$$

где a_1, a_2, a_3 – параметры модели, оцениваемые по данным наблюдений; $t \in [0; 1]$ – нормированное время, соответствующее доле года (десятичный год).

Оценка параметров модели выполняется для каждого пикселя на основе временного ряда спутниковых наблюдений. В качестве исходных данных используются мультиспектральные снимки спутников Sentinel-2 за период с 2016 по 2025 гг., обрабатываемые в среде облачных вычислений Google Earth Engine.

Алгоритм обработки включает следующие этапы: формирование временного ряда NDVI для каждого пикселя; введение временной переменной t , нормированной на интервал $[0; 1]$, для учета сезонности; построение регрессионной модели вида (1), где в качестве независимых переменных используются функции $\{1, \cos(2\pi t), \sin(2\pi t)\}$ а зависимой переменной – значение NDVI; определение коэффициентов a_1, a_2, a_3 для каждого пикселя с использованием метода наименьших квадратов; формирование пространственных слоев коэффициентов модели, характеризующих средний уровень и сезонную вариабельность индекса.

Полученная модель задает сглаженную («теоретическую») сезонную кривую NDVI, позволяющую вычислить ожидаемое значение индекса для произвольного момента времени ($NDVI_T(t)$). Выявление изменений осуществляется на основе анализа отклонений фактических значений ($NDVI_F(t)$) от модельных ($NDVI_T(t)$):

$$\Delta NDVI(t) = NDVI_F(t) - NDVI_T(t). \quad (2)$$

Существенные отклонения $\Delta NDVI(t)$, превышающие заданный порог, интерпретируются как индикаторы изменений состояния растительного покрова и, соответственно, возможных нарушений функционирования мелиоративной системы. Предложенный подход обеспечивает переход от качественной интерпретации спутниковых данных к количественному анализу временных рядов и позволяет автоматизировать процедуру мониторинга на больших территориях и дает возможность оперативно отслеживать изменения состояния мелиоративных сетей.

В рамках мониторинга угроз природных экосистем Государственного природоохранного учреждения «Национальный парк «Нарочанский» (ГТТУ «НП «Нарочанский») на основе представленного алгоритма в 2023 году были выявлены мероприятия по очистке и восстановлению мелиоративных сетей. В районе д. Шеметово мероприятия по очистке мелиоративных сетей впервые были зарегистрированы 07.07.2023 по данным спутниковой съемки Sentinel-2. На рис. 1 изображено сравнение мелиоративной сети на спутниковой подложке Imagery Hybrid до начала работ и на спутниковой RGB съемке Sentinel-2 после завершения работ.



Рис. 1. Спутниковые изображения до начала работ и после начала работ в районе д. Шеметово

При первоначальном обнаружении были проведены полевые обследования в районе д. Шеметово, представленные на рис. 2 для валидации выявленных объектов.



Рис. 2. Полевые обследования в районе д. Шеметово после первичного обнаружения

На рис. 3 отображены результаты очистки мелиоративных сетей от древесно-кустарниковой растительности (красные вектора) в районе д. Шеметово, выявленные на основе обработки данных ДЗЗ и валидированные съемкой с БПЛА (ортофотоплан). На рис. 4 отображен период проведения работ по очистке мелиоративной сети в районе д. Шеметово. По данным графика пик вегетации в 2022 году равен 0,614, а после проведения мероприятий пик вегетации в 2024 году снизился до 0,516. Изменение пикового значения NDVI на 0,098 в данном районе говорит об очистке мелиоративной системы от древесно-кустарниковой растительности, но разница не является настолько существенной ввиду возвращения в сельхоз оборот неиспользуемого участка в левом нижнем углу рис. 3.



Рис. 3. Результаты работы алгоритма и валидированные участки при помощи БПЛА в районе д. Шеметово

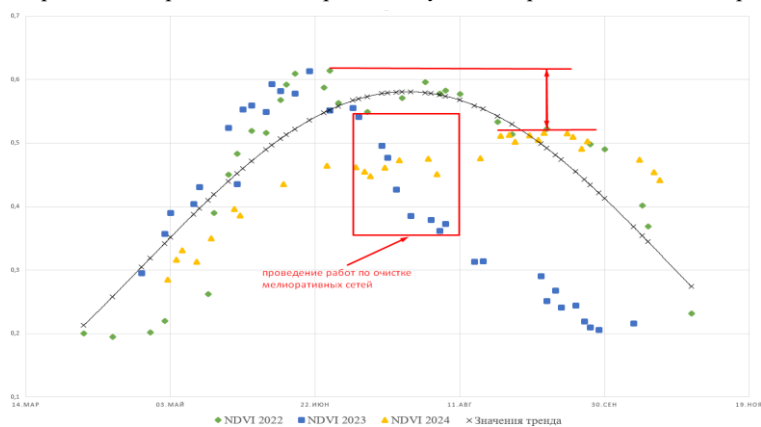


Рис. 4. График распределения индекса NDVI за 2022, 2023 и 2024 годы в районе д. Шеметово

