

УДК 630*2

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДЛЯ ПЕРЕВОДА ЛЕСНЫХ ЗЕМЕЛЬ В ПОКРЫТЫЕ ЛЕСОМ ЗЕМЛИ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

А. А. Карпов^{1,2}, Н. Р. Пирцхалава-Карпова¹, А. П. Богданов^{1,2},
Р. А. Алешко^{1,2}, В. В. Воронин²

¹ Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова
163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 17

² Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства
163062, Архангельск, ул. Никитова, 13

E-mail: lesnoy.monitoring@gmail.com, nanahoroshaya@gmail.com,
aleksandr_bogd@mail.ru, r.aleshko@gmail.com

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.

Оценка лесовосстановления по данным дистанционного зондирования Земли является приоритетной темой научных исследований на сегодняшний день во всем мире. Используя многолетние спутниковые снимки и спектральные индексы для анализа растительности, можно определить пороговые значения успешного лесовосстановления на вырубках и гарях. В российских реалиях анализ успешности лесовозобновления имеет практическую ценность для перевода лесных земель, подверженных вырубкам и лесным пожарам, в площадь, покрытую лесом, после достижения необходимых критериев для перевода. Скорость лесовозобновления напрямую зависит от климатических и почвенных условий исследуемого региона. Сбор полевых данных и исследовательская работа проведены в северо- и среднетаежном районах Архангельской области. Данная территория относится к бореальным лесам. Расчет спектральных индексов для каждого объекта исследования проводили для одновременных снимков за 20-летний период с использованием платформы Google Earth Engine. На основе полученных результатов выбирали наиболее подходящий для анализа спектральный индекс и устанавливали пороговые значения для перевода пикселя спутникового снимка в площадь, покрытую лесом. Оптимальным спектральным индексом для разработки методики перевода земель в покрытую лесом площадь по спутниковым данным был выбран индекс SWVI. Оптимальное пороговое значение для перевода определено как восстановление индекса до 80 % после произошедшего нарушения в лесном покрове. На основе анализа изменений индекса разработана методика для автоматизированного перевода земель в покрытую лесом площадь. Результатами проведенной работы стал пространственный слой переведенных в 2018 г. земель в покрытую лесом площадь на территории Северодвинского и Онежского лесничеств Архангельской области.

Ключевые слова: дистанционные методы мониторинга, лесовосстановление, вегетационный индекс, SWVI, NBR, NDVI, Google Earth Engine, Архангельская область.

DOI: 10.15372/SJFS20190603

ВВЕДЕНИЕ

Главной причиной уменьшения биологического разнообразия, изменения мирового углеродного цикла, климата и гидрологического цикла являются перемены, происходящие в землепользовании (Foley et al., 2005; Turner et al., 2007). Изменения, происходящие в лесном покрове, оказывают важное влияние на поглоще-

ние углерода из атмосферы. В настоящее время тропические леса подвержены значительному воздействию со стороны лесозаготовительных компаний (Hansen et al., 2013), что повышает важность бореальных лесов в глобальном углеродном цикле (Potapov et al., 2011). К сожалению, данные о бореальных лесах не являются полными и достаточными для анализа изменений, происходящих в этих лесах. Следовательно,

используя существующие данные, невозможно точно оценить их влияние на мировой климат и углеродный цикл (Potapov et al., 2011; Богданов и др., 2018).

Развитие дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) создает возможности для оперативно-го слежения за изменениями, происходящими в лесном покрове. Данная технология позволяет анализировать уменьшение лесной площади в результате вырубок, пожаров, ветровалов и восстановление лесного покрова в масштабе всего мира.

Использование спектральных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный относительный индекс растительности), SWVI (Shortwave Vegetation Index – коротковолновый вегетационный индекс), NBR (Normalized Burn Ratio – нормализованный индекс гари) и компонентов преобразования Tasseled Cap greenness (зеленость), wetness (влажность) и brightness (яркость) для анализа растительного покрова обусловлено их зависимостью от фенологического состояния растительности (Алешко и др., 2015).

