

УДК 630*232.32

В. В. Копытков¹, А. П. Гусев²

¹Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры биологии и экологии, УО «Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина», заведующий сектором биорегуляции выращивания лесопосадочного материала, ГНУ «Институт леса НАН Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь

²Кандидат геолого-минералогических наук, декан геолого-географического факультета, доцент кафедры экологии, УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», г. Гомель, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР И БИОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НАСАЖДЕНИЙ В ЗОНЕ ПЕРВООЧЕРЕДНОГО ОТСЕЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

В статье рассмотрены результаты оценки состояния лесных культур, созданных аэросевом, автосевом и посадкой сеянцами сосны обыкновенной на территории бывших сельскохозяйственных земель. На основе съемки спутника Sentinel-2 рассчитаны вегетационные индексы (NDVI, NBR, SWVI), позволяющие оценить состояние лесных культур. По результатам многозональной съемки радиометра MODIS спутника Terra установлено, что на изучаемых объектах в 2000–2022 гг. наблюдается поступательный рост NDVI, который статистически достоверно описывается уравнениями линейного тренда.

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

Введение

Для мониторинга лесов во многих странах мира широко используются спутниковые методы. Решается ряд задач – картографирование, оценка состояния лесных культур, изучение повреждения лесов пожарами, вредителями, ветровалами, техногенными выбросами [1–6]. Установлены связи между спектральными свойствами лесных насаждений и их лесотаксационными показателями [7]. 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 АЭС. Многозональная космическая съемка среднего и высокого разрешения позволяет оценивать состояние лесных культур и тренды его динамики, а также контролировать развитие лесных культур на бывших сельскохозяйственных землях.

Целью работы являлось изучение состояния лесных культур и биологической устойчивости насаждений, созданных разными способами на бывших сельскохозяйственных землях в зоне первоочередного отселения на территории Ветковского спецлесхоза с помощью космической съемки.

Методы и методология исследования

Исследования проводились на территории Светиловичского лесничества Ветковского спецлесхоза, которое находится на юго-востоке Беларуси. Район исследований расположен на северной границе зоны широколиственно-лесных ландшафтов, для которой характерен умеренно-континентальный климат; средняя температура января составляет $-4,5^{\circ}\text{C}$, средняя температура июля $+19,8^{\circ}\text{C}$, среднегодовая температура $+7,4^{\circ}\text{C}$, годовая сумма температур выше 10° – более 2600°C ; годовое количество осадков $600\text{--}650$ мм.

Опытные объекты исследований представлены следующими лесными культурами:

объект № 1 – лесные культуры, созданные аэросевом (квартал 128, площадь – 42,2 га) с использованием вертолета МИ-2 Черниговского авиаотряда в 1991 г.;

объект № 2 – лесные культуры, созданные автосевом (квартал 100, площадь – 27,5 га) с использованием навесного разбрасывателя удобрений НРУ-0,5 в 1991 г.;

объект № 3 – лесные культуры, созданные в 2005 г. посадкой однолетними сеянцами сосны обыкновенной (квартал 87, площадь – 37,8 га).

Исследования состояния лесных культур в условиях радиоактивного загрязнения осуществляли путем закладки пробных площадей на опытных объектах. Пробные площади закладывали в местах,

характерных для всего опытного объекта лесных культур, они имеют форму прямоугольника, размером 30×20 м. Оценка состояния лесных культур проводилась в соответствии с имеющимися нормативными материалами [8].

Для оценки состояния лесных культур широко используются данные многозональной космической съемки, на основе которой рассчитываются вегетационные индексы. Наиболее изученный и широко используемый вегетационный индекс – NDVI – вычисляется по соотношению коэффициентов отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра (таблица 1).

Данный индекс имеет высокую степень корреляции с первичной продукцией и биомассой [1]. Часто расчет NDVI основан на серии разновременных снимков с заданным временным разрешением, что позволяет изучать как сезонную, так и многолетнюю динамику границ различных лесных культур. NDVI косвенно зависит от погодных и экологических характеристик ландшафтов – эвапотранспирации, количества осадков, характеристик снежного покрова, влажности почв и т. д.

