

А.А. Карпов, А.П. Богданов, Н.Р. Пирцхалава-Карпова, Н.А. Демина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЗЗ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ В БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСАХ

Введение. Обеспечение экологической безопасности лесов ведется на основе использования данных комплексного мониторинга лесов: лесопатологического, радиационно-экологического, лесопожарного и мониторинга воспроизводства лесов и др. По результатам анализа таких данных принимаются управленческие решения по предотвращению снижения экологической устойчивости лесов, сохранению их полезных свойств в соответствии с целевым назначением. Оценка лесовосстановления одна из актуальных на сегодня задач. Дистанционное Зондирование Земли (ДЗЗ) позволяет оценивать динамику восстановительных сукцессий. При мониторинге лесовосстановления следует рассматривать оценочные критерии отнесения поврежденного участка к лесопокрытой площади. В настоящее время порядок отнесения участков лесного фонда к лесопокрытой площади приведен в Правилах лесовосстановления (2019 г.)^{*}, в которых отражены критерии в зависимости от количества, жизнеспособности, породного состава подроста, типа условий местопроизрастания.

Таким образом, необходимы методы дистанционного мониторинга, обеспечивающие определение точных показателей для оценки лесовосстановления в соответствии с действующим законодательством.

В лесах России ежегодно ведется заготовка около 250 млн кубометров древесины, что в 1,5–2 раза ниже, чем в США, Индии, Бразилии. Лесовосстановление проводится на площади около 800 тыс. га, из них лесные культуры создаются на площади 160–170 тыс. га. На остальной площади вырубок и гарей происходит естественное возобновление лесов. При этом коренные насаждения замещаются производными осинниками и березняками [Исаев, 2016]. Разработка достоверных методов оценки лесовосстановления на пройденных рубкой площадях или в результате воздействия лесного пожара, или ветровала является актуальной задачей.

^{*} Утверждены Приказом Федерального агентства лесного хозяйства № 375 от 25.03.2019. URL: <http://www.rosleshoz.gov.ru> (дата обращения: 15.01.2019).

Целью работы является структурирование существующих знаний по оценке лесовосстановления с применением данных ДЗЗ.

Мониторинг воспроизводства лесов охватывает весь цикл лесохозяйственных мероприятий, начиная от мониторинга вырубок, лесных пожаров, последствий лесных пожаров и других факторов, вызывающих изменения в лесном покрове, заканчивая мониторингом лесовосстановления.

Время восстановления древостоя зависит от факторов окружающей среды. Эффективность лесовозобновления во многом зависит от сочетания абиотических факторов, таких как солнечная радиация, теплообеспеченность, условия увлажнения, освещенность. Климатические условия являются основным фактором, влияющим на рост биомассы, а также на условия осеменения [Цветков, 2009].

Дистанционный мониторинг лесовосстановления можно разделить на несколько этапов:

1) выявление земель, требующих лесовосстановления (причинами формирования площадей, непокрытых лесной растительностью, могут быть лесные пожары, рубки и т. д.);

2) оценка характеристик лесных насаждений, требующих лесовосстановления;

3) перевод земель в лесопокрытую площадь при достижении древесными насаждениями определенных характеристик.

Кроме того, успешность лесовосстановления зависит от таких работ, как минерализация почвы, создание лесных культур, проведение агротехнического и лесоводственного ухода и т. д. Проведением уходов можно добиться формирования высокопродуктивных насаждений из перспективных древесных пород, поэтому в условиях северной тайги через 15–20 лет после сплошных узколесосечных рубок необходимо проводить регламентированные уходы, которые позволят добиться оптимальной густоты перспективных хвойных пород с древесиной заданного качества [Сеннов, 2008; Минин, Захаров, 2013; Беляева и др., 2015; Gauthier et al., 2015; Коновалова и др., 2017; Gradel et al., 2017]. Осуществляемый замкнутый цикл лесохозяйственных мероприятий и проведение научно обоснованных лесохозяйственных мероприятий повысит эффективность ведения лесного хозяйства в целом.

При выполнении анализа лесовосстановления по спутниковым снимкам следует учитывать примененные методы лесовосстановления: естественное, искусственное, комбинированное зарачивание, а также проведенный комплекс лесохозяйственных работ. Проведенные мероприятия

будут влиять на скорость возобновления леса и, следовательно, на спектральные характеристики материалов ДЗЗ.

