DOI 10.21178/2079–6080.2020.1.44
УДК 630*6

Анализ возможностей применения разновременных данных дистанционного зондирования Земли для оценки лесовосстановления

© А.П. Богданов^{1,2}, А.А. Карпов^{1,2}, В.В. Воронин¹, Р.А. Алешко^{1,2}

Possibilities analysis of using remote method for evaluating forest recovery using remote sensing data of the Earth

A.P. Bogdanov, A.A. Karpov, V.V. Voronin, R.A. Aleshko (Northern Research Institute of Forestry; Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov)

Currently, a series of multi-temporal satellite images are available, which make it possible to obtain systematic information about objects of observation. The dynamics of changes over time allows you to analyze various scenarios of these changes and compare them with the results of field surveys. The study of dynamic processes over time is an urgent problem of satellite images processing. The dynamic process of overgrowing felling is a process that takes place over many years or even decades.

A methodology for thematic processing of multispectral space imagery is proposed and implemented. The algorithm of the work is based on the analysis of different vegetation indices for assessing reforestation at clearings.

During the study, the publicly available opto-electronic satellite images of Landsat and the data of ground-based surveys in the Arkhangelsk region were selected as the main initial data. In the course of research work, the laying of temporary observation points was carried out according to the standard method. The result of this work is the development of a methodology for assessing forest restoration and proposals for improving the monitoring of reforestation (classifying forests as occupied forest stands), which is part of environmental monitoring.

To achieve the goal and objectives of the study, 159 forest plots were selected in the Arkhangelsk region of different felling periods and the degree of success of reforestation. As a result of the study, the informativeness of spectral indices for assessing reforestation based on vegetation indices

(NDVI, SWVI, NBR) was evaluated. In the study, the successful reforestation measure determined the period after felling — 8 years and the necessary increase in the index to 83 % of the initial value of the forest before felling index (SWVIpre) in the Arkhangelsk region.

Key words: Landsat, clear cuts, time series, reforestation, vegetation indices, boreal forests, scenarios of dynamic ecosystem processes

Анализ возможностей применения разновременных данных дистанционного зондирования Земли для оценки лесовосстановления

А.П. Богданов, А.А. Карпов, В.В. Воронин, Р.А. Алешко

В настоящее время доступны серии разновременных космических снимков, которые создают возможность получать систематическую информацию об объектах наблюдения. Динамика процессов с течением времени позволяет выполнять анализ различных сценариев этих изменений и сопоставлять их с результатами полевых обследований. Изучение динамических процессов является актуальной проблемой дешифрирования космических снимков. Заращение вырубок — это процесс, который происходит в течение многих лет или даже десятилетий.

Предложена и реализована методика тематической обработки мультиспектральной космической съемки. Алгоритм работы строится на анализе разновременных вегетационных индексов для оценки лесовосстановления на вырубках.

В качестве основных исходных данных при выполнении исследования выбраны общедоступные оптико-электронные космические снимки Landsat и данные наземных обследований в Архангельской области. В ходе научно-исследовательской работы была проведена закладка временных пунктов наблюдений. Результатом исследований является методика оценки лесовосстановления и предложений по совершенствованию мониторинга этих процессов (отнесения лесов к занятым лесными насаждениями).

Для достижения цели и реализации задач подобрано 159 лесных участков с различной давностью рубки и степенью успешности лесовосстановления. В ходе исследования изучена степень информативности спектральных индексов и возможность использования их для оценки лесовосстановления на основе вегетационных индексов (NDVI, SWVI, NBR). В результате для Архангельской области мерой успешного лесовосстановления были определены как необходимые: период после рубки 8 лет и увеличение значения индекса до 83 % от первоначальной величины (SWVIpre).

Ключевые слова: Landsat, вырубки, временные ряды, лесовосстановление, вегетационные индексы, бореальные леса, сценарии динамических процессов экосистем

Богданов Александр Петрович — старший научный сотрудник, кандидат с.-х. наук
E-mail: aleksandr_bogd@mail.ru

Карпов Александр Анатольевич — инженер-исследователь

Воронин Василий Владимирович — научный сотрудник

Алешко Роман Александрович — научный сотрудник, кандидат технических наук

¹ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»
163062, Архангельск, ул. Никитова, д. 13.