Скорость лесовосстановительных процессов на местах, где произошли нарушения лесного покрова, напрямую зависит от климатических условий. Это утверждение верно и для климатических подзон, в которых расположены бореальные леса.

Многовременной анализ компонентов преобразования Tasseled Cap доказывает возможность отслеживания изменений за 30-летний период на месте нарушений лесного покрова территорий бореальных лесов Северной Америки. После данного периода значения компонентов Tasseled Cap сравниваются со значениями леса, не подверженного изменениям. Бореальные леса (на примере западного и восточного лесных массивов Северной Америки) могут иметь различный ход лесовосстановления. Это обусловлено климатическими и почвенными различиями (Frazier et al., 2015).

После нарушения лесного покрова восстановление индексов NDVI, NBR и компонента greenness преобразования Tasseled Cap до 80 % от первоначальных значений требует разных временных периодов в различных климатических подзонах бореальных лесов Северной Америки (Pickell et al., 2015).

Анализ лесовосстановления в нескольких климатических подзонах требует первоначального определения фенологического периода для каждой подзоны. При анализе больших терри-

торий имеется фактор фенологического сдвига (Pickell et al., 2015).

Повреждения, нанесенные лесным пожаром, и их тяжесть являются важными аспектами скорости лесовосстановления. В научных исследованиях уровень поврежденности древостоя часто разделяется на 5 классов: незначительный, низкий, средний, высокий и очень высокий. Поэтому методы анализа, основанные на спектральных индексах, должны учитывать значение индекса не только после пожара, но и до появления изменений в лесном покрове. Таким образом, возможно учесть степень поврежденности. Примерами таких индексов могут быть SRI (Stand Regrowth Index или Индекс восстановления древостоя) и RRI (Relative Regrowth Index или Относительный индекс возобновления), основанные на значениях индекса NDVI до и после пожара. Данные индексы разработаны специально для оценки лесовосстановления после изменений в лесном покрове, вызванных вырубкой или пожаром (Yi et al., 2013).

Использование спектральных индексов для анализа состояния растительности требует наличия полевых данных для нахождения связей между значением индекса и реальным состоянием растительности. Сюда можно отнести количество и высоту деревьев, породный состав и плотность полога древостоя, тип и состояние подстилающей поверхности.

Сравнение разновременных данных Landsat и лазерного сканирования, выполненного с воздушного судна, показало возможность перевода вырубок в лесные земли по критериям Всемирной Продовольственной Организации ООН для территории бореальных лесов Финляндии. Восстановление значения индекса NBR до 80 % от начального указывает на зарастание сплошной вырубки до состояния, соответствующего критериям леса (Алешко и др., 2017; White et al., 2018).

Основной практической задачей использования спутниковых данных для анализа лесовосстановления в российских реалиях является нахождение порога для перевода территорий вырубок и гарей в площадь, покрытую лесом, после достижения ими необходимых критериев по количеству и высоте подроста.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения научного исследования выбрана территория Архангельской области, расположенной в зоне бореальных лесов, включа-

ющей в себя следующие районы: притундровых лесов, редкостойной тайги, северо- и средне-таежные.

Регион исследования имеет среднюю лесистость, равную 60 %, с доминированием хвойных пород. Большая часть лесов, имеющая возраст спелых и перестойных лесных насаждений, характеризуется низким запасом древостоя. Породный состав древостоя для всей области имеет следующий вид: 70 % ели, 20 % сосны, 10 % березы с незначительным количеством осины (Леса..., 2005).

Архангельская область характеризуется развитой лесозаготовительной промышленностью и значительным истощением лесных запасов в возрасте спелых и перестойных насаждений в зоне транспортной доступности. Поддержание текущего уровня заготовки древесины требует освоения новых территорий и развития инфраструктуры.