Критерием успешности лесовозобновления является количество подроста на 1 га и средняя высота деревьев главных пород. В среднем, количество жизнеспособного подроста должно быть свыше 1200 шт. на 1 га. В настоящее время для перевода земель, незанятых лесными насаждениями, в лесопокрытую площадь используется порядок перевода, установленный приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Приказ Минприроды РФ от 01.12.2014 N 529).

Можно сопоставить понятие леса в интерпретации Продовольственной и Сельскохозяйственной Организации ООН, которая определяет лес как участок площадью более 0,5 га, высотой деревьев более 5 м и плотностью полога более 10% [FRA, 2015] и понятие, принятое в Российском законодательстве. В соответствии с ГОСТ 18486–87, лес – элемент географического ландшафта, состоящий из совокупности деревьев, занимающих доминирующее положение, кустарников, напочвенного покрова, животных и микроорганизмов, в своем развитии биологически взаимосвязанных, влияющих друг на друга и на внешнюю среду.

Традиционным методом оценки успешности лесовосстановления является закладка пробных площадей. Проводимые работы включают в себя определение количества жизнеспособного подроста, высоты, породного состава, типов условий местопроизрастания, способа лесовосстановления и др. [Arianoutsou 1984; Clemente et al., 1996; Calvo et al., 2002; Cruz et al., 2003; Mitri and Gitas, 2010]. В зависимости от площади объекта исследования закладывается пропорциональное количество пробных площадей, а расположение и количество на ней подроста должно обладать репрезентативностью для переноса полученных данных на всю исследуемую площадь.

Материалы и методы исследований. Методы дистанционного мониторинга позволяют значительно уменьшить трудоемкость проводимых работ, связанных с полевыми обследованиями. Кроме тех случаев, когда для калибровки и проверки полученных результатов необходимы полевые данные.

В результате анализа литературных источников методы обработки и сбора информации были сгруппированы и представлены в табл. 1. Общим для всех методов, использующих спутниковые снимки оптического диапазона, является выполнение предварительной обработки и перевод значений

яркости пикселей в отражение солнечной энергии и выполнение атмосферной коррекции, с целью устранения влияния атмосферы на значения спектральных характеристик пикселей снимка. Атмосфера и облачность не оказывают влияния на результаты съемки в радарном диапазоне. Для данного диапазона длин волн существенное влияние на результаты съемки оказывает влажность почвенного покрова.

Таблица 1

Методы оценки лесовосстановления

Methods of reforestation assessment

Тип сенсора	Группы методов	Описание методов оценки лесовосстановления по материалам ДЗЗ
Пассивный	Спектральные	Спектральные каналы, индексы, трансформированные изображения
	Пространственные	Текстурные анализ и выделение сегментов по спектральным каналам
	Субпиксельные	Каждый пиксель включает в себя процентное содержание нескольких фракций: фотосинтезирующая растительность, растительность без фотосинтеза, почва. Метод спектральной делимости
	Комбинация спектральных и пространственных характеристик	Совместное использование спектральных каналов, индексов и текстурного анализа
Активный	Радарный	Коэффициент обратного рассеяния, текстурные признаки, инферометрия
	Лидарный (Lidar – Identification Detection and Ranging)	Облако точек для построения трехмерной модели растительности
	Комбинация радарного и лидарного методов	Лидарные данные в данном случае могут использоваться как «виртуальные» полевые данные для обработки радарных снимков
Объединение данных различных сенсоров	Слияние оптических и радарных данных	Слияние оптических и радарных данных для увеличения мультиспектральности используя технику вейвлет-слияния
	Объединение оптических и радарных данных	Объединение радарных или лидарных данных с оптическими мультиспектральными каналами

В рассмотренных статьях большинство исследований основывается на снимках спутника Landsat. Снимки спутниковой группировки Landsat находятся в свободном доступе и их архив датируется от 1972 г. до сегодняшних дней, поэтому эти данные представляют возможность для оценки лесовосстановления по спутниковым снимкам в течение 46 лет.

В настоящей статье рассмотрены в основном данные, полученные с сенсоров оптического диапазона. Также приведен обзор нескольких исследований по анализу лесовосстановления с помощью радарной и лидарной съемки.