Для оценки состояния растительности используются также коротковолновые (Short Wave) индексы NBR и SWVI [2; 3]. SWVI является индикатором стрессового состояния растительности и применяется для оценки усыхания и повреждения лесных насаждений под влиянием различных факторов [2]. NBR широко используется для оценки пирогенных повреждений лесной растительности [3].

Таблица 1 – Вегетационные индексы, используемые для изучения лесных культур

| Вегетационный индекс | Формула расчета на основе каналов спутника Sentinel-2 | Биофизический смысл |
|---|---|--|
| NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) | $(B08 - B04) / (B08 + B04)$ | Количественный показатель фотосинтетически активной биомассы [1] |
| NBR (Normalized Burn Ratio) | $(B08 - B12) / (B08 + B12)$ | Показатель пирогенных повреждений растительности [3] |
| SWVI (Short Wave Vegetation Index) | $(B08 - B11) / (B08 + B11)$ | Показатель содержания влаги и хлорофилла в зеленых фракциях растений [2] |

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-2a (11.08.2019, 11.07.2020) и Landsat 8–9 (17.07.2021, 20.06.2022). Атмосферная коррекция и привязка снимков, расчет вегетационных индексов выполнены в QGIS 3.6.

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.

При анализе предполагали, что тренд NDVI имеет линейный характер и описывается уравнением $y = b \times t - a$. Параметры уравнения тренда определяются методом наименьших квадратов. При этом коэффициент тренда b показывает среднее изменение величины NDVI при изменении t (времени) на 1 год. Для оценки точности подбора уравнения тренда использовался коэффициент детерминации (r^2).

Критерии оценки состояния лесных культур представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Критерии оценки состояния лесных культур в возрасте от 10 лет до окончания 2-го класса возраста

| Оценка состояния | Полнота, приживаемость (сохранность) | Участие деревьев культивируемых пород в составе насаждения | Состояние |
|----------------------|--------------------------------------|--|--|
| Хорошее | 0,7 и более более 70 % | 7–10 единиц | без признаков повреждения и угнетения или до 10 % деревьев с указанными признаками |
| Удовлетворительное | 0,4–0,6 70 % – 25 % | 5–6 единиц | 10 % – 30 % деревьев с признаками повреждения и (или) угнетения |
| Неудовлетворительное | менее 0,4 менее 25 % | 2–4 единицы | более 30 % деревьев с признаками повреждения и (или) угнетения |

Результаты исследования и их обсуждение

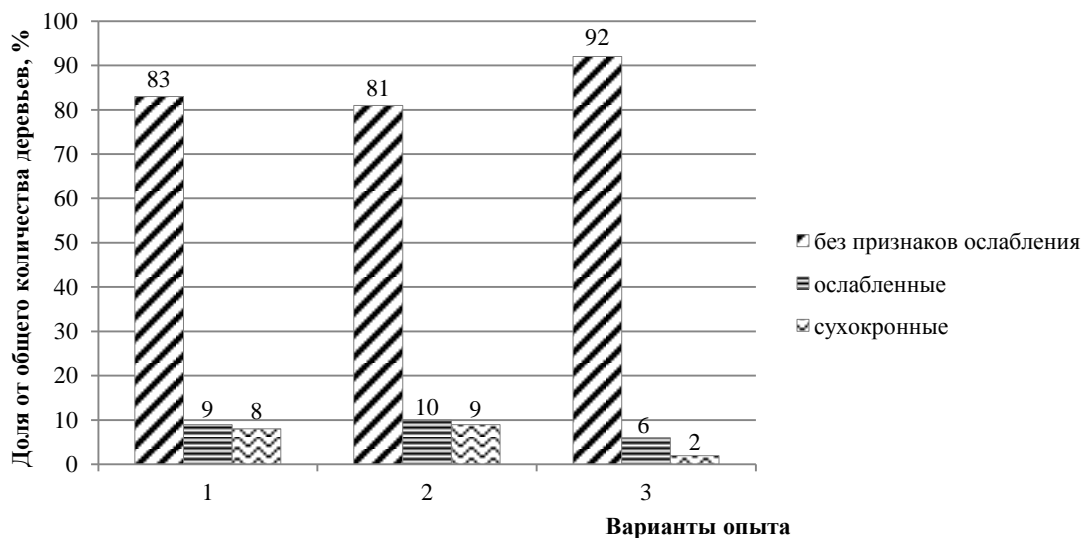
На опытных объектах были определены параметры радиационной обстановки; состав насаждения; полнота, характер усыхания, наличие повреждений насекомыми и болезнями; средневзвешенная категория состояния деревьев, состояние лесной среды, класс биологической устойчивости насаждения.