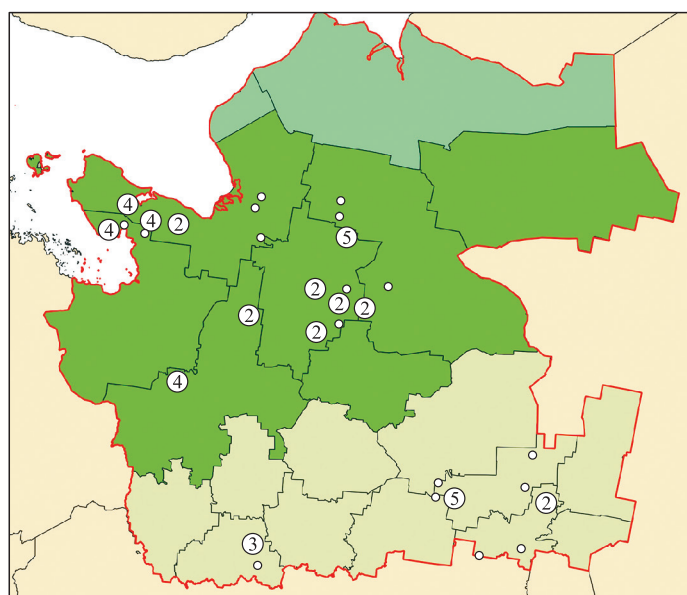
Северная часть Архангельской области, включающая Онежское, Северодвинское, Архангельское и Мезенское лесничества, имеет статус Арктической сухопутной зоны Российской Федерации. В соответствии с данными лесного реестра, датированными 2016 г., к землям лесного фонда Арктической зоны Архангельской

области относятся 39 059 млн га, 29 765 млн га относятся к не покрытой лесом площади, что составляет 76 % от земель лесного фонда (Отчет..., 2016).

Замена высокоценных хвойных пород на мягколиственные является общим характером лесовосстановления для области в целом.

Отсутствие естественного лесовозобновления на части вырубок может быть вызвано недостаточным количеством подроста, отсутствием осеменения или неблагоприятными климатическими условиями. Развитие подстиляющей поверхности на вырубке или гари в виде мха или травянистых сообществ ухудшает прорастание семян.

Основой для исследования стали полевые данные, полученные в 2015, 2016 и 2017 гг. в Архангельском, Емецком, Онежском, Обозерском, Северодвинском, Холмогорском, Коношском, Котласском и Красноборском лесничествах Архангельской области. В ходе полевых работ заложены пробные площади (ПП) на 54 вырубках и трех гарях. Объекты исследования имели площадь от 4 до 80 га и представляли собой вырубку или гари, датированные 1998–2013 гг. Расположение ПП на территории Архангельской области представлено на рис. 1.



Подзоны тайги

○ ПП	район притундровых лесов и редкостойной тайги
③ несколько ПП	северотаежный район
— границы Архангельской области	среднетаежный район



Рис. 1. Схема расположения объектов исследования. Состояние подроста после вырубки: А – через 5 лет; Б – через 10 лет.