²Северный Арктический Федеральный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 163002 Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17

Введение

Наземные наблюдения за лесовосстановлением в местах, отдаленных от дорог круглогодичного пользования, весьма затруднительны. Внедрение методов дистанционного зондирования Земли для целей отнесения земель, предназначенных для лесовосстановления, к землям, занятым лесными насаждениями (ЗЗЛН) позволит уменьшить ресурсные затраты на проведение натурных обследований. Получение своевременной и актуальной информации о фонде лесовосстановления (вырубки, гари, погибшие насаждения, прогалины и редины) при помощи дистанционных методов, обеспечит принятие правильных и оперативных управленческих решений, направленных на лесовосстановление.

Цель исследования — анализ возможности проведения оценки успешности хода лесовосстановления на вырубках с использованием современных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- статистический анализ динамики значений вегетационных индексов и выявление связи с интенсивностью роста растений на сплошных вырубках;
- выбор оптимального вегетационного индекса из перечня выбранных ранее [2]: NDVI, NBR и SWVI.

В настоящей работе проведена оценка применения вегетационных индексов для анализа лесовозобновительных процессов на вырубках различного возраста и предложена методика отнесения территорий, предназначенных для лесовосстановления, к землям, занятым лесными насаждениями. Временные ряды космических снимков Landsat позволяют характеризовать восстановление лесов после нарушения на больших территориях [6].

Полученные результаты пополняют объем знаний в области применения методов интерпретирования космических снимков, позволят проводить мониторинг лесовосстановления на обширной площади. Кроме того, разработан-

ная методика может быть применена при различных видах использования леса. Внедрение достоверных методов оценки успешности лесовосстановления позволит делать предложения для организации экологически приемлемого лесопользования путем выполнения мероприятий по лесовосстановлению.

Объекты и методы исследования

Для достижения цели и решения поставленных задач исследование проводилось по следующим ключевым этапам:

- подбор материалов космосъемки на объекты исследования в Архангельской области;
- обработка данных дистанционного зондирования Земли путем вычисления вегетационных индексов;
- создание цифровой основы объектов работ;
- расчёт индексов для подобранных лесных участков;
- подготовка и обработка собранных полевых материалов.

Алгоритм подбора материалов космосъемки для исследуемых лесных участков состоит из следующих шагов:

1) Создание площадных объектов со сплошной рубкой в формате ГИС. Для исключения попадания смежных пикселей, не относящихся к исследуемому участку, его граница была уменьшена на 30 метров по контуру.

2) Анализ доступных материалов ДЗЗ, включающий в себя поиск безоблачных сцен из коллекции снимков Landsat за 3 летних месяца (июнь, июль, август), при этом облачность в кадре не должна была превышать 50 %.

3) Анализ снимков на наличие облачности в границах подобранных объектов и в 1000-метровой буферной зоне по периметру участка для исключения попадания на него пикселей, содержащих облака или их тени.

Обработка данных дистанционного зондирования Земли путем вычисления вегетационных индексов заключалась в выполнении следующих действий:

— расчет индекса для контура лесного участка;

— значения вегетационных индексов сохранялись в формате GeoTiff в географической системе координат для дальнейшей обработки в ГИС-среде.

На площадь полигонов сплошных вырубок рассчитывались спектральные (вегетационные) индексы. В работе использовались индексы: NDVI, SWVI, NBR. Соответствующее описание и формулы широко известны [4] и приведены далее.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормализованный разностный вегетационный индекс. Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных спектральных диапазонах — красном и ближнем инфракрасном. В красной области спектра лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а в ближней инфракрасной — находится область максимального отражения солнечной радиации. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов и анализировать их. Расчет индекса производился по формуле (1):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

где NIR — значение отражения в ближнем инфракрасном диапазоне спектра (4-й канал для Landsat 5 TM, 5-й канал для Landsat 8 OLI, 8-й канал для Sentinel 2);

RED — значение отражения в видимом красном диапазоне спектра (3-й канал для Landsat 5 TM, 4-й канал для Landsat 8 OLI).

SWVI (Short Wave Vegetation Index) — коротковолновый вегетационный индекс. Средняя область инфракрасного спектра отражает изменения влагосодержания растения, в то время как в ближней области инфракрасного спектра находится максимум отражения солнечного света для растений. Совместное использование двух диапазонов повышает точ-

ность оценки влагосодержания растения и компенсирует влияние оказываемой структурой листа растения. Расчет индекса производился по формуле (2):

$$SWVI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

где NIR — значение отражения в ближнем инфракрасном диапазоне спектра (4-й канал для Landsat 5 TM, 5-й канал для Landsat 8 OLI);

SWIR — значение отражения в дальнем коротковолновом инфракрасном диапазоне спектра (5-й канал для Landsat 5 TM, 6-й канал для Landsat 8 OLI).

