

УДК 630\*1

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-83-92

## МЕТОД ОТНЕСЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ К ЗЕМЛЯМ, ЗАНЯТЫМ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ, ПО АЭРОКОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ LANDSAT

*А. Карпов, аспирант-стажер; ResearcherID: [H-1915-2019](https://orcid.org/0000-0002-9087-8399).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9087-8399>*

*Б. Васке, д-р геогр. наук, проф.*

Оснабрюкский университет, ул. Ваксблайхе, д. 27, Оснабрюк, Германия, 49090; e-mail: lesnoy.monitoring@gmail.com

Спутниковые данные становятся важным инструментом для мониторинга изменений, происходящих в лесном покрове. Дальнейшее развитие технологий дистанционного зондирования Земли создает возможности для решения более сложных задач, требующих многократного анализа спутниковых данных. Оценка успешности лесовосстановления после возникновения нарушений в лесном покрове является такой задачей. Традиционный метод оценки успешности лесовозобновления – закладка пробных площадей – требует значительных временных затрат и ресурсов. Полевые работы и отнесение земель к землям, занятым лесными насаждениями, через закладку пробных площадей производятся по методике, разработанной Федеральным агентством лесного хозяйства России. Данная методика имеет различные критерии успешного лесовозобновления для каждого региона. Территориями исследования стали Архангельская и Вологодская области, а также Республика Карелия. Растительность данного региона относится к таежной зоне и разделяется на пять групп: районы притундровых лесов и редкостойной тайги, северо-таежный, среднетаежный и южно-таежный районы. Международная классификация относит данные леса к группе бореальных. Использование спутниковых данных позволит оптимизировать мероприятия по отнесению лесных участков к землям, занятым лесными насаждениями. Проведен анализ индексов восстановления NDVI, SWVI и NBR на объектах лесовозобновления. На каждый исследуемый объект получены полевые данные о количестве подроста, средней высоте древостоя и породном составе. Обработка большого количества спутниковых снимков требует значительных вычислительных мощностей, поэтому для проведения анализа использовалась платформа Google Earth Engine. На основе полученных данных выбран наиболее пригодный для создания автоматической методики по переводу земель в лесопокрываемую площадь индекс SWVI как наилучший спектральный индекс для разделения земель на достигшие и не достигшие критериев отнесения к землям, занятым лесными насаждениями. Оптимальным порогом для перевода земель стало достижение 80 % восстановления от первоначальных значений индекса до возникновения нарушений в лесном покрове. Использование метода  $k$ -средних и пороговых значений индекса для перевода позволило создать автоматизированную методику.

**Для цитирования:** Karpov A., Waske B. Method for Transferring Non-Forest Cover to Forest Cover Land Using Landsat Imageries // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 83–92. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-83-92

**Финансирование:** Данное исследование проведено в рамках проекта «Мониторинг лесов в Архангельской области с использованием данных мультисенсорного дистанционного зондирования», финансируемого Министерством образования и науки России и Германской службой академических обменов в рамках программы «Михаил Ломоносов» (проект № АААА-А19-119020590052-2).

*Ключевые слова:* землепользование, лесное хозяйство, лесовосстановление, Landsat.

### *Введение*

Главной причиной снижения биологического разнообразия, изменения мирового углеродного и гидрологического циклов, климата являются изменения, происходящие в землепользовании [15]. Уменьшение лесного покрова оказывает значительное влияние на поглощение углерода из атмосферы и изменение климата. В настоящее время тропические леса значительно истощены под воздействием лесозаготовительных компаний [10], из-за чего бореальные леса сегодня становятся важным объектом поглощения и переработки углерода в мировом масштабе [4]. К сожалению, данные о бореальных лесах на региональном уровне не являются полными и достаточными для анализа изменений, происходящих на этих территориях. Следовательно, используя существующие данные невозможно точно оценить их влияние на мировой климат и углеродный цикл [4]. Однако существующие системы дистанционного зондирования Земли имеют значительный потенциал для получения пространственно-временных данных о землях лесного фонда и открывают широкие возможности для лучшего понимания закономерностей процессов и коренных причин изменения лесного покрова [1].