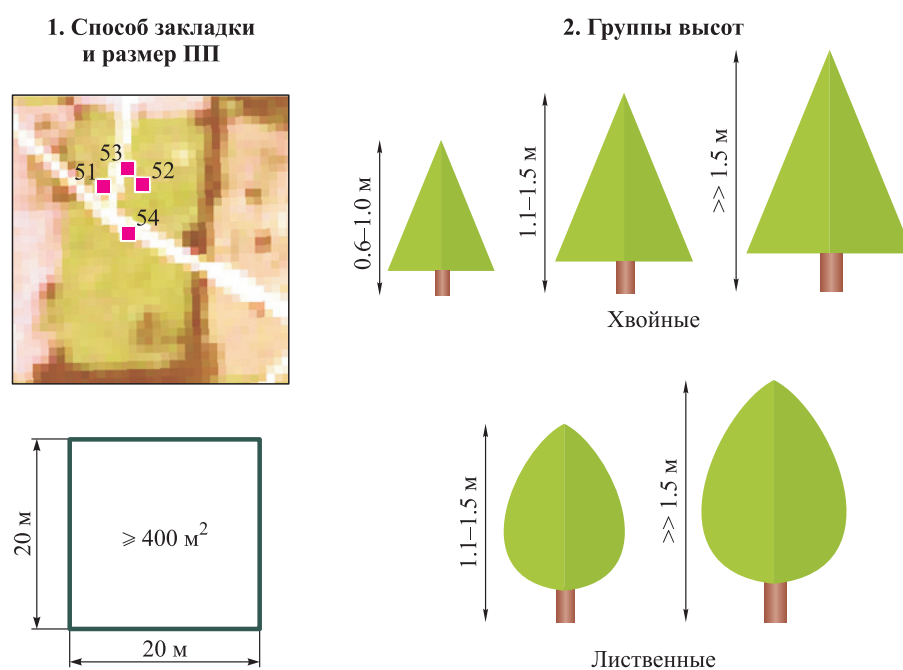


Рис. 2. Способ закладки ПП, ее размеры и группы высот для лиственных и хвойных пород деревьев, применяемые в ручном пересчете.

Все ПП в 2016 и 2017 гг. заложены в соответствии с временной методикой проведения государственного мониторинга воспроизводства лесов от 2016 г., утвержденной Федеральным агентством лесного хозяйства (Временная методика..., 2016).

ПП имеет форму квадрата со сторонами 20 м. Внутри нее проведен сплошной пересчет подраста с разделением по породам и группам высот. Место для закладки ПП выбирается таким образом, чтобы она отражала средние параметры лесовосстановления на данном участке. На каждые 10 га объекта, переводимого в покрытую лесом площадь, закладывается одна ПП (рис. 2).

Данные, собранные с нескольких ПП, заложенных на одном объекте, усредняли и заносили в отчет с пересчетом количества подраста на 1 га. После чего на основе данных отчета принималось решение о переводе объекта в покрытую лесом площадь, если он соответствовал критериям перевода. Критерии перевода для пород, характерных для Архангельской области, отображены в табл. 1.

Таблица 1. Критерии перевода в покрытую лесом площадь

Порода	Деревьев на 1 га, шт.	Средняя высота, м
Сосна	1500	0.7
Ель	1500	1.0
Береза, осина	2000	1.5

Для анализа объектов лесовосстановления в работе использовали спутниковые снимки Landsat 5, 7, 8 с уже произведенной атмосферной коррекцией. Спутниковые снимки группировки Landsat доступны с 1984 г., являются мультиспектральными и имеют периодичность съемки, равную 16 дням. Использование других спутниковых снимков с более высоким разрешением затруднительно ввиду отсутствия архива данных за период более 10 лет, высокой стоимости, низкой периодичности съемки, малому количеству спектральных каналов.

Анализ снимков производился на платформе Google Earth Engine (GEE).

Для определения границ исследуемых объектов применяли снимки высокого разрешения отечественных спутников Ресурс-П и Канопус-В, также использовали пространственный слой Global Forest Loss с пространственными данными об уменьшении лесного покрова с 2000 по 2017 г. Слой уменьшения покрытой лесом площади Global Forest Loss для бореальных лесов имеет точность, равную 88 % (Hansen et al., 2013).

Исследовательская работа производилась в несколько этапов:

1. Обработка полевого материала и создание пространственного слоя данных с границами объектов.

2. Анализ динамики спектральных индексов NDVI, SWVI, NBR, определение восстановле-

ния индекса после произошедшего нарушения (вырубка, гарь) на момент полевого обследования.

3. Разработка автоматизированного метода перевода земель лесного фонда в покрытую лесом площадь.

Сбор разновременных значений индексов производили на платформе Google Earth Engine. Индексы рассчитывали по снимкам среднего разрешения спутников Landsat.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Создание площадного объекта со сплошной рубкой или площадью, пройденной лесным пожаром высокой интенсивности. Для исключения попадания смежных пикселей, не относящихся к вырубке или пожару, граница объекта была уменьшена на 30 м по контуру всей вырубке или гари.

2. Анализ доступных материалов ДЗЗ, включающий в себя поиск безоблачных сцен из коллекции снимков Landsat. Поиск осуществлялся по следующим критериям: облачность снимка не должна превышать 50 %, отбирали снимки только летних месяцев (июнь–август).