Лесоводственно-таксационная характеристика насаждений на опытных объектах представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Лесоводственно-таксационная характеристика опытных объектов в Светиловичском лесничестве Ветковского спецлесхоза (по данным Ветковского спецлесхоза и Светиловичского лесничества на 2022 г.)

| Квартал, выдел | Площадь, га | ТЛУ | Возраст, лет | Полнота | Средние | | Запас древесины, м ³ /га |
|--|-------------|--------------------|--------------|---------|-----------|-------------|-------------------------------------|
| | | | | | высота, м | диаметр, см | |
| Объект № 1. Создание лесных культур аэросевом | | | | | | | |
| 128/1 | 42,2 | Мш, А ₂ | 31 | 0,7 | 11 | 13 | 85С 25Б |
| Объект № 2. Создание лесных культур автосевом | | | | | | | |
| 100/8 | 27,5 | Мш, А ₂ | 31 | 0,7 | 11 | 13 | 95С 20Б |
| Объект № 3. Создание лесных культур посадкой сеянцами сосны обыкновенной | | | | | | | |
| 87/8 | 31,8 | Мш, А ₂ | 17 | 0,8 | 8 | 9 | 60С 40Б |

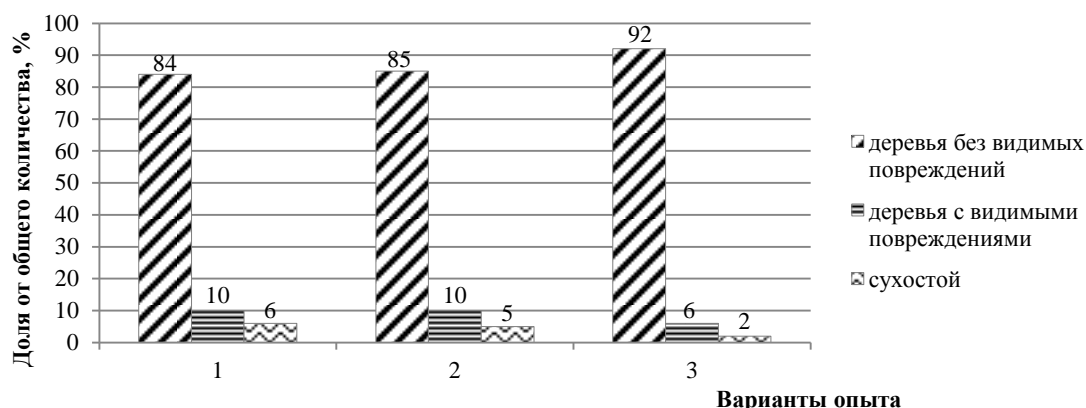
Зависимость состояния лесных культур от метода их создания представлена на рисунке 1.



1 – аэросев обычных семян сосны обыкновенной; 2 – автосев обычных семян сосны обыкновенной; 3 – посадка однолетними сеянцами сосны обыкновенной
Рисунок 1 – Зависимость состояния лесных культур от метода их создания

Как видно на рисунке 1, доля деревьев без видимых повреждений находится в пределах от 81 % в варианте 2 (автосев с использованием семян сосны обыкновенной) до 92 % в варианте 3 (посадка однолетними сеянцами сосны обыкновенной).