Спектральные индексы 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 широко распространены для анализа растительного покрова. Одним из важных моментов их использования является зависимость индексов от фенологического состояния растительного покрова и климатических условий [3, 6]. Скорость лесовосстановительных процессов имеет различный временной период для разных климатических условий. Это утверждение также верно для климатических подзон, в которых расположены бореальные леса. Например, требуются различные периоды времени для достижения 80 % от начальных значений спектрального индекса для экстремально-холодной и холодной климатических подзон бореальных лесов Северной Америки. Для многовременного анализа нескольких климатических зон необходимо определить вегетационный период каждой зоны [13]. Анализ лесных участков на основе компонентов преобразования Tasseled Cap для территорий бореальных лесов Северной Америки показывает, что спектральные индексы имеют период насыщения в течение 30 лет с момента нарушения лесного покрова. Бореальные леса Северной Америки разделяются на западные и восточные массивы, которые имеют различные типы лесовозобновления. Данный факт связан с неравномерным количеством осадков, разными значениями средних температур и типами почв [5, 7, 12].

Степень повреждения лесного покрова, возникающая в результате лесного пожара, служит важным аспектом для лесовозобновления. Ее часто разделяют на пять классов: легкий, низкий, средний, высокий, очень высокий. Она влияет на продолжительность лесовозобновления. Таким образом, спектральный метод, основанный на разности или делении значений спектральных индексов до и после нарушения, является важным показателем для оценки нарушенных лес-

ных территорий. Например, индекс восстановления древостоя и относительный индекс лесовосстановления базируются на значениях индекса NDVI до и после нарушения [8, 9, 18].

Метод несмешиваемого спектрального анализа основывается на предположении, что каждый пиксель может включать различные фракции [11, 19]. Эти фракции называются конечными элементами и могут быть растительностью с фотосинтезом и без фотосинтеза или открытыми почвами. Фракционный растительный покров и NDVI основываются на соотношении разности значений и среднего значения NDVI открытой почвы и растительности [16, 18].

Использование спектральных индексов требует большого количества полевых данных для настройки индексов использования. Оценки лесовосстановления, поиск соотношений между значением индекса с реальными условиями лесовозобновления (структура восстановления растительности, количество и порода деревьев, плотность древесного полога) на площади, покрываемой пикселем спутникового снимка.

Проведенные ранее исследования показали, что земли, покрытые лесом по критериям определения леса от Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, могут с большой точностью быть отделены от нелесных земель, если значения пикселя снимка Landsat достигло 80 % от значения NBR до нарушения лесного покрова [2, 17]. Для наших исследований были использованы данные воздушного лазерного сканирования (ALS) и многовременные данные Landsat.

Практическая задача использования спутниковых снимков для оценки лесовосстановления – нахождение пороговых значений для отнесения лесных участков к землям, занятым лесными насаждениями (ЗЗЛН) после нарушения лесного покрова вследствие вырубок и лесных пожаров.

#### *Объекты и методы исследования*

Основной территорией для исследования стал северо-западный регион России (Архангельская и Вологодская области и Республика Карелия). На данных территориях леса относятся к северной, средней и южной подзоне тайги. Большая часть пробных площадей заложена в Архангельской области, лесистость которой составляет 60 % с доминированием хвойных пород деревьев. Основным лесным покровом является зрелый и перестойный лес с низким лесным запасом. Усредненный породный состав для всей Архангельской области: 70 % ели, 20 % сосны, 10 % березы с небольшим количеством осины.

Архангельская область характеризуется истощением лесных запасов в возрасте спелых и перестойных насаждений. Вырубка древостоя проводится в виде сплошной и выборочной рубки. Кроме того, в соответствии с российскими правилами деления земель северная часть области относится к Арктической сухопутной зоне. В соответствии с данными лесного реестра, датированными 2016 г., земли лесного фонда Арктической сухопутной зоны Архангельской области занимают 39 059 млн га, 29 765 млн га было вырублено, что составляло 76 % от земель лесного фонда.