Вначале следует рассмотреть группу спектральных методов, применяемых для оценки лесовосстановления. Использование спектральных вегетационных индексов является наиболее простым способом мониторинга. В большинстве исследований на тему лесовосстановления после пожара использовались следующие индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный относительный индекс растительности), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Indices – почвенный вегетационный индекс), TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Indices – трансформированный почвенный вегетационный индекс), MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Indices – модифицированный почвенный вегетационный индекс), fAPAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation – доля поглощённой фотосинтетической активной радиации), NPP (Net Primary Production – суммарная основная продукция), LAI (Leaf Area Index – индекс лиственной площади) [Gitas et al., 2012; Жирин и др., 2012]. Данные индексы широко используются для анализа растительности и являются индикаторами плотности растительного покрова, фотосинтетической активности и условий произрастания растительного покрова [Wang et al., 2008]. Все спектральные индексы, рассмотренные в настоящей обзорной статье, были рассчитаны по снимкам спутников группы Landsat.

Использование спектральных вегетационных индексов требует применения полевых данных для их калибровки при оценке лесовосстановления и верификации полученных результатов. Но по оценкам в приведенной выше статье только небольшое количество исследований имеет полевые данные для этих целей [Gitas et al., 2012].

Анализ графиков изменения спектральных индексов NDVI, SWVI, NBR по годам – один из методов оценки лесовосстановления. Данный метод используется для анализа скорости и времени лесовосстановления [Воробьев и др., 2017; Yi et al., 2013].

Использование графиков изменения спектральных индексов для анализа лесовосстановления не является универсальным методом, так как различные регионы имеют различные условия для роста растительности. Например, влияние на скорость лесовосстановления могут оказывать климатические условия региона. Помимо климатических условий, на рост значения пикселей спутниковых снимков Landsat при лесовосстановительных процессах оказывает влияние преобладания лиственных или хвойных пород и тип леса [Жири́н и др., 2014; Жири́н и др., 2011].

Статья «Тренд лесовосстановления для североамериканских бореальных лесов, полученный по сериям снимков Landsat» [Pickell et al., 2015] рассматривает лесовосстановление в трех различных климатических зонах, которые были классифицированы как экстремально холодная с умеренным увлажнением, холодная с умеренным увлажнением и умеренно холодная с сухим климатом.

Изучаемые в статье территории лежат в различных широтах, поэтому наблюдается фенологический сдвиг. С помощью метода BAP (Best Available Pixel) был определен сдвиг фенологии для различных широт. Данный анализ производился по индексу NDVI, который был рассчитан по сенсору MODIS, установленному на спутниках Terra и Aqua, для центров Landsat сцен. Максимальные значения NDVI обуславливают пик фенологического развития. Описанный метод используется для отбора спутниковых снимков Landsat по критерию близости даты съемки к фенологическому максимуму для каждой широты в отдельности.

Целью статьи является оценка времени восстановления значений индексов до 80% от первоначальных, с момента нарушения лесного покрова. Самый быстрый рост значений наблюдался у индексов NDVI и TCG (Tasseled Cap Greenness) индекс TCG достигает 80% за 2 года, индекс NBR за 6 лет. Значения индекса NBR и среднего инфракрасного канала Landsat 5 имеют более медленный и плавный рост. Для расчета индекса NBR также используется средний инфракрасный канал.

Средний инфракрасный диапазон имеет большую чувствительность к восстановлению древостоя, в отличие от красного и ближнего инфракрасного канала, который имеет большую чувствительность к содержанию в растительности хлорофилла. Индекс NBR, содержащий средний инфракрасный диапазон, обладает большей чувственностью к восстановлению древесной растительности, в то время как значения NDVI резко повышаются при восстановлении травяной растительности [Pickell et al., 2015]

К спектральным методам следует отнести методики, основанные на разности и делении значения вегетационного индекса после возникших нарушений на значение индекса до нарушений. Примером таких индексов являются SRI (Stand Regrowth Index – индекс восстановления древостоя) и RRI (Relative Regrowth Index – относительный индекс лесовозобновления).

При восстановлении леса после пожара важно учитывать тяжесть повреждения территории. Степень повреждения территории часто оценивается в исследовательских статьях пятью классами: очень высокая, высокая, средняя, низкая, легкая. Степень повреждения влияет на требуемый временной период для восстановления леса. График спектральных индексов с участками различной степени повреждения леса имеет различные тренды.

