

2. **Ковшикова, Г. А.** Оптимизация бизнес-процессов в системе логистического управления промышленного предприятия / Г. А. Ковшикова, А. В. Кошелева // Друкер. вестн. – 2022. – № 6. – С. 144–122.

3. **Амбражей, А. Н.** Введение в бизнес-процессы в SAP ERP. Основы интеграции бизнес-процессов в SAP ERP : учеб. пособие / А. Н. Амбражей, Н. М. Головин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 233 с.

4. **Бабенко, И. В.** Интегрированное управление запасами в современной цифровой среде / И. В. Бабенко, Н. Г. Плетнева // Изв. Юго-Запад. ун-та. Сер. Экономика. Социология. Менеджмент. – 2020. – № 10 (4). – С. 87–100.

УДК 630:004

В. В. Копытков (kopvo@mail.ru),

д-р с.-х. наук, профессор

Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина, Институт леса НАН Беларуси г. Гомель, Республика Беларусь

А. П. Гусев (gusev@gsu.by),

канд. геолого-минерал. наук, доцент

Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины г. Гомель, Республика Беларусь

Л. П. Авдашкова (avdashkova@mail.ru),

канд. физ.-мат. наук, доцент

Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации г. Гомель, Республика Беларусь

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В ЗОНЕ ПЕРВООЧЕРЕДНОГО ОТСЕЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Представлены результаты исследования состояния лесных культур и биологической устойчивости, созданных аэросевом, автосевом и посадкой сеянцами сосны обыкновенной на землях бывшего сельхозпользования. Для оценки состояния лесных культур определены средние значения вегетационных индексов (NDVI, NBR, SWVI) и их динамика по данным съемки спутников Landsat 8-9 и Sentinel-2. Установлено достоверное увеличение средних значений NDVI, обусловленное развитием древесных насаждений.

The results of a study of the state of forest crops and biological stability created by aerial sowing, automatic sowing and planting of Scots pine seedlings on former agricultural lands are presented. To assess the state of forest crops, the average values of vegetation indices (NDVI, NBR, SWVI) and their dynamics were determined according to Landsat 8-9 and Sentinel-2 satellite survey data. A significant increase in average NDVI values was established, due to the development of tree plantations.

Ключевые слова: оценка состояния; биологическая устойчивость; лесные культуры; космическая съемка; вегетационные индексы.

Key words: condition assessment; biological stability; forest crops; space photography; vegetation indices.

Возрастающие требования к объему и качеству информации о состоянии лесов определяют необходимость усовершенствования методов и технологий лесного мониторинга. Спутниковые системы значительно расширяют возможности получения информации о лесных объектах. Особенно актуальным является использование спутниковых методов при изучении территорий с ограниченной доступностью для ведения наземных наблюдений, в том числе пострадавших в результате радиоактивного загрязнения, вызванного аварией на Чернобыльской атомной электростанции.

Для оценки состояния лесных культур широко используются данные многозональной космической съемки. Наиболее изученный и широко используемый вегетационный индекс – NDVI вычисляется по соотношению коэффициентов отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра [1].

В работе использованы результаты съемки со спутников Sentinel-2 и Landsat 8-9. Пространственное разрешение съемки Sentinel-2 в зависимости от канала – 10–60 м, Landsat 8-9 – 15–30 м. Данные спутниковой съемки находятся в свободном доступе на Copernicus Open Access Hub и портале Геологической службы США (earthexplorer.usgs.gov). Использованы снимки спутников Sentinel-2 и Landsat 8-9 (таблица 1). Атмосферная коррекция и привязка снимков к единой системе координат, расчет вегетационных индексов выполнены в QGIS 3.6. Для атмосферной коррекции снимков использовался модуль Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) для QGIS.

Таблица 1 – Используемые в работе космические снимки

Дата	Идентификатор	Спутник	Уровень обработки
19.08.2019	S2B_MSIL1C_20190819T090559_N0208_R050_T35UQU_20190819T115951	Sentinel-2	L1C
11.07.2020	S2B_MSIL1C_20200711T085559_N0209_R007_T36UUD_20200711T111418	Sentinel-2	L1C
18.07.2021	LC08_L1TP_182023_20210718_20210729_02_T1	Landsat-8	L1TP
20.06.2022	LC09_L1TP_181023_20220620_20220621_02_T1	Landsat-9	L1TP

Для изучения многолетней динамики NDVI использовались данные съемки радиоспектрометра MODIS спутника Terra (продукт MOD13Q1). Эти данные с пространственным разрешением 250 м скомпонованы из максимальных значений NDVI за 16 суток. Для устранения влияния сезонной изменчивости NDVI нами использовались данные только летнего сезона [2].