Основной структурой лесовозобновления, характерной для всех трех регионов, является возобновление на вырубках лиственными породами, которые имеют низкую экономическую ценность для лесозаготовительной отрасли.

Лесовозобновление хвойными породами происходит через смену пород. Естественные процессы восстановления хвойных лесов требуют значительного времени. Отсутствие естественного лесовозобновления на части вырубленных площадей вызвано недостаточным древесным подростом, удалением его в процессе вырубki, отсутствием осеменения или неблагоприятными климатическими условиями.

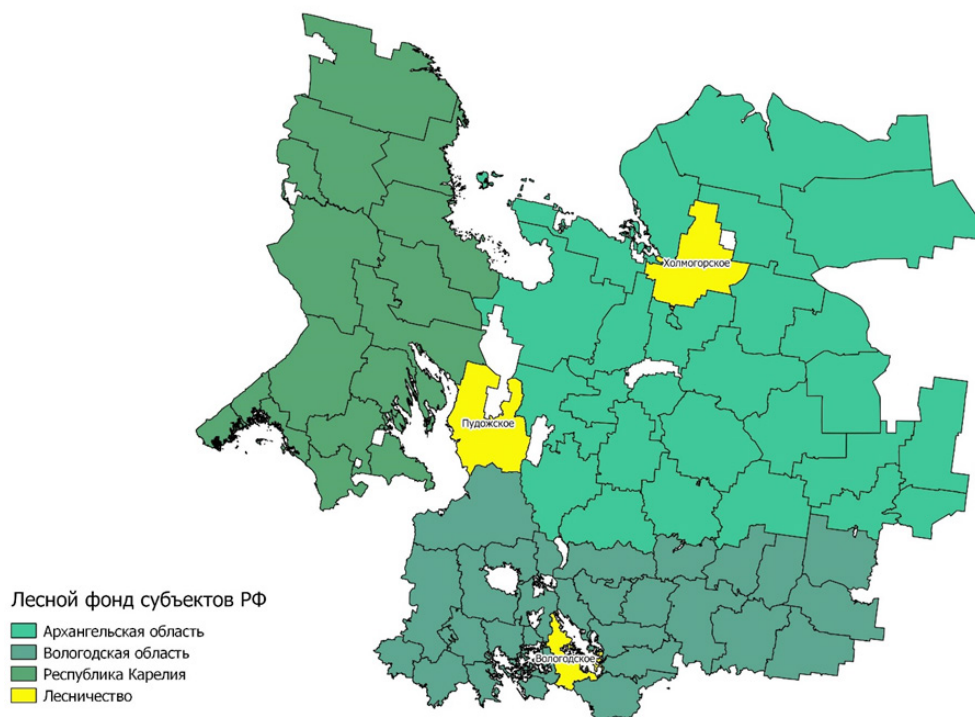


Рис. 1. Регионы, в которых заложены пробные площади

Пробные площади (ПП), заложенные в период с 2015 по 2019 г. (рис. 1), используются для анализа спектральных характеристик лесовозобновления. Полевые работы в 2016–2019 гг. проведены в соответствии с российской временной методикой мониторинга восстановления лесов от 2016 г. [14].

Площади имеют форму квадрата со сторонами, равными 20 м. Количество подроста подсчитывается внутри границ ПП с разделением по породам и по группам высот. На 10 га вырубленной площади закладывается только 1 ПП (рис. 2).

Данные с нескольких ПП на одной вырубке усредняются, заносятся в отчет и используются для принятия решений о переводе нелесопокрытой в лесопокрытую площадь. Методика государственного мониторинга определяет требуемые условия: количество и средняя высота деревьев, параметры ПП для перевода нелесопокрытых площадей в лесопокрытые (табл.).