Индекс SRI рассчитывается делением значения NDVI после пожара на значения индекса NDVI до пожара. Следовательно, недостатки, связанные с оценками индексов NDVI, будут отражаться на индексе SRI.

$$SRI_t = \frac{NDVI_{post,t}}{NDVI_{potential}} \cdot 100\%,$$

где $NDVI_{post,t}$ – значения NDVI после пожара на момент времени t ; $NDVI_{potential}$ – максимальные значения NDVI до пожара.

Индекс RRI был создан для анализа спутниковых изображений разных лет. Данный индекс имеет большую стабильность, чем SRI. Участки для оценки допожарных значений данного индекса выбираются на одних и тех же спутниковых изображениях, где выбираются участки, пострадавшие от пожаров.

$$RRI_t = NDVI_{B,t} - NDVI_{C,t},$$

где $NDVI_{B,t}$ – значения NDVI сгоревших участков леса; $NDVI_{C,t}$ – значение NDVI несгоревших контрольных участков.

Эти индексы были рассчитаны по снимкам спутника Landsat 5 и имеют схожий период мониторинга лесовосстановления, который равен 15–20 лет (Yi et al., 2013).

Ряд научных статей для анализа лесовосстановления используют трансформацию Tasseled Cap. Tasseled Cap – частный случай метода главных компонент, который трансформирует спектральные характеристики спутникового изображения в условные координаты: «яркость», «зеленость», «влажность». «Зеленость» является индикатором содержания хлорофилла. «Влажность» более чувствительна к структуре леса. «Яркость»

в основном связана с отражательной способностью поверхности. Значения яркости обычно являются высокими для открытой почвы, также яркость является хорошим показателем для обнаружения изменений в лесном покрове.

В статье «Тренд нарушения и лесовосстановление бореального лесного массива по сериям снимков Landsat» [Frazier et al., 2015] оценивается лесовосстановление на западном и восточном лесных канадских массивах. Материалы статьи показывают, что после лесных пожаров значения компонентов Tasseled Cap влажность и зеленость растут, яркость падает. Такой характер изменений свойственен лесовосстановлению при рассмотрении этого процесса в рамках трансформации Tasseled Cap. Период анализа лесовосстановления равен 29 годам, далее значения каналов сравниваются со значениями спелого леса. Установлено, что два изучаемых бореальных массива в Канаде имели различный характер восстановления леса. Этот факт может быть вызван разницей в осадках, различием средних температур и различными типами почв, а также различным типом лесовосстановления. Например, один из этих массивов западный канадский бореальный лесной массив характеризовался восстановлением широколиственных лесов [Frazier et al., 2015].

В статье «Долгосрочный мониторинг восстановления леса после нарушения в экосистеме большого Йеллоустона с помощью временного ряда Landsat» [Zhao et al., 2016] описываются методы оценки лесовосстановления после лесных пожаров и вырубок на основе пространственного анализа. Исследователи для мониторинга лесовосстановления использовали алгоритм Landsat Time Series Stack-Vegetation Change Tracker (LTSS-VCT). Данный алгоритм используется для обнаружения изменений в лесном покрове и отслеживания спектрального трека лесовосстановления. Под понятием трека лесовосстановления подразумевается происходящие изменения спектральных индексов или значений спектральных каналов спутникового снимка во временном диапазоне. Данный трек можно представить в виде линейной диаграммы. Алгоритм основан на индексе IFZ (Integrated forest-z score – интегрированная оценка z-леса), и период мониторинга равен примерно 20 годам (исследование включает анализ снимков за период от 1984 до 2011 годов). Для анализа использовались снимки за вегетационный период (май-сентябрь) и облачностью менее 5%. Если на данный период было несколько безоблачных изображений, то выбиралось изображение с большим значением индекса NDVI. Для закрытой облачностью территории строилась мозаика из нескольких изображений. Точность

работы алгоритма составила 80%. Точность определения лесовосстановления на вырубках выше, чем точность восстановления леса на лесных гарях. Данный алгоритм разделяет лесонарушения на вырубки и лесные гари, используя для классификации метод опорных векторов. Для разделения гарей по классам повреждений от пожаров используется спектральный индекс RdNBR (difference Normalized Burn Ratio – разность нормализованного индекса гари).

Индекс IFZ после обнаружения изменений в лесном покрове имеет значительный рост и затем, в течение 20 лет, плавное уменьшение. IFZ не имеет отрицательных значений. Участки со спелыми насаждениями на снимках имеют значение индекса близкое к 0 [Zhao et al., 2016].