Зависимость биологической устойчивости насаждений от метода создания лесных культур представлена на рисунке 2.



1 – аэросев семян сосны обыкновенной; 2 – автосев семян сосны обыкновенной;
3 – посадка однолетними сеянцами сосны обыкновенной

Рисунок 2 – Зависимость биологической устойчивости насаждений от метода создания лесных культур

Установлено, что лесные культуры, созданные посевом и посадкой, являются биологически устойчивыми и относятся к 1 классу. Насаждений с нарушенной устойчивостью не выявлено. На всех пробных площадях преобладают деревья, относящиеся к категории «здоровые». Согласно критериям оценки к категории «хорошие» относятся лесные культуры, в составе которых отсутствуют деревья с признаками повреждения или их доля не превышает 10 %, сухостойные и поврежденные деревья встречаются единично.

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

При использовании многозональной космической съемки установлены вегетационные индексы опытных объектов (таблица 4).

Таблица 4 – Вегетационные индексы опытных объектов по данным спутниковой съемки

| Индекс | Статистика | Опытные объекты, квартал, выдел | | |
|--------|------------------------|---------------------------------|-------------|------------|
| | | № 1 (128/1) | № 2 (100/8) | № 3 (87/8) |
| NDVI | Среднее | 0,842* | 0,843 | 0,791 |
| | | 0,791** | 0,803 | 0,779 |
| | | 0,804*** | 0,812 | 0,747 |
| | | 0,821**** | 0,812 | 0,764 |
| | Минимальное | 0,703 | 0,636 | 0,645 |
| | | 0,556 | 0,568 | 0,637 |
| | | 0,668 | 0,694 | 0,517 |
| | | 0,687 | 0,663 | 0,551 |
| | Максимальное | 0,900 | 0,903 | 0,889 |
| | | 0,820 | 0,861 | 0,845 |
| | | 0,893 | 0,887 | 0,865 |
| | | 0,891 | 0,880 | 0,842 |
| | Стандартное отклонение | 0,023 | 0,029 | 0,023 |
| | | 0,037 | 0,024 | 0,017 |
| | | 0,028 | 0,025 | 0,029 |
| | | 0,023 | 0,028 | 0,029 |

*20.06.2022; **17.07.2021; ***11.07.2020; ****11.08.2019.

Продолжение таблицы 4

| | | | | |
|------------------------|--------------|-------|-------|--------|
| NBR | Среднее | 0,690 | 0,691 | 0,617 |
| | | 0,701 | 0,729 | 0,715 |
| | | 0,640 | 0,665 | 0,590 |
| | | 0,654 | 0,671 | 0,617 |
| | Минимальное | 0,519 | 0,300 | 0,324 |
| | | 0,489 | 0,370 | 0,460 |
| | | 0,379 | 0,552 | 0,190 |
| | | 0,374 | 0,424 | 0,226 |
| | Максимальное | 0,740 | 0,739 | 0,719 |
| | | 0,755 | 0,772 | 0,754 |
| | | 0,722 | 0,733 | 0,694 |
| | | 0,737 | 0,753 | 0,687 |
| Стандартное отклонение | 0,027 | 0,036 | 0,037 | |
| | 0,039 | 0,032 | 0,039 | |
| | 0,041 | 0,037 | 0,052 | |
| | 0,055 | 0,057 | 0,062 | |
| SWVI | Среднее | 0,420 | 0,429 | 0,351 |
| | | 0,446 | 0,468 | 0,458 |
| | | 0,334 | 0,368 | 0,297 |
| | | 0,376 | 0,405 | 0,332 |
| | Минимальное | 0,260 | 0,064 | 0,105 |
| | | 0,208 | 0,077 | 0,183 |
| | | 0,050 | 0,178 | 0,008 |
| | | 0,066 | 0,122 | -0,055 |
| | Максимальное | 0,475 | 0,472 | 0,450 |
| | | 0,542 | 0,538 | 0,513 |
| | | 0,410 | 0,471 | 0,408 |
| | | 0,508 | 0,529 | 0,420 |
| Стандартное отклонение | 0,029 | 0,037 | 0,039 | |
| | 0,049 | 0,045 | 0,048 | |
| | 0,052 | 0,054 | 0,055 | |
| | 0,072 | 0,077 | 0,069 | |