Таблица

**Условия перевода нелесопокрытых площадей в лесопокрытые**

Древесная порода	Количество деревьев, шт./га	Средняя высота, м
Сосна	1500	0,7
Ель	1500	1,0
Береза, осина, ольха	2000	1,5

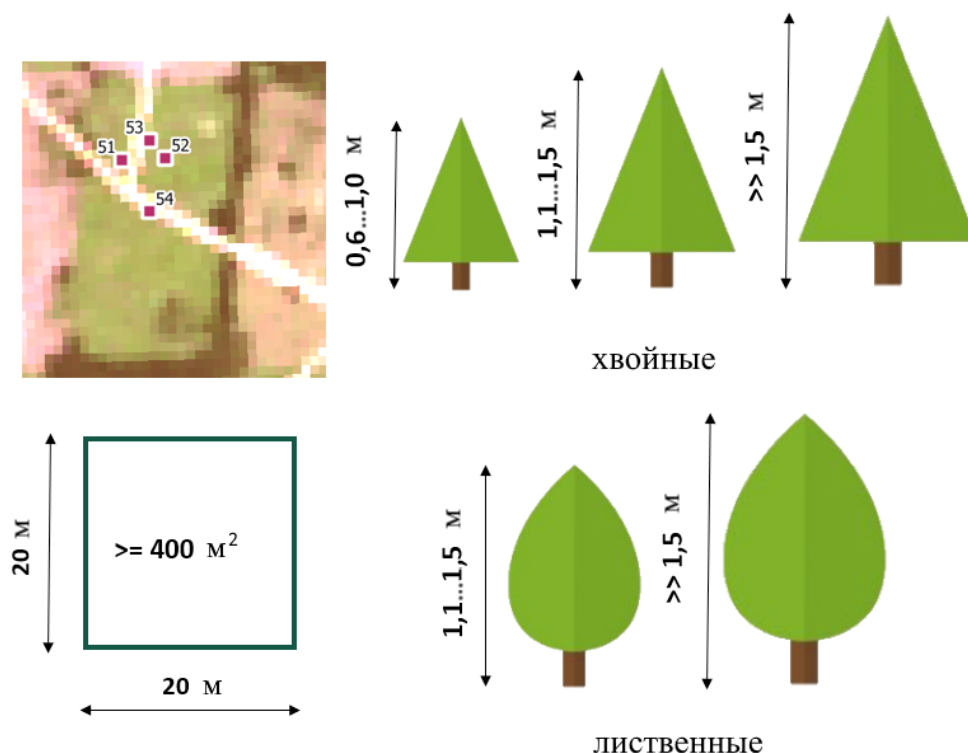


Рис. 2. Метод закладки пробных площадей и группы высот для различных групп пород деревьев

Практически все объекты, на которых были заложены ПП, достигли критериев перевода лесопокрытую площадь в год полевых работ. Количество объектов, на которых заложены ПП – 57.

Для анализа спектральных характеристик ПП использовались спутниковые снимки Landsat 5, 7, 8. Эти изображения имели атмосферную коррекцию, которая уже была сделана для коллекции Google Earth Engine (GEE). Использовались набор данных Global Forest Lost от 2000 до 2017 г. для проведения неуправляемой классификации и набор данных о лесном покрове, датированный 2000 г. [10].

Снимки высокого разрешения сервисов Google и Yandex и набор данных Хансена об уменьшении лесного покрова применялись для создания контуров границ вырубок и гарей.

Работа над проектом была разделена на несколько частей: обработка полевого материала, нанесение границ исследуемых объектов; анализ динамики спектральных индексов NDVI, SWVI, NBR, определение восстановления спектральных индексов после нарушения (вырубка, лесной пожар) на момент полевого обследования; разработка методики для перевода нелесопокрытых площадей в лесопокрытые.

Набор многовременных значений для исследуемых объектов был сделан с использованием платформы Google Earth Engine. Исследуемый объект – вырубленная или сгоревшая площадь, где время полевого обследования закладывались ПП. Индексы рассчитывались с использованием спутниковых снимков со средним разрешением Landsat.