Индекс FRI основывается на индексе IFZ и подробно описывается в статье «Детектирование послепожарного лесовосстановления лиственницы в Сибирских бореальных лесах дистанционными методами» [Chu et al., 2016].

Выражение для расчета индекса FRI, который сравнивает значение каждого пикселя со средним значением пикселей леса:

$$FRI = \frac{1}{IFZ}.$$

В свою очередь, индекс IFZ рассчитывается по следующей формуле:

$$IFZ = \sqrt{\frac{1}{NB} \cdot \sum_{i=1}^{NB} (FZ_i)^2},$$

где NB – количество используемых каналов. Для спутниковых изображений Landsat используется красный канал и 2 инфракрасных канала; FZ_i – Forest z-score;

$$FZ_i = \frac{b_{pi} - b_i}{SD_i},$$

где b_{pi} – значение пикселя; b_i – среднее значение пикселя для данной выборки; SD_i – среднее отклонение данной выборки.

Применение метода спектрального разделения относится к субпиксельному анализу. Метод основывается на том, что каждый пиксель спутникового снимка содержит в себе определенное количество фракций, таких как растительность, открытая почва, вода. Данное разделение на фракции весьма условно и в разных исследованиях могут выделяться разные фракции. Для анализа лесной растительности с целью выявления

нарушений по спутниковым снимкам часто выделяются следующие фракции: растительность с фотосинтезом, растительность без фотосинтеза и открытая почва. Данные фракции называются *endmembers* и имеют хорошую спектральную разделимость [Keshava, 2002].

Данная методика была использована в исследовании, описанном в следующей статье «Детектирование послепожарного лесовосстановления лиственницы в Сибирских бореальных лесах дистанционными методами» [Chu et al., 2016], которое описывает два спектральных индекса Forest Recovery Index (FRI) и Fractional Vegetation Cover (FVC). FVC индекс основывается на методе спектральной разделимости.

Индекс FVC рассчитывается по следующей формуле:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s},$$

где NDVI – значения NDVI пикселя; $NDVI_v$ – средние значения NDVI для растительности; $NDVI_s$ – средние значения NDVI для открытых почв.

Для расчета значений фракции NDVI по снимкам Landsat использовался снимок WorldView-2 высокого разрешения для выделения участков с растительностью и участков с открытой почвой. График индекса FVC для сгоревшего участка леса похож на график спектральных индексов, основанных на индексе NDVI. Значения индекса FVC после пожара значительно увеличиваются на протяжении первых 5 лет, следующие 15 лет рост незначительный, затем значения индекса приближаются к значениям спелого леса. Эта структура роста индекса наиболее отчетливо видна для территорий с высокой степенью повреждения.

В статье «Детектирование восстановления растительности после пожара в регионе Дейва Марина с использованием данных Landsat TM и ETM+» [Vilaa, 2010] рассматривается индекс *fNDVI* для мониторинга лесовосстановления. Данный индекс имеет схожую формулу с индексом FVC:

$$fNDVI = 1 - \left(\frac{NDVI_g - NDVI}{NDVI_g - NDVI_s} \right)^{0,6175}.$$

Значение индекса *fNDVI* сравнивается со значениями индекса до пожара в течение 10 лет [Vilaa, 2010].

График индекса FRI имеет совершенно иную структуру, в отличие от графика индекса FVC. После 20 лет восстановления леса на исследуемой

территории происходило плавное увеличение данного индекса. Исследователи, использующие индекс FVC, утверждают, что индекс возможно использовать для мониторинга лесовосстановления на протяжении 30–47 лет, но данное утверждение является всего лишь интерполяцией значений FVC индекса и не подтверждено практическими исследованиями [Chu et al., 2016].

По мнению авторов статьи, можно эффективно использовать систему мониторинга лесовосстановления, основанную на двух индексах FVC и FRI. FVC для мониторинга в течение первых двадцати лет и FRI в течение последующего периода восстановления [Chu, 2016].