3. Анализ всех снимков на наличие облачности на объекте исследования и в буферной 1000 м зоне от него для исключения попадания пикселей, содержащих облака и тени от облаков, на исследуемый участок.

4. Расчет индекса для контура вырубке или гари.

5. Скачивание изображения с рассчитанными разновременными индексами на персональный компьютер для дальнейшей обработки.

После скачивания данных для каждого участка выбирали значения индексов по трем критериям: до появления изменений, в год изменений и значение на момент полевого обследования.

Для многих объектов отсутствовали снимки на момент появления изменений, что затрудняло анализ данных по данному критерию, поэтому было принято решение использовать индексы только до вырубке или пожара и на момент обследования.

Для анализа лесовосстановления построили графики, отображающие долю (%) восстановления индексов NDVI, SWVI, NBR исследуемых объектов на момент обследования (рис. 3).

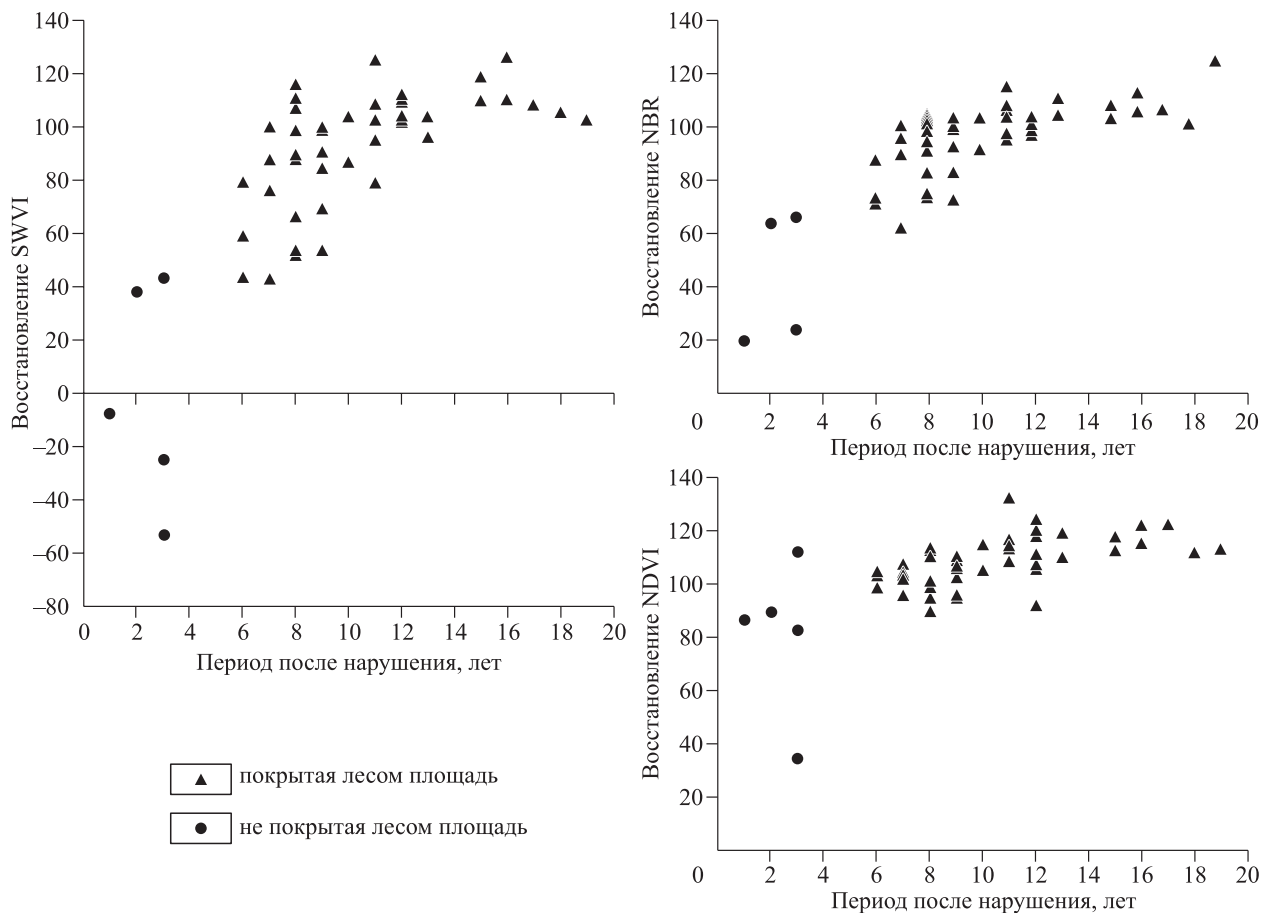


Рис. 3. Показатели восстановления индекса.

Долю восстановления индекса рассчитывали по формуле

$$R = \frac{I_{obs}}{I_{pre}}$$

где I_{obs} – индекс на момент обследования; I_{pre} – индекс до нарушения.

Анализ графиков восстановления индексов NDVI, SWVI и NBR наглядно показывает чувствительность каждого индекса к лесовосстановительным процессам на исследуемых объектах.

Индекс NDVI имеет плохую разделимость площадей на покрытую и не покрытую лесом площадь по значениям восстановления индекса. Практически все исследуемые объекты имеют восстановление индекса свыше 80 %, несмотря на небольшой период времени после нарушения лесного покрова – от 1 до 4 лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Индексы SWVI и NBR показывают лучшую чувствительность к восстановлению древостоя на вырубках и гарях. Все объекты на данных графиках можно условно разделить на 3 группы:

1. Не покрытая лесом площадь, имеющая восстановление индекса менее 80 %.
2. Покрытая лесом площадь, имеющая восстановление индекса менее 80 %.
3. Покрытая лесом площадь, имеющая восстановление индекса более 80 %.

Анализ восстановления индекса SWVI указывает на достижение более 80 % восстановления индекса спустя 10 лет всеми исследуемыми объектами, переведенными в покрытую лесом

площадь. Часть объектов лесовосстановления, переведенных в покрытую лесом площадь за период от 6 до 9 лет, имеет восстановление индекса от 40 до 80 %. Объекты лесовосстановления, не переведенные в покрытую лесом площадь, имеют до 40 % восстановления индекса.

После анализа динамики спектральных индексов удалось выбрать наиболее подходящий индекс для оценки лесовосстановления и определить порог перевода лесных земель в покрытую лесом площадь.

На основе полученных данных разработан автоматический метод для перевода земель в покрытую лесом площадь, который основывается на неуправляемой классификации методом K-mean.

На первом шаге изображение спутникового снимка классифицируется на 15 кластеров в границах слоя уменьшения покрытой лесом площади forest cover loss за период с 2000 по 2014 г. Для каждого кластера рассчитывается среднее значение индекса SWVI.

Вторым шагом является создание пространственного слоя с общей границей средневозрастных, припевающих, спелых и перестойных лесов. Для определения границы используется пространственный слой плотности древесного полога tree cover canopy. Пиксели слоя tree cover canopy, имеющие значение более 60 %, входят в определяемую границу леса.

После создания границы леса рассчитывается среднее значение SWVI для пикселей, входящих в выделенную лесную территорию. Далее рассчитывается пороговое значение индекса для перевода земель в покрытую лесом площадь.