Алгоритм получения значений индексов:

1. Исследуемый объект наносится с использованием снимков высокого разрешения. Он может быть областью лесовосстановления после вырубki или лесного пожара с высокой степенью нарушения.

2. Поиск доступных снимков для каждого исследуемого объекта с использованием нескольких критериев: облачность снимка не более 50 %; временной период только – летние месяцы (с июня по август). Все выбранные изображения включаются в коллекцию.

3. Границы исследуемого объекта увеличиваются на 1000 м. Эта область используется для обнаружения облачных пикселей. Изображение будет исключено из коллекции, если имеет пиксель, содержащий облако в границе.

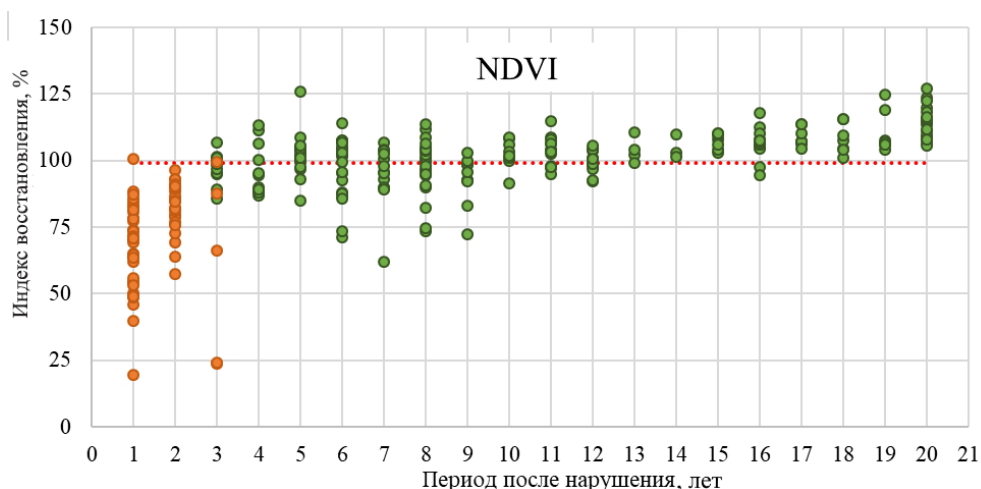
4. Граница исследуемого объекта уменьшается на 30 м. Это исключает пиксели кромки леса и другие объекты, которые не принадлежат вырубкам или выгоревшим площадям.

5. Средние значения индексов NDVI, SWVI и NBR рассчитываются для каждого исследуемого объекта и для каждого спутникового изображения в коллекции.

Скрипт, включающий все шаги доступен по ссылке: <https://code.earthengine.google.com/6ad67cf35ae901ead018832e4482c774> (многовременные средние значения индексов скачиваются на персональный компьютер для дальнейшей обработки).

Следующий шаг – нахождение значений индексов до возникновения нарушения (в год нарушения) и в год проведения полевого обследования. Фенологические различия имеют сильное влияние на значение индексов, поэтому выбираются те, которые имеют близкие даты. Значительное число исследуемых объектов в год нарушения не имеют покрытия спутниковыми снимками. Поэтому для анализа были использованы только значения до нарушения и на момент полевого обследования для каждого исследуемого объекта.

Рассчитанные индексы восстановления, основанные на индексах NDVI, SWVI и NBR, являются косвенными показателями восстановления лесной растительности, и показывают степень лесовосстановления на исследуемых объектах. Для анализа лесовосстановления на исследуемых объектах были получены графики индексов восстановления NDVI, SWVI и NBR (рис. 3).