Спутниковый радар SAR (Synthetic-aperture radar – радар с синтетической апертурой) предоставляет альтернативный подход для мониторинга лесов. В статье «Чувствительность данных радара с синтезированной апертурой к послепожарному лесовосстановлению в средиземноморских и бореальных лесах» [Tanase et al., 2011] описывается использование спутниковых изображений Envisat Advanced Synthetic Aperture (ASAR), Advanced Land Observing Satellite (ALOS), Phased Array-type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) для оценки лесовосстановления в радарном диапазоне. Исследователи в данной статье определили радарный диапазон L, наиболее подходящим для мониторинга восстановления леса, так как данный диапазон наиболее чувствителен к структуре леса. Данные в радарном диапазоне позволяют оценивать лесовосстановление на временном промежутке в 60 лет [Tanase, 2011].

Альтернативный подход также был рассмотрен в статье «Мониторинг послепожарного лесовосстановления с использованием мультивременных цифровых моделей поверхности, созданных различными платформами» [Aicardi et al., 2016]. Метод, рассмотренный в статье, использует данные LiDAR и снимки высокого разрешения, полученные с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для оценки лесовосстановления на территориях, поврежденных пожарами. Данные LiDAR позволяют оценивать геометрические и структурные свойства объектов с помощью построения трехмерной модели поверхности. Используя технологию LiDAR, были построены цифровые модели поверхности в 2008 и 2015 г. Данные модели могут различаться по точности, которая зависит от количества точек на квадратный метр. Цифровая модель поверхности Земли 2008 года была создана с точностью – 1 точка на квадратный метр, а модель 2015 года – 10 точек на метр квадратный. Вычитая разновременные цифровые модели поверхности земли, можно оценивать изменение высоты. Отрицательные значения раз-

ности будут относиться к участкам вырубок и последствий лесных пожаров, положительные к участкам, где происходят процессы восстановления леса. Следовательно, используя данный подход, можно анализировать лесовосстановление на конкретном участке местности [Aicardi et al., 2016].

Результаты и их обсуждение. В большинстве рассмотренных исследований, проводимых с целью оценки лесовосстановления, используются вегетационные индексы. Индекс NDVI является наиболее распространенным. Период «пресыщения» индекса NDVI равняется 15–20 лет для бореальных лесов. Для тропических лесов равняется 7 годам. Данный период зависит от географической широты и климатических условий. Период «пресыщения» – время, за которое индекс достигает значений нетронутого леса.

Также могут использоваться прочие индексы, например FVC, f-NDVI.

Графики изменения значений индекса NDVI при успешном лесовосстановлении и других индексов, основанных на нем, схожи. Индекс NDVI, как правило, демонстрирует значительный рост в первые 5 лет, который в последующие 15 лет замедляется. Это обусловлено тем, что при расчете значений индекса NDVI используются красный и инфракрасный диапазоны волн, которые чувствительны к изменению хлорофилла в растительности. В статье [Vilaa, 2010] рассматривается процесс лесовосстановления на пострадавших от огня участках леса. В первые 5 лет происходит активное восстановление напочвенного покрова и рост индекса NDVI обуславливается данным процессом. После первых 5 лет на рост NDVI начинает влиять восстановление древостоя. Рост древостоя и увеличение биомассы объясняет дальнейший (уже не такой значительный, как прежде) рост значения индекса [Gitas et al., 2012].

Главным недостатком индекса NDVI и индексов, основанных на нем, является его нестабильность. Индекс имеет значительную чувствительность к содержанию хлорофилла в растительности. Один и тот же участок растительного покрова может иметь различные значения индекса в различные годы. Развитие растительного покрова зависит от сезонных температур, количества осадков, количества солнечных дней в фенологический период и еще от ряда природных факторов, которые не являются постоянными.

Метод пространственного анализа, основанный на индексе FRI, показал возможность мониторинга лесовосстановления в течение 47 лет на основе снимков оптического сенсора [Keshava, 2002].

Главным преимуществом использования радарных данных, помимо возможности анализа лесовосстановления в течение 60 лет, является тот факт, что для радарного диапазона облачность не является преградой, что также расширяет возможности мониторинга. Для съемок в оптическом диапазоне длин волн получение полностью безоблачных снимков является редкостью, поэтому для обеспечения полного покрытия спутниковыми изображениями значительных по площади территорий приходится собирать мозаику (изображение, собранное из множества спутниковых изображений с различными датами и атмосферными условиями). Неоднородность мозаики вносит определенные погрешности при анализе и сравнении изображений [Tanase, 2011].

Если оптические спутниковые снимки требуют атмосферной коррекции, то радарные данные требуют коррекции по данным влажности почвенного покрова, так как этот фактор оказывает влияние на радарные снимки.