Зависимость состояния лесных культур от метода их создания представлена на нижеприведенном рисунке.



Как видно из рисунка, доля деревьев без видимых повреждений находится в пределах от 81% в варианте 2 (автосев семян сосны обыкновенной) до 92% в варианте 3 (посадка сеянцами сосны обыкновенной).

По результатам полевых исследований оценки биологической устойчивости насаждений установлено, что в 128-м квартале при создании лесных культур аэросевом 83% растений относится 1-му классу биологической устойчивости, 9% – ко 2-му классу и 8% – к 3-му классу. В 100-м квартале при создании лесных культур автосевом 81% растений относится к 1-му классу биологической устойчивости, 10% – ко 2-му классу и остальные – к 3-му классу. В 87-м квартале при создании лесных культур посадкой однолетними сеянцами сосны обыкновенной 92% растений были отнесены к 1-му классу биологической устойчивости, 6% – ко 2-му классу и 2% – к 3-му классу биологической устойчивости насаждений.

Определены средние значения вегетационных индексов и их динамика в 2019–2022 гг. по данным съемки спутников Landsat 8-9 и Sentinel-2 (пространственное разрешение 30 и 10 м со-

ответственно). Сенсоры спутников семейств Sentinel-2 и Landsat 8-9 имеют близкие характеристики. Так, исследования по сравнению Sentinel-2 и Landsat 8 для определения различных характеристик земной поверхности, в том числе вегетационных индексов, показывают высокую степень схожести результатов. Поэтому использование этих двух съемочных систем для изучения динамики NDVI вполне допустимо.

Установлено, что значения NDVI изменялись на объекте № 1 с 0,791 до 0,842, на объекте № 2 – с 0,803 до 0,843, на объекте № 3 – с 0,747 до 0,791. Минимум NDVI наблюдался в 2021 г. (на объектах № 1 и № 2) и в 2020 г. (на объекте № 3). Максимальные значения NDVI на объекте № 1 составляли от 0,820 до 0,900, на объекте № 2 – от 0,861 до 0,903, на объекте № 3 – от 0,842 до 0,889. Значения вегетационных индексов определяются рядом факторов: возрастом насаждений, который обуславливает величину запаса зеленой фитомассы жизненным состоянием насаждений; колебаниями метеорологических условий.

Величина индекса NBR на объекте № 1 колебалась в пределах от 0,640 до 0,701, на объекте № 2 – от 0,665 до 0,729, на объекте № 3 – от 0,590 до 0,715. Минимальные значения этого индекса имели место в 2020 г., максимальные – в 2021 г. Предположительно, что динамика и различия в величине NBR на объектах определяются колебаниями соотношения покрытия травянистой и древесной растительности.

Средние значения индекса SWVI составляли на объекте № 1 от 0,334 до 0,446, на объекте № 2 – от 0,368 до 0,468, на объекте № 3 – от 0,297 до 0,458. Данный индекс зависит как от жизненного состояния насаждений, так и от метеорологических условий в период съемки, обуславливающих влажность отражающей поверхности. Поэтому для него характерны наибольшие колебания во времени (на это указывает величина стандартного отклонения, возрастающая до 0,069–0,072 в зависимости от объекта).

Рассматриваемые объекты отличаются по средним, минимальным и максимальным значениям указанных индексов. Разницей в возрасте насаждения объясняются различия между лесными культурами объектов № 1 и № 2 (возраст 27 лет) и объекта № 3 (17 лет). Так, в 2022 г. средние значения NDVI на объектах № 1 и № 2 составляли 0,842 и 0,843 соответственно, а на объекте № 3 – 0,791. Средние значения NBR на объектах № 1 и № 2 составляли 0,690 и 0,691 соответственно, а на объекте № 3 – 0,617. Средние значения SWVI на объектах № 1 и № 2 составляли 0,420 и 0,429 соответственно, а на объекте № 3 – 0,351. Аналогичные различия характерны и для других лет.