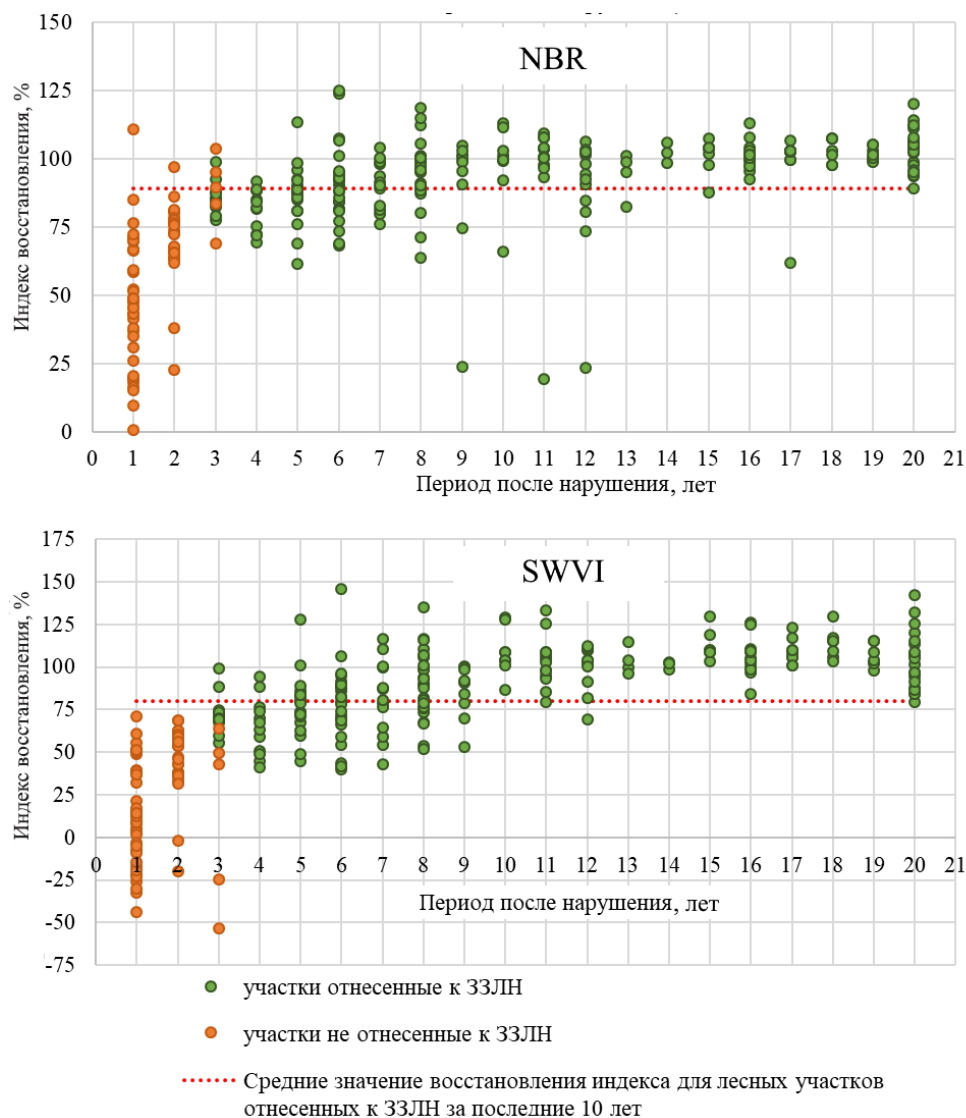


Рис. 3. Индексы восстановления NDVI, NBR и SWVI лесных участков

Мы предлагаем рассчитывать степень восстановления лесов (индекс восстановления) в процентах по следующей формуле:

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

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

Индекс восстановления, основанный на NDVI, не отражает степень восстановления древостоев и не пригоден для разделения земель на лесопокрываемые и нелесопокрываемые. Фактически все исследуемые объекты имеют значение индекса восстановления более 80 %, в том числе и с коротким периодом лесовосстановления (от 1 до 4 лет).