В районе д. Балаши мероприятия по очистке мелиоративных сетей впервые были зарегистрированы 07.07.2023 по данным спутниковой съемки Sentinel-2. На рис. 5 изображена мелиоративная сеть на спутниковой подложке Imagery Hybrid и панорамном снимке с БПЛА до начала работ. На рис. 6 отображены результаты очистки мелиоративных сетей от древесно-кустарниковой растительности (красные вектора) в районе д. Балаши, выявленные на основе обработки данных ДЗЗ и валидированные съемкой с БПЛА (ортофотоплан). На рис. 7 отображен период проведения работ по очистке мелиоративной сети в районе д. Балаши. По данным графика пик вегетации в 2022 г. равен 0,616, а после проведения мероприятий пик вегетации в 2024 г. снизился до 0,395. Существенное изменение пикового значения NDVI на 0,221 в данном районе объясняется полной вырубкой древесно-кустарниковой растительности вдоль мелиоративных каналов на этих участках.



Рис. 5. Спутниковые изображения до начала работ и после начала работ в районе д. Балаши



Рис. 6. Результаты работы алгоритма и валидированные участки при помощи БПЛА в районе д. Балаши

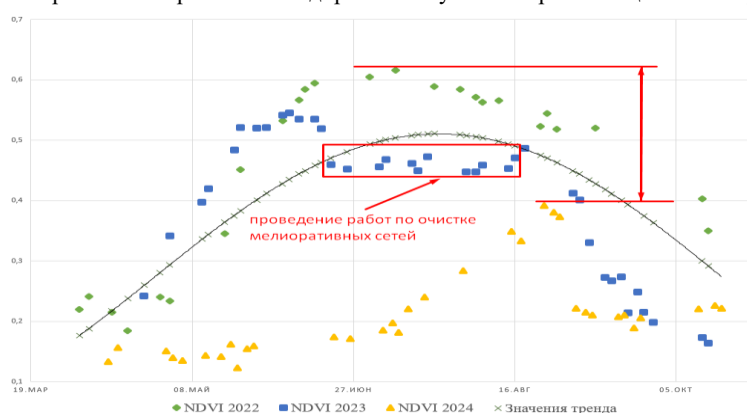


Рис. 7. График распределения индекса NDVI за 2022, 2023 и 2024 годы в районе д. Балаши

Несмотря на очевидные преимущества, широкому внедрению технологий ДЗЗ и ГИС в практику мелиоративного мониторинга препятствует ряд факторов. Основным является недостаточная обеспеченность эксплуатационных организаций современными программно-аппаратными средствами и квалифицированными кадрами. Кроме того, существующая нормативная база не в полной мере регламентирует порядок использования данных ДЗЗ при проведении обследований и паспортизации мелиоративных систем. Перспективным направлением развития является создание единой республиканской геоинформационной системы мелиоративного комплекса, интегрирующей данные всех уровней. Важным шагом в этом направлении станет развитие веб-сервисов, обеспечивающих доступ к геоданным для всех заинтересованных организаций. Разработка автоматизированных методов дешифрирования на основе алгоритмов машинного обучения позволит перейти к созданию систем поддержки принятия решений, способных не только фиксировать текущее состояние, но и прогнозировать развитие негативных процессов.

Заключение

Применение данных ДЗЗ и ГИС-технологий является наиболее перспективным направлением совершенствования системы мониторинга мелиоративных сетей в Республике Беларусь. Интеграция разновременных спутниковых данных в геоинформационную среду обеспечивает объективность, оперативность и полноту информации о состоянии осушительных систем и гидротехнических сооружений. Дальнейшее развитие технологий, включая использование БПЛА и методов искусственного интеллекта, позволит вывести мелиоративный мониторинг на качественно новый уровень, обеспечив сохранность и эффективное использование ценных мелиорированных земель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированная система государственного учета мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений «ГИСМЕЛИО ГОСУЧЕТ» [Электронный ресурс] / Институт мелиорации. – URL: <https://www.ictt.by/rus/marketplace/rctt-network/view.php?proid=96183d83639d9bbdbb397bf878119c> (дата обращения: 05.03.2026).
2. Дуброва, Ю. Н. Геоморфометрический анализ рельефа территории Горьковского района с использованием данных дистанционного зондирования / Ю. Н. Дуброва, Т. Н. Мыслыва, Т. Н. Ткачева // Вестник БГСХА. – 2021. – №1. – С. 209–216.
3. Сутырина, Е. Н. Дистанционное зондирование земли: учебное пособие / Е. Н. Сутырина. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.
4. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: курс лекций: учебное пособие / А. М. Бондаренко, Б. Н. Строгий [и др.]. – Зерноград: Донской ГАУ, 2017. – 98 с.
5. Валидация оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS для редкостойных лесов Кольского полуострова с использованием материалов съемок беспилотных летательных аппаратов / Н. В. Михайлов, Д. Н. Тихонов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18, №2. – С. 156–170.