Между объектами № 1 и № 2 по NDVI различия не достоверны. Разница в зависимости от года съемки составляет от 0,001 до 0,012 при величине стандартного отклонения 0,020–0,030. Более существенные различия прослеживаются по индексам NBR и SWVI. Средние значения NBR выше для опытного объекта № 2 (на 0,015 в 2020 г. и на 0,017 в 2019 г.). Минимальные значения также существенно выше: на 0,173 в 2020 г. и на 0,05 в 2019 г. Средние значения SWVI для опытного объекта № 2 выше на 0,034 в 2020 г. и на 0,029 в 2019 г. Минимальные значения существенно выше: на 0,128 в 2020 г. и на 0,056 в 2019 г.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом: опытные объекты № 1 и № 2 слабо различаются по величине запаса зеленой фитомассы, но отличаются по жизненному состоянию насаждений. Опытный объект № 2, который создан автосевом с использованием НРУ-0,5, характеризуется лучшим жизненным состоянием, по сравнению с опытным объектом № 1, который создан аэросевом с использованием вертолета МИ-2. На это указывают общий запас древесины и наличие биологически устойчивых растений. На опытном объекте № 2 общий запас древесины на 5 м³ больше по сравнению с опытным объектом № 1, и количество растений, относящихся к 1-му классу биологической устойчивости, тоже больше.

Многолетняя динамика NDVI опытных объектов была изучена по данным съемки сенсора MODIS спутника Тетта. Использование MODIS в данном случае преследует две основные цели: 1) контроль интерпретации снимков Landsat 8-9 и Sentinel-2 (подверженных влиянию метеорологических и выполненных в разные периоды вегетационного сезона); 2) анализ многолетнего тренда NDVI. Изучались усредненные за летний сезон значения NDVI и их изменения в 2000–2022 гг. Такой подход позволяет снизить воздействие на отражательные свойства растительного покрова как сезонных колебаний, так и метеорологических аномалий летнего периода. Установлено, что на всех трех изучаемых объектах наблюдается рост средних значений NDVI.

Опытный объект № 1 характеризуется увеличением значений NDVI с 0,498–0,582 (начало 2000-х) до 0,808–0,848 в 2020-х гг. NDVI опытного объекта № 2 в течение указанного периода увеличилось с 0,505–0,591 до 0,845–0,852. Опытный объект № 3 отличается более поздним созданием культур, поэтому в 2000–2004 гг. значения NDVI не превышали 0,5, что соответствует

значениям NDVI травянистой растительности. Время создания лесных культур посадкой сеянцами сосны обыкновенной и последующее развитие этих культур отражается в интенсивном росте значений NDVI с 0,432–0,502 до 0,761–0,773.

Статистический анализ позволил установить, что наблюдаемый рост средних за летний сезон значений NDVI может быть описан уравнениями линейного тренда (таблица 2).

Таблица 2 – Характеристики многолетних трендов, усредненных за летний период NDVI, лесных культур

Объекты	Уравнение тренда	Коэффициент детерминации r^2
№ 1	$NDVI = 0,012 2 \cdot t + 0,597$	0,760
№ 2	$NDVI = 0,012 3 \cdot t + 0,621$	0,744
№ 3	$NDVI = 0,016 7 \cdot t + 0,445$	0,914

Опытный объект № 1 характеризуется статистически достоверным временным трендом NDVI с коэффициентом тренда 0,012 2 (значение коэффициента детерминации – 0,76). Опытный объект № 2 характеризуется схожим характером изменений NDVI (коэффициент тренда 0,012 3, коэффициент детерминации – 0,744). Динамика NDVI опытного объекта № 3 также имеет статистически значимый линейный тренд, но отличается более высокими значениями коэффициента тренда (прирост значений 0,016 7 в год) и коэффициента детерминации (0,914). Исходя из полученных результатов, 74,4–91,4% изменений значений NDVI опытных объектов обусловлено фактором времени, т. е. с увеличением возраста соответственно увеличивается зеленая фитомасса древесных насаждений. Изменения NDVI обусловлено влиянием других факторов, среди которых погодные условия имеют первостепенное значение.

Для сравнения результатов исследований на биологическую устойчивость насаждений, полученных двумя методами создания лесных культур – посевом и посадкой, использован уровень значимости [3]. Чтобы уверенно судить о принятом статистическом решении, определяем доверительную вероятность (уровень надежности) равной $1 - \alpha = 0,95$. Определим граничные точки доверительных интервалов количества деревьев, полученных различными методами (таблица 3).