Индекс восстановления, основанный на SWVI и NBR, наиболее перспективен, так как четко отражает степень восстановления древостоя на

вырубках и гарях. Все исследуемые объекты на графиках рисунка 3 с восстановлением индексов делятся на 3 группы: *a* – нелесопокрытые земли с восстановлением индекса менее 80 %; *b* – лесопокрытые земли с восстановлением индекса менее 80 %; *c* – лесопокрытые земли с восстановлением индекса более 80 %.

Анализ графика индекса восстановления SWVI показывает, что исследуемые объекты имеют восстановление более 80 % после 10 лет, часть объектов – от 40 до 80 % в период от 6 до 9 лет. Данные объекты были переведены в лесопокрытую площадь. Объекты, не переведенные в лесопокрытую площадь, имеют восстановление индекса менее 40 %.

#### Результаты исследования

Индекс восстановления на основе SWVI был выбран, как наиболее приемлемый для оценки лесовосстановления после анализа динамики спектральных индексов. Автоматический метод для перевода земель и непокрытой лесной площади в лесопокрытую был разработан на основе метода неубучаемой классификации *k-mean*.

Первый шаг – классификация спутниковых изображений на 15 кластеров, в рамке слоя Хансена уменьшение лесопокрытой площади в период от 2000 до 2014 г. [10]. Среднее значение SWVI было рассчитано для каждого кластера.

Второй шаг – создание маски леса, включающей зрелые и перестойные леса без нарушений. Маска леса создается с помощью слоя лесного покрова [10] и включает пиксели, которые имеют плотность полога 60 % и более. После этого, рассчитывается среднее значение индекса SWVI для маски леса и порог для перевода нелесопокрытых земель в лесопокрытую площадь, который равен 80 % от среднего значения индекса маски леса.

Третий шаг – сравнение средних значений SWVI для каждого кластера с порогом перевода в лесопокрытую площадь.

Схема для перевода земель из нелесопокрытых в лесопокрытые представлена на рис. 4.



Рис. 4. Схема для перевода в лесопокрытые земли

Разработанная методика была применена к спутниковому снимку Landsat 8 с id LC08\_L1TP\_181015\_20180719\_20180731\_01\_T1.



### Выводы

Анализ исследуемых объектов показал возможность создания методики для отнесения нелесопокрытых площадей в лесопокрытые с использованием технологий дистанционного зондирования Земли. Оптимальное пороговое значение индекса восстановления SWVI составляет более 80 %. Расчет начальных значений индексов для каждого пикселя является сложной задачей, поэтому он был выполнен по маске лесов, включающей пиксели спелых и перестойных лесов без нарушений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аleshko P.A., Алексеева A.A., Шошина K.B., Богданов A.П., Гурьев A.T. Разработка методики актуализация 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. [Aleshko R.A., Alekseeva A.A., Shoshina K.V., Bogdanov A.P., Guriev A.T. Development of the Methodology to Update the Information on a Forest Area Using Satellite Imagery and Small UAVs. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2017, vol. 14, no. 5, pp. 87–99]. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99)
2. Аleshko P.A., Гурьев A.T., Шошина K.B., Щеников B.C. Разработка методики визуализации и обработки геопространственных данных / Научная визуализация. 2015. № 1. С. 20–29. [Aleshko R.A., Guriev A.T., Shoshina K.V., Schenikov V.S. Development of Methodology for Visualization and Processing of Geospatial Data. *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific Visualization], 2015, no. 1, pp. 20–29].
3. Богданов A.П., Карпов A.A., Демина H.A., Аleshko P.A. 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. [Bogdanov A.P., Karpov A.A., Demina N.A., Aleshko R.A. Improving Forest Monitoring by Using Cloud Technologies as an Element of Sustainable Forest Management. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2018, vol. 15, no. 1, pp. 89–100]. DOI: [10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100)
4. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29 июня 2016 г. № 375 «Об утверждении Правил лесовосстановления»: Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс» [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation “On the Approval of the Rules of Reforestation” on June 29, 2016 no. 375].
5. Aicardi I., Garbarino M., Lingua A., Lingua E., Marzano R., Piras M. Monitoring Post-Fire Forest Recovery Using Multi-Temporal Digital Surface Models Generated from Different Platforms. *EARSeL eProceedings*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 1–8.
6. Chu T., Guo X., Takeda K. Remote Sensing Approach to Detect Post-Fire Vegetation Regrowth in Siberian Boreal Larch Forest. *Ecological Indicators*, 2016, vol. 62, pp. 32–46. DOI: [10.1016/j.ecolind.2015.11.026](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.026)
7. Frazier R.J., Coops N.C., Wulder M.A. Boreal Shield Forest Disturbance and Recovery Trends Using Landsat Time Series. *Remote Sensing of Environment*, 2015, vol. 170, pp. 317–327. DOI: [10.1016/j.rse.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.015)
8. Gauthier M.-M., Barrette M., Tremblay S. Commercial Thinning to Meet Wood Production Objectives and Develop Structural Heterogeneity: A Case Study in the Spruce-Fir Forest, Quebec, Canada. *Forests*, 2015, vol. 6(2), pp. 510–532. DOI: [10.3390/f6020510](https://doi.org/10.3390/f6020510)