Значения вегетационных индексов связаны с возрастом насаждений, который обуславливает величину запаса зеленой фитомассы [1; 4; 7]. Этим фактом могут объясняться различия между лесными культурами объектов № 1 и № 2 (возраст 27 лет) и объекта № 3 (17 лет). Такие различия прослеживаются по средним, минимальным и максимальным значениям как по NDVI, так по другим индексам. Так, средние значения NDVI на объектах № 1 и № 2 составляли соответственно 0,804 и 0,812, а на объекте № 3 – 0,747. Средние NDVI на объектах № 1 и № 2 соответственно составляли 0,821 и 0,812, а на объекте № 3 – 0,764. Средние значения NBR на объектах № 1 и № 2 составляли соответственно 0,640 и 0,645, а на объекте № 3 – 0,517. Средние значения SWVI на объектах № 1 и № 2 составляли соответственно 0,334 и 0,368, а на объекте № 3 – 0,297. Аналогичные различия характерны для снимков других лет.

Таким образом, различия, связанные с возрастом лесных культур, прослеживаются по данным вегетационным индексам на снимках, сделанных в разное время.

Между объектами № 1 и № 2 по NDVI различия не достоверны. Выше значения NDVI для опытного объекта № 2 (разница 0,008 при величине стандартного отклонения 0,025–0,028), а для опытного объекта № 1 (разница 0,009 при величине стандартного отклонения 0,023–0,028).

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. Среднее значение 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, количество растений, относящихся к 1-му классу биологической устойчивости, тоже больше.

Многолетняя динамика NDVI опытных объектов была изучена по данным съемки сенсора MODIS спутника Terra. Были проанализированы изменения усредненных за летний сезон значений NDVI. Такой подход позволяет минимизировать влияние на спектрально-отражательные свойства растительного покрова как сезонных колебаний, так метеорологических аномалий летнего периода. На всех трех опытных объектах в 2000–2021 гг. наблюдался рост средних значений NDVI (рисунок 3).

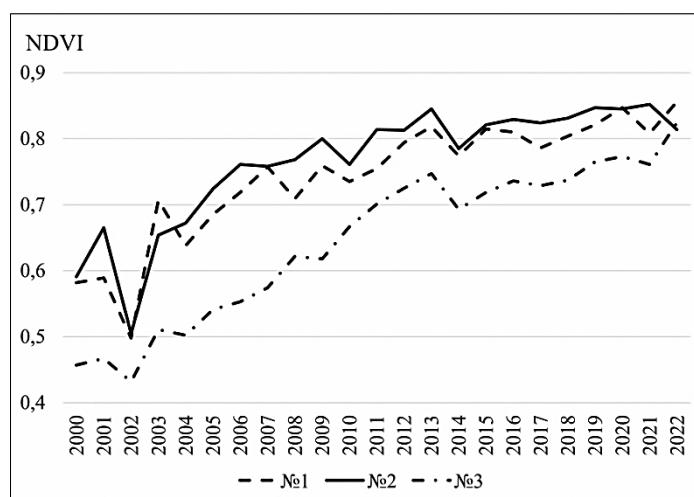


Рисунок 3 – Многолетние изменения усредненных за летний сезон значений NDVI лесных культур (по данным MODIS)

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 отражаются в интенсивном росте значений NDVI с 0,432–0,502 до 0,761–0,773.

Статистическая обработка показала, что указанный рост средних за летний сезон значений NDVI может быть описан уравнениями линейного тренда (таблица 5).