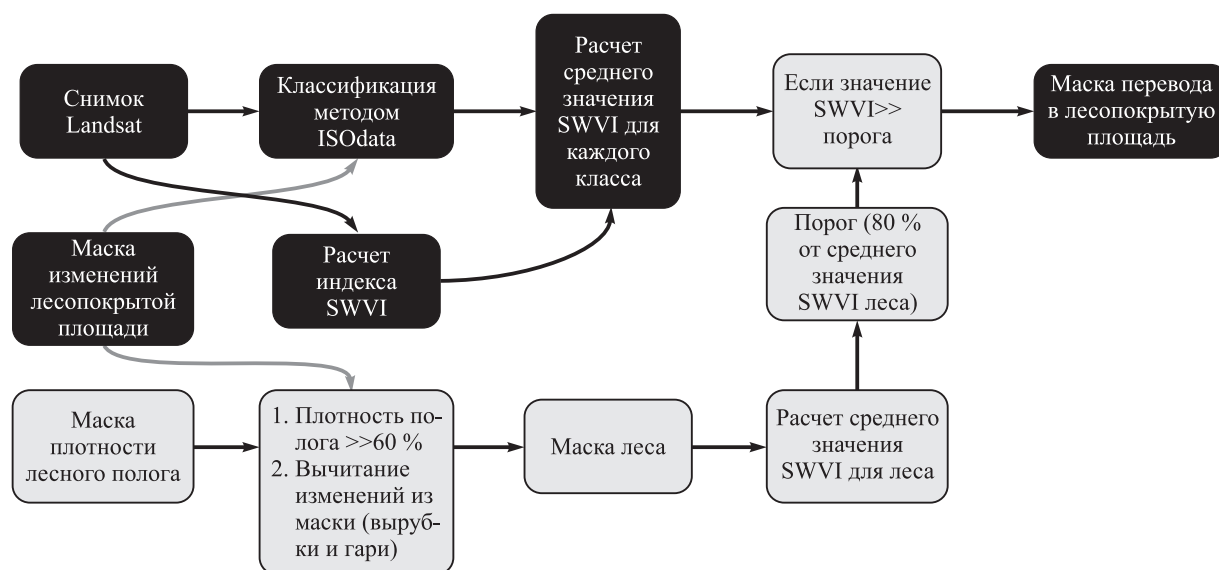


Рис. 4. Схема автоматического метода для перевода земель в покрытую лесом площадь.

Таблица 2. Среднее значение индекса SWVI для каждого кластера и определения типа лесных земель

Кластер	Тип	SWVI
1	Не покрытая лесом площадь	0.083
2		0.085
3		0.123
4		0.125
5		0.187
6		0.237
7		0.252
8		0.255
9		0.276
10	Покрытая лесом площадь	0.295
11		0.340
12		0.354
13		0.355
14		0.378
15		0.422

Пороговое значение составляет 80 % от среднего значения SWVI, рассчитанного для лесных территорий, описанных выше.

Если среднее значение кластера больше среднего значения SWVI леса, то пиксели кластера могут быть переведены в покрытую лесом площадь. Схема, представляющая разработанную методику, приведена на рис. 4.

Данная методика была применена для спутникового снимка, полученного с аппарата Landsat-8, имеющего id LC08_L1TP_181015_20180719_20180731_01_T1.

После классификации снимка рассчитаны средний спектральный индекс SWVI для каждого кластера и среднее значение леса (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ объектов лесовосстановления дистанционными методами показал возможность создания методики перевода лесных земель в покрытую лесом площадь путем определения пороговых значений для спектральных индексов.

Оптимальным пороговым значением для спектрального индекса SWVI было выбрано восстановление индекса до 80 % от первоначального значения, так как расчет первоначального значения индекса для каждого пикселя затруднителен. В методике рассчитывается значение индекса леса, в котором не происходило изменений в виде вырубок или гарей.