9. Gradel A., Ammer C., Ganbaatar B., Nadaldorj O., Dovdondemberel B., Wagner S. On the Effect of Thinning on Tree Growth and Stand Structure of White Birch (*Betula platyphylla* Sukaczew) and Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) in Mongolia. *Forests*, 2017, vol. 8(4), art. 105. DOI: [10.3390/f8040105](https://doi.org/10.3390/f8040105)
10. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 2013, vol. 342, iss. 6160, pp. 850–853. DOI: [10.1126/science.1244693](https://doi.org/10.1126/science.1244693)
11. Keshava N., Mustard J.F. Spectral Unmixing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, vol. 19, iss. 1, pp. 44–57. DOI: [10.1109/79.974727](https://doi.org/10.1109/79.974727)
12. Pickell P.D., Andison D.W., Coops N.C. Characterizations of Anthropogenic Disturbance Patterns in the Mixedwood Boreal Forest of Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 304, pp. 243–253. DOI: [10.1016/j.foreco.2013.04.031](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.04.031)
13. 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. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, vol. 37, iss. 1, pp. 138–149. DOI: [10.1080/2150704X.2015.1126375](https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1126375)
14. Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-Scale Boreal Forest Cover and Change Mapping Using Landsat Data Composites for European Russia. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, iss. 2, pp. 548–561. DOI: [10.1016/j.rse.2010.10.001](https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.001)
15. Turner B.L., Lambin E.F., Reenberg A. The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability. *PNAS*, 2007, vol. 104(52), pp. 20666–20671. DOI: [10.1073/pnas.0704119104](https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104)
16. Vila J.P.S., Barbosa P. Post-Fire Vegetation Regrowth Detection in the Deiva Marina Region (Liguria-Italy) Using Landsat TM and ETM+ Data. *Ecological Modelling*, 2010, vol. 221, iss. 1, pp. 75–84. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2009.03.011](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.03.011)
17. White J.C., Saarinen N., Kankare V., Wulder M.A., Hermosilla T., Coops N.C. et al. 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*, 2013, vol. 216, pp. 262–275. DOI: [10.1016/j.rse.2018.07.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.004)
18. 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. *Remote Sensing*, 2013, vol. 5, iss. 12, pp. 6938–6957. DOI: [10.3390/rs5126938](https://doi.org/10.3390/rs5126938)
19. Zhao F.R., Meng R., Huang C., Zhao M., Zhao F.A., Gong P., Yu L., Zhu Z. Long-Term Post-Disturbance Forest Recovery in the Greater Yellowstone Ecosystem Analyzed Using Landsat Time Series Stack. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8(11), art. 898. DOI: [10.3390/rs8110898](https://doi.org/10.3390/rs8110898)

Поступила 03.04.19