Преимуществом снимков Landsat является их бесплатность, в то время как радарные снимки обладают значительной стоимостью, кроме снимков Sentinel 1. Сенсор Sentinel 1 работает в C-диапазоне, который значительно уступает по чувствительности к структуре леса сенсорам, работающим в L-диапазоне.

Проанализированные статьи показали, что большинство исследований используют снимки Landsat. Снимки высокого разрешения со спутников применяются в исследованиях в качестве вспомогательного материала.

Заключение. Мониторинг лесовосстановления является на сегодняшний день темой, недостаточно изученной в связи с небольшим количеством исследований и сложностью темы. Для проведения качественного исследования требуется сбор большого количества полевых данных, выбор спутниковой съемки, анализ снимков, разработка метода оценки и подбор подходящего алгоритма, верификация результатов.

Анализ статей показал, что любая работа, связанная с анализом растительности по спутниковым снимкам, имеет стандартные этапы проведения:

- 1) закладка пробных площадей и сбор полевых данных;
- 2) сопоставление полевых данных с данными спутникового изображения, поиск наилучшего метода для анализа данных;
- 3) выбор алгоритма для анализа;
- 4) верификация полученных результатов.

Таблица 2

Сводная таблица методов для анализа лесовосстановления, рассмотренных в статье

Summary table of methods for analysis of reforestation considered in the article

Методы для анализа лесовосстановления	Спутник	Период возможного мониторинга, лет
NDVI, SWVI, NBR	Landsat	15–20
SRI, RRI, FVC, fNDVI		15–20
FRI		30–47
Tasseled Cap		29
SAR	PALASAR	60

Рассмотренные в статье методы были сведены в табл. 2 с указанием возможного периода мониторинга лесовосстановительных процессов на месте лесных пожаров.

Спутниковые снимки группировки Landsat являются наиболее используемыми ввиду их доступности. Данные снимки подходят для оценки горизонтальной структуры растительности, например, оценки плотности полога растительности. Для оценки вертикальной структуры растительности больше подходят радарные данные. Например, радарные данные подходят для оценки средней высоты леса. Стереоизображения также могут использоваться для оценки вертикальной структуры леса. Такие изображения создаются из серии оптических снимков, снятых под различным углом.

Длинноволновый радиодиапазон наиболее подходит для оценки вертикальной структуры леса. Облачность не является проблемой. Присутствующие на снимке шумы и невозможность разделять растительность по типам и породам являются недостатком использования радарных данных.

Для радарных и оптических данных существует предел насыщения, после которого оценка увеличения биомассы невозможна. Лидарные данные не имеют этого недостатка, но существенно дороги, чтобы использовать их для мониторинга лесовосстановления на больших площадях.

Как показал выполненный обзор научных статей, не все исследования используют полевые данные для оценки лесовосстановления, что делает результаты таких исследований неприменимыми для практических целей [Lu et al., 2014].

Приведенные в методы в описанных выше статьях могут использоваться для перевода земель, не покрытых лесом, в земли, занятые лесными насаждениями. Для адаптации методик необходимо проведение полевых работ и определение порога для перевода земель в земли, занятые лесными насаждениями.

Библиографический список

Беляева Н.В., Данилов Д.А., Ицук Т.А. Товарная структура ельников кисличных, пройденных рубками ухода // Аграрный научный журнал. 2015. № 1. С. 7–14.

Воробьев О.Н., Воробьев Э.А. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Завольжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. № 14(2). С. 84–97.

Жиринов В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П., Зукерт Н.В. Сезонная информативность многоспектральных космических снимков высокого разрешения при изучении породно-возрастной динамики лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. № 9(1) С. 87–94.

Жиринов В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках Landsat // Лесоведение. 2014. № 5. С. 3–12.

Жиринов В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Использование материалов съемок при оценке восстановительной динамики лесов на равнинных территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С. 208–216.

Исаев А.С. Тезисы выступления перед Советом федераций, 2016.

Коновалова М.Е., Данилина Д.М., Назимова Д.И. Формирование кедровников рубками ухода в черневом поясе западного Саяна // Лесоведение. 2017. № 5. С. 16–27.

Минин Н.С., Захаров А.Ю. Рост сосняков искусственного происхождения под влиянием рубок ухода // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 6. 2013. С. 60–64.