Публикация подготовлена по результатам исследования, выполненного в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» по теме «Разработка предложений по обследованию лесных участков для отнесения земель, предназначенных для лесовосстановления, к землям, занятым лесными насаждениями, с использованием дистанционных методов обследования лесных участков».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешко Р. А., Гурьев А. Т., Шошина К. В., Щеников В. С. Разработка методики визуализации и обработки геопространственных данных // Научная визуализация. 2015. № 1. С. 20–29.
- Алешко Р. А., Алексеева А. А., Шошина К. В., Богданов А. П., Гурьев А. Т. Разработка методики актуализации информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 87–99.
- Богданов А. П., Карпов А. А., Демина Н. А., Алешко Р. А. Совершенствование мониторинга лесов путем использования облачных технологий как элемента устойчивого лесопользования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 89–100.
- Временная методика проведения государственного мониторинга воспроизводства лесов в 2016 году. http://ulyanovsk.refh.ru/21_07_2015_3354e.html
- Леса Соловецких островов: по материалам лесоустройства 2003 года / Л. Ф. Ипатов, В. П. Косарев, Л. И. Проурзин, С. В. Торхов. Архангельск, 2005. 59 с.
- Отчет о результатах работ по государственному мониторингу воспроизводства лесов в Мурманской области за 2016 год. ФБУ «Рослесозащита» «Центр защиты леса Ленинградской области». СПб., 2016. С. 42.
- Foley J. A., DeFries R., Asner G. P., Barford C., Bonan G., Carpenter S. R., Snyder P. K. Global consequences of land use // Science. 2005. V. 309. N. 5734. P. 570–574.
- Frazier R. J., Coops N. C., Wulder M. A. Boreal Shield forest disturbance and recovery trends using Landsat time series // Rem. Sens. Environ. 2015. V. 170. P. 317–327.
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Townshend J. R. G. High-resolution global maps of 21st century forest cover change // Science. 2013. V. 342. N. 6160. P. 850–853.
- Pickell P. D., Hermosilla T., Frazier R. J., Coops N. C., Wulder M. A. Forest recovery trends derived from Landsat time series for North American boreal forests // Int. J. Rem. Sens. 2015. V. 37. N. 1. P. 138–149.
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M. C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // Rem. Sens. Environ. 2011. V. 115. N. 2. P. 548–561.

Turner II B. L., Lambin E. F., Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability // PNAS. 2007. V. 104. N. 52. P. 20 666–20 671.

White J. C., Saarinen N., Kankare V., Wulder M. A., Hermosilla T., Coops N. C., 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 // Rem. Sens. Environ. 2018. V. 216. P. 262–275.

Yi K., Tani H., Zhang J., Guo M., Wang X., Zhong G. Long-term satellite detection of post-fire vegetation trends in boreal forests of China // Rem. Sens. 2013. V. 5. N. 12. P. 6938–6957.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR TRANSFERRING FOREST LANDS TO FOREST COVER LANDS BY REMOTE SENSING METHODS

A. A. Karpov^{1,2}, N. R. Pirtskhalava-Karpova¹, A. P. Bogdanov^{1,2},
R. A. Aleshko^{1,2}, V. V. Voronin²

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
Severnaya Dvina Emb., 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation

² Northern Research Institute of Forestry
Nikitov str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation

E-mail: lesnoy.monitoring@gmail.com, nanahoroshaya@gmail.com,
aleksandr_bogd@mail.ru, r.aleshko@gmail.com

Assessment of forest regeneration using remote sensing data is a priority scientific research topic worldwide today. Threshold values for successful reforestation can be defined using multi-temporal satellite scenes and indices for analysis of vegetation on cutting and burned areas. The analysis of successful reforestation has practical value for Russian government organizations for transferring burned and cutting lands to forest cover land. The rate of reforestation depends on climate, soil conditions in the region of studies. Collection of field data and the studies were carried out in northern and middle taiga of Arkhangelsk Oblast. This territory belongs to boreal forest. Calculations of spectral indices for each research object were made using multi-temporal scenes for 20 years based on Google Earth Engine platform. Optimal spectral index was selected based on the analysis of collected data. The optimal threshold values of the index for transferring pixel of satellite imagery to forest cover land were found using this data. Optimal spectral index for transferring non-forest cover to forest cover land SWVI was selected. The optimal threshold value for transfer to forest cover land equals 80 % recovery of the index after a disturbance in forest cover. Method for transferring land to forest cover land was developed based on analysis of dynamic of the spectral index. The result was the spatial layer of transferring land to forest cover land in 2018 on the territory of Severodvinsk and Onega forestry district of Arkhangelsk Oblast.

Keywords: remote sensing methods of monitoring, reforestation, vegetation indices, SWVI, NBR, NDVI, Google Earth Engine, Arkhangelsk Oblast.

How to cite: Karpov A. A., Pirtskhalava-Karpova N. R., Bogdanov A. P., Aleshko R. A., Voronin V. V. Development of a method for transferring forest lands to forest cover lands by remote sensing methods // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2019. N. 6. P. 19–26 (in Russian with English abstract).