Таблица 5 – Характеристики многолетних трендов NDVI лесных культур

| Объекты | Уравнение тренда | Коэффициент детерминации r^2 |
|---------|---------------------------------|--------------------------------|
| № 1 | $NDVI = 0,0122 \cdot t + 0,597$ | 0,760 |
| № 2 | $NDVI = 0,0123 \cdot t + 0,621$ | 0,744 |
| № 3 | $NDVI = 0,0167 \cdot t + 0,445$ | 0,914 |

Опытный объект № 1 характеризуется статистически достоверным временным трендом NDVI с коэффициентом тренда 0,0122 (значение коэффициента детерминации – 0,76). Опытный объект № 2 характеризуется схожим характером изменений NDVI (коэффициент тренда 0,0123, коэффициент детерминации – 0,744). Динамика NDVI опытного объекта № 3 также имеет статистически значимый линейный тренд, но отличается более высокими значениями коэффициента тренда (прирост значений 0,0167 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 фитомасса насаждений. Изменения NDVI обусловлены влиянием других факторов, среди которых погодные условия имеют первостепенное значение.

Заключение

При проведении исследований с использованием съемки спутников Sentinel-2 и Landsat-8 по определению величины 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, созданными 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 опытный объект № 2, который создан автосевом семян сосны обыкновенной, характеризуется лучшим состоянием лесных культур по сравнению с опытным объектом № 1, который создан аэросевом.

Полученные результаты исследований многозональной космической съемки подтверждаются полевыми фактическими данными с учетом определения лесных культур.

По результатам многозональной съемки радиометра MODIS спутника Terra установлено, что на изучаемых объектах в 2000–2022 гг. наблюдаются поступательный рост NDVI, индицирующий рост фитомассы и продуктивности древесных насаждений во времени. Указанный рост NDVI опытных объектов статически достоверно описывается уравнениями линейного тренда.

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

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations / G. T. Yengoh [et al.]. – Lund : LUCSUS, 2014. – 80 p.

2. Ceccato, P. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain / P. Ceccato [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2001. – Vol. 77. – P. 22–33.

3. Miller, J. D. Calibration and Validation of Immediate Post-Fire Satellite-Derived Data to three severity metrics / J. D. Miller, B. Quayle // Fire Ecology. – 2015. – Vol. 11. – № 2. – P. 12–30.

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

5. Жирин, В. М. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом / В. М. Жирин, С. В. Князева, С. П. Эйдлина // Лесоведение. – 2016. – № 1. – С. 3–14.

6. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С. А. Барталев [и др.]. – М. : ИКИ РАН, 2016. – 208 с.

7. Терехин, Э. А. Исследование связи спектральными отражательными свойствами лесных насаждений Белгородской области и их лесотаксационными параметрами / Э. А. Терехин // Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки. – 2010. – № 21 (92), вып. 13. – С. 157–167.

8. Таксационно-лесоустроительный справочник / М-во лесного хозяйства Респ. Беларусь, Лесоустроительное респ. унитарное предприятие «Белгослес»; сост.: М. В. Кузьменков [и др.]. – Минск : Ред. журн. «Лесное и охотничье хозяйство», 2019. – 335 с.

Поступила в редакцию 20.01.2023

E-mail: kopvo@mail.ru;

V. V. Kopytkov, A. P. Gusev

INVESTIGATIONS OF THE STATE OF FOREST CROPS AND BIOLOGICAL STABILITY OF PLANTS IN THE ZONE OF PRIORITY RESETTLEMENT USING MULTI-ZONE SPACE IMAGE

The article discusses the results of assessing the state of forest plantations created by air-seeding, auto-seeding and planting Scots pine seedlings on the territory of former agricultural lands. Vegetation indices (NDVI, NBR, SWVI) were calculated on the basis of the Sentinel-2 satellite imagery to assess the state of forest crops. According to the results of the multi-zone survey of the MODIS radiometer of the Terra satellite, it was found that in the studied objects in 2000–2021 there is a progressive increase in NDVI, which is statically reliably described by linear trend equations.

Keywords: condition assessment, biological stability, forest crops, satellite imagery, vegetation indices, MODIS.