Выбор данного индекса обусловлен способностью воды в листьях растений по-разному реагировать (поглощать и/или отражать) на падающее электромагнитное излучение. Максимум поглощения приходится на инфракрасную зону электромагнитного спектра. В то же время в видимом диапазоне спектра поглощение водой солнечного излучения незначительно, что делает данный индекс чувствительным к изменению влагосодержания [1].

NBR (Normalized Burned Ratio) — нормализованный индекс гари. Ближний инфракрасный спектральный диапазон чувствителен к структуре клеток растительности, в то время как средний инфракрасный диапазон — к влажности растений и имеет тенденцию к увеличению на открытых участках и гаях. Расчет индекса производился по формуле (3):

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (3)$$

где NIR — значение отражения в ближнем инфракрасном диапазоне спектра (4-й канал для Landsat 5 TM, 5-й канал для Landsat 8 OLI, 8-й канал для Sentinel 2);

SWIR — значение отражения в дальнем коротковолновом инфракрасном диапазоне спектра (7-й канал для Landsat 5 TM, 7-й канал для Landsat 8 OLI).

Этапы формирования цифровой основы (лесничеств) с использованием повыведельных данных базового (последнего) лесоустройства:

1) Создание цифровой основы лесничеств по субъектам Российской Федерации путем использования электронных данных (векторных слоев с атрибутивной информацией) из ФГУП «Рослесинфорг», полученных при проведении ГИЛ.

2) Актуализация цифровой основы лесничеств в разрезе субъектов Российской Федерации путем нанесения текущих изменений за период, прошедший после создания основы ФГУП «Рослесинфорг»:

- сканирование топографических карт определенного масштаба;

- сканирование рабочих планшетов лесоустройства с нанесенными текущими изменениями с момента лесоустройства;

- посадка растров рабочих планшетов лесоустройства на электронную топографическую основу;

- векторизация квартальной, дорожной и гидрографической сетей;

- векторизация границ лесотаксационных выделов;

- создание тематической (атрибутивной) базы данных;

- организация геоинформационной базы данных;

- топологический и площадной контроль геоинформационной базы данных;

3) Подготовка перечня лесных участков по категориям лесных земель в соответствии с Государственным лесным реестром (ГЛР), запланированных для перевода в земли, занятые лесными насаждениями (ЗЗЛН):

- не покрытые лесом земли (вырубки, гари, погибшие насаждения несомкнувшиеся лесные культуры, прогаины и редины);

- молодняки 1 класса возраста, отнесенные к ЗЗЛН за период до 10 лет;

- молодняки 2 класса возраста, отнесенные к ЗЗЛН за период до 20 лет;

- нанесение лесных участков на элек-

тронную карту с внесением атрибутивной информации;

- проверка соответствия лесных участков по времени и площади вырубки (времени пожара или гибели насаждений) с использованием доступных источников (Global Forest Change, Global Forest Watch и др.);

- составление перечня лесных участков, отнесенных к ЗЗЛН в текущем году.

Расчёт индексов для подобранных лесных участков. Сбор разновременных значений индексов производился на платформе Google Earth Engine. Индексы рассчитывались по снимкам среднего пространственного разрешения серии спутников Landsat (Landsat 5 TM и 8 OLI).

Подготовка и необходимая обработка полевых материалов, собранных на территории Архангельской области. Объекты подбирались в различных типах леса, разного состава, давности проведения сплошной рубки, типов вырубки. Частично проведены натурные исследования участков методом закладки transect в пасаках прямоугольной формы с подсчетом количества жизнеспособного подроста [3].

Подобраны вырубки давностью от 1 года до 20 лет. Очевидно, что интенсивность роста древесных пород зависит от множества факторов как внутренних: сукцессионных процессов, онтогенетического состояния, так и внешних: богатства почв, характера увлажнения, объема энергии, получаемой от солнца, периода года и др.

Однако с течением времени участки с успешным лесовосстановлением приобретают сходный сценарий динамики индексов. Анализ литературных источников на тему изучения динамики вегетационных индексов подтверждает наше предположение об изменениях спектральных индексов [6]. На рисунке 1 приведены сценарии изменения индексов в течение 30 лет для различных процессов на территории Восточной Европы [5]. Графики демонстрируют различные типы динамик сукцессионных процессов экосистем.