Таблица 3 – Доверительные интервалы количества деревьев по классам биологической устойчивости

Методы создания лесных культур	Доверительные интервалы количества деревьев по классам биологической устойчивости		
	Деревья без видимых ослаблений	Ослабленные деревья	Сухокронные деревья
Посев	$66,25 \pm 5,42$	$17,25 \pm 8,46$	$6,2 \pm 11,76$
Посадка	$58,87 \pm 22,78$	$7,63 \pm 5,01$	$11 \pm 7,69$

Воспользуемся параметрическим критерием для проверки гипотезы о равенстве генеральных средних (математических ожиданий) количества деревьев в зависимости от классов биологической устойчивости насаждений, полученных различными способами создания лесных культур. Критерий позволяет найти вероятность того, что оба средних значения количества деревьев определенных классов биологической устойчивости относятся к одной и той же совокупности. Если эта вероятность p ниже принятого уровня значимости ($p < 0,05$), то принято считать, что выборки относятся к двум разным совокупностям. Соответствующие вероятности приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Вероятность для определения различий между средними значениями количества деревьев в зависимости от класса биологической устойчивости в рамках метода создания лесных культур

Методы создания лесных культур	Сравнение деревьев по классам биологической устойчивости		
	1-й и 2-й	1-й и 3-й	2-й и 3-й
Посев	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	0,56
Посадка	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	0,98

Примечание – 1-й класс – деревья без видимых ослаблений, 2-й класс – ослабленные деревья, 3-й класс – сухокронные деревья.

Поскольку при обоих методах создания лесных культур для классов 1 и 2, 1 и 3 *p*-значения гораздо меньше уровня значимости, равного 0,05, то биологическая устойчивость 1-го класса деревьев достоверно отличается от 2-го и 3-го классов. *p*-значения, равные 0,56 и 0,98, больше 0,05, поэтому нет достоверного различия между биологической устойчивостью деревьев классов 2-го и 3-го, созданных как посевом семян, так и посадкой сеянцами лесных пород.

Определим вероятность различия между способами создания лесных культур: для деревьев без видимых ослаблений вероятность равна 0,71, для ослабленных деревьев – 0,055, для сухокронных деревьев – 0,76, что превышает значение уровня значимости 0,05 и свидетельствует об отсутствии достоверного различия количества деревьев каждого класса биологической устойчивости от способа создания лесных культур – посева семенами или посадки сеянцами.

Таким образом, при исследовании с использованием съемки спутников Sentinel-2 и Landsat 8-9 по величине вегетационных индексов прослеживаются различия между объектами, обусловленные не только возрастом насаждений, но и способом создания лесных культур. По индексу NDVI различия между одновозрастными опытными объектами № 1 и № 2, созданные автосевом и аэросевом семян сосны обыкновенной, статистически недостоверны, что может объясняться схожими величинами запаса фитомассы. Различия между данными объектами выявляются по таким индексам, как NBR и SWVI, которые более чувствительны к оценке состояния лесных культур. Установлено, что созданные лесные культуры автосевом характеризуются лучшим состоянием по сравнению с аэросевом.

Результаты космической съемки радиометра MODIS показали, что на изучаемых объектах имеет место поступательный рост NDVI, индицирующий рост фитомассы и продуктивности древесных насаждений во времени. Увеличение средних значений летних NDVI опытных объектов статически достоверно описывается уравнениями линейного тренда. При этом 74,4–91,4% изменений значений NDVI обусловлены фактором времени, так как с увеличением возраста растет зеленая фитомасса древесных насаждений.

Изучение эффективности создания лесных культур в зоне первоочередного отселения перспективно с использованием многозональной космической съемки, так как не требует значительных затрат для закладки пробных площадей.

Список использованной литературы

1. Данилова, И. В. Картографирование возрастных стадий лесной растительности на основе анализа разносезонных спутниковых изображений Landsat / И. В. Данилова, М. А. Корец, В. А. Рыжкова // Исследование Земли из космоса. – 2017. – № 4. – С. 12–24.

2. Таксационно-лесостроительный справочник / М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, Лесоустр. респ. унитар. предприятие «Белгослес» ; сост.: М. В. Кузьменков [и др.]. – Минск : Ред. журн. «Лесное и охотничье хозяйство», 2019. – 335 с.

3. Зайцев, Г. Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике / Г. Н. Зайцев. – М. : Наука, 1984. – 424 с.