A — объект без лесного покрова; B — лесной покров; C — процесс зарастания вырубки;
D — изменения в лесном покрове без дальнейшего лесовосстановления;
E — изменения в лесном покрове с дальнейшим лесовосстановлением; F — изменения в лесном покрове с дальнейшим лесовосстановлением и последующей вырубкой, ветровалом или гарью;
G — процесс зарастания лесом с последующей вырубкой или ветровалом, или гарью

Рис. 1. Сценарии различных типов процессов лесовосстановления (по: [5])

Объекты с успешным лесовосстановлением, согласно рисунку, имеют динамику увеличения индекса до уровня, когда индекс становится постоянным.

Результаты и их обсуждение

Всего для проведения исследований было подобрано 159 лесных участков на территории Архангельской области, из которых на момент обследования 134 имели достаточное количество подроста и среднюю высоту деревьев для отнесения к землям, занятым лесными насаждениями, а 25 участков не соответствовали критериям успешного лесовосстановления. Для каждого объекта были рассчитаны спектральные индексы SWVI, NBR и NDVI — на момент до возникновения наруше-

ния и на срок проведения обследования, а также определен процент восстановления индексов (до и после нарушения).

В результате экспериментальных наблюдений нами получено значительное количество числовых характеристик по объектам исследования. Атрибутивная информация на лесные участки сформирована в таблице в текстовом формате. Полученные данные были обработаны на основе применения современных программ компьютерного обеспечения MS Excel 2016 и STATISTICA.

Для исследования закономерностей изменения вегетационных индексов нами были рассчитаны основные статистические показатели для лесных участков до сплошной рубки (табл. 1) и после ее проведения (табл. 2).

Таблица 1

Статистические показатели вегетационных индексов до рубки

Показатель	Значения статистических показателей вегетационных индексов		
	NBRpre	NDVIpre	SWVIpre
Среднее значение	0,652	0,740	0,356
Среднее квадратичное отклонение	0,067	0,078	0,052
Ошибка среднего значения	0,004	0,005	0,003
Точность, %	10,3	10,5	14,5
Достоверность (достоверно, если больше 4)	165,4	162,5	118,0

Таблица 2

Статистические показатели вегетационных индексов по лесным участкам различных категорий лесных земель

Характеристика объектов	Вегетационные индексы	Статистические показатели				
		Среднее значение	Среднее квадратичное отклонение	Основная ошибка среднего значения	Точность, %	Достоверность среднего значения
1. Не покрытые лесной растительностью земли (вырубки, гари, несомкнувшиеся лесные культуры, погибшие насаждения, редины и прогалины); средний период после рубки — 2 года; количество участков — 25 шт.; общая площадь — 575 га	NBR post	0,36	0,16	0,0	9	12
	NDVI post	0,62	0,08	0,02	3	40
	SWVI post	0,10	0,11	0,02	22	4
2. Покрытые лесной растительностью земли, (молодняки 1 класса возраста), которые отнесены к ЗЗЛН в последние 10 лет; средний период после рубки — 7 лет; количество участков — 80 шт.; общая площадь — 1865 га	NBR post	0,58	0,09	0,01	2	58
	NDVI post	0,75	0,09	0,01	1	73
	SWVI post	0,29	0,08	0,01	3	32
3. Покрытые лесной растительностью земли, (молодняки 2 класса возраста), которые отнесены к ЗЗЛН в последние 10–20 лет; средний период после рубки — 16 лет; количество участков — 54 шт.; общая площадь — 1921 га	NBR post	0,67	0,05	0,01	1	92
	NDVI post	0,81	0,05	0,01	1	112
	SWVI post	0,37	0,05	0,01	2	50

Значения индексов на момент обследования и до рубки выбирались максимально приближенные к июлю или августу для получения сопоставимых данных в пик вегетационного периода.

Значения индексов анализировались по следующим показателям:

– NDVIpre, NBRpre, SWVIpre – значение индексов до рубки (табл. 1)

– NDVIpost, NBRpost, SWVIpost – значение индексов после рубки (табл. 2).

Значения вегетационных индексов NDVI, NBR и SWVI на период от 1 года до

20 лет обработаны методами описательной статистики и изображены на рисунке 2. График наглядно демонстрирует динамику среднего значения и степень рассеяния значений. Кроме того, на графике приведены «Выбросы и крайности». Для оценки регрессионных уравнений применялся критерий Фишера (F), $F_{0,05} = 1,59$. Так как фактическое значение t-критерия, приведенное на рисунке 2, больше табличного, то с вероятностью 95 % делаем заключение о статистической значимости уравнения множественной регрессии в целом.

Рис. 2. Динамика значений вегетационных индексов

Восстановление после нарушений оценивалось с использованием полученных спектральных метрик на основании данных временных рядов NBR, NDVI и SWVI, характеризующих долгосрочное восстановление леса, которое определяется как количество лет, необходимое для восстановления пикселя до своего исходного значения.

Показателем, характеризующим восстановление лесов после нарушения на больших территориях, был выбран SWVI. Пороговым значением этого индекса для отнесения территории к лесопокрытой площади установлено 83 % от первоначальной его величины — до рубки. Согласно уравнению среднего, приведенного на рисунке 2, индекс SWVI достигнет

величины, равной 83 % SWVIpre, через 8 лет после проведения рубки.

Выводы

В результате исследования проведена оценка информативности вегетационных индексов (NDVI, SWVI, NBR). Основным критерием отнесения участков к лесопокрытой площади явилось количество лет после рубки и показатель базового индекса. В нашем исследовании мерой успешного лесовосстанов-

ления в Архангельской области были определены как необходимые — 8-летний период после рубки и увеличение индекса до 83 % от первоначального показателя (SWVIpre).

Космические снимки Sentinel для оценки лесовосстановления не рассматривались, так как давность запуска космического аппарата не достигает 5 лет, что является недостаточным для изучения динамики индексов за период хотя бы одного класса возраста, равный 20 годам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белова, Е.И. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам / Е.И. Белова, Д.В. Ершов // Лесоведение. — 2015. — № 5. — С. 339–345.
2. Богданов, А.П. Совершенствование мониторинга лесов путем использования облачных технологий как элемента устойчивого лесопользования / А.П. Богданов, А.А. Карпов, Н.А. Демина, Р.А. Алешко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15. — № 1. — С. 89–100.
3. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 11.03.2019 № 150 «Об утверждении Порядка отнесения земель, предназначенных для лесовосстановления, к землям, на которых расположены леса, и формы соответствующего акта». (Зарегистрирован в Минюсте России 28.05.2019 N 54752)
4. Карпов, А.А. Разработка методики для перевода лесных земель в покрытые лесом земли дистанционными методами / А.А. Карпов, Н.Р. Пирцхалава-Карпова, А.П. Богданов, Р.А. Алешко, В.В. Воронин // Сибирский лесной журнал. — 2019. — № 6. — С. 19–26.
5. Potapov, P.V. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive / P.V. Potapov, S.A. Turubanova, A. Tyukavina, A.M. Krylov, J.L. McCarty, V.C. Radeloff, M.C. Hansen // Remote Sensing of Environment. — 2015. — № 159. — P. 28–43.
6. White, J.C. Confirmation of post-harvest spectral recovery from Landsat time series using measures of forest cover and height derived from airborne laser scanning data / J. White, N. Saarinen, V. Kankare, M. Wulder, T. Hermosilla, N. Coops, P. Pickell, M. Holopainen, J. Hyypä, M. Vastaranta // Remote Sensing of Environment. — 2018. — № 216. — P. 262–275.

REFERENCES

1. Belova E.I., Ershov D.V. Experience in estimating natural reforestation on clear-cuts by time series. *Lesovedenie*, 2015, vol. 5, pp. 339–345. (In Russian)
2. Bogdanov A.P., Karpov A.A., Demina N.A., Aleshko R.A. Sovershenstvovanie monitoringa lesov putem ispol'zovaniya oblachnykh tekhnologii kak elementa ustoichivogo lesoupravleniya. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 89–100. (In Russian)
3. Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii RF ot 11.03.2019 № 150 “Ob utverzhdenii Poryadka otneseniya zemel’, prednaznachennykh dlya lesovosstanovleniya, k zemlyam, na kotorykh raspolozheny lesa, i formy sootvetstvuyushchego akta”. (In Russian)

4. Karpov A.A., Pirtskhalava-Karpova N.R., Bogdanov A.P., Aleshko R.A., Voronin V.V. Razrabotka metodiki dlya perevoda lesnykh zemel' v pokrytye lesom zemli distantsionnymi metodami. *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2019, no. 6, pp. 19–26. (In Russian)
5. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*, 2015, no. 159, pp. 28–43.
6. White, J.C., Saarinen N., Kankare V., Wulder M., Hermosilla T., Coops N., Pickell P., Holopainen M., Hyypä J., Vastaranta M. Confirmation of post-harvest spectral recovery from Landsat time series using measures of forest cover and height derived from airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment*, 2018, no. 216, pp. 262–275.

Статья поступила в редакцию 14.01.2020