Панфилов А.В. Экологические основы устойчивого лесопользования России: доклад на заседании Федерального экологического совета. URL: <https://www.mnr.gov.ru/activities/detail.php?ID=138090&print=Y>

Сеннов С.Н. Результаты длительных наблюдений за естественным ростом древостоев и влияние на него рубок ухода. СПб.: СПбНИИЛХ, 2008. 29 с.

Цветков В.Ф. Этюды экологии леса: монография. Архангельск: АГТУ, 2009. 354 с.

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. [Data set]. EARSeL eProceedings. 2016.

Arianoutsou M. Post-fire successional recovery of a phryganic (East Mediterranean) ecosystem // *Acta Oecol. (Oecol. Plant.)*. 1984. No. 5(19). P. 287–394.

Calvo L., Tarrega R., Luis E. The dynamics of Mediterranean shrubs species over 12 years following perturbations // *Plant ecology*. 2002. No. 160. P. 25–42.

Chu T., Guo X., Takeda K. Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest // *Ecological Indicators*. 2016. No. 62. P. 32–46.

Clemente A., Rego F., Correia A. 1996. Demographic patterns and productivity of post-fire regeneration in Portuguese Mediterranean maquis // *Int. J. of Wildland Fire*. 1996. No. 6(1). P. 5–12.

Cruz A., Pérez B., Moreno J.M. Resprouting of the Mediterranean type shrub *Erica australis* with modified lignotuber carbohydrate content // *J. Ecol.* 2003. No. 91. P. 348–356.

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. No. 170. P. 317–327.

Gauthier 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. No. 6 (2). P. 510–532.

Gitas I., Mitri G., Veraverbeke S., Polychronaki A. Advances in Remote Sensing of Post-Fire Vegetation Recovery Monitoring – A Review. In *Remote Sensing of Biomass – Principles and Applications*, 2012.

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), no. 105.

Vilaa 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. No. 210. P. 75–84.

Keshava N. Performance comparisons for spectral unmixing algorithms // *Descour M.R., Shen S.S. et al. Imaging Spectrometry VII*, 2002.

Lu D., Chen Q., Wang G., Liu L., Li G., Moran E. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems // *International Journal of Digital Earth*. 2014. No. 9(1). P. 63–105.

Tanase M., Riva J., Santoro M., Pérez-Cabello F., Kasischke E. Sensitivity of SAR data to post-fire forest regrowth in Mediterranean and boreal forests // *Remote Sensing of Environment*. 2011. No. 115. P. 2075–2085.

Mitri G., Gitas I.Z. Mapping postfire vegetation recovery using EO-1 Hyperion imagery // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010. No. 48. P. 1613–1618.

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. No. 37(1). P. 138–149.

The Forest Resources Assessment Programme (FRA). 2015. URL: <http://www.fao.org/docrep/017/ap862e/ap862e00.pdf>

Thuan Chua, Xulin Guoa, Kazuo Takeda. Long-Term Satellite Detection of Post-Fire Vegetation Trends in Boreal Forests of China // *Remote Sensing*. 2013. No. 5. P. 6938–6957.

Wang J., Meng J.J., Cai Y.L. Assessing vegetation dynamics impacted by climate change in the southwestern karst region of China with AVHRR NDVI and AVHRR NPP time-series // *Environ. Geol.* 2008. No. 54. P. 1185–1195.

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. No. 5(12). P. 6938–6957

Zhao F., Meng R., Huang C., Zhao M., Zhao F., Gong P., ... Zhu Z. Long-Term Post-Disturbance Forest Recovery in the Greater Yellowstone Ecosystem Analyzed Using Landsat Time Series Stack // *Remote Sensing*. 2016. No. 8(11). P. 898.

References

Belyaeva N.In. Danilov D.A., Ischuk T.A. Commodity structure of spruce stands sorrel passed thinnings. *Agricultural research magazine*, 2015, no. 1, pp. 7–14.

Vorobev O.N., Kurbanov E.A. Remote monitoring of vegetation regeneration dynamics on burnt areas of Mari Zavolzhje forests. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa*, 2017, no. 14(2), pp. 84–97. (In Russ.)

Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P., Zukert N.V. Seasonal information content of high-resolution multispectral satellite images in the study of species-age dynamics of forests. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa*, 2012, no. 9(1), pp. 87–94. (In Russ.)

Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlin S.P. Dynamics of the spectral brightness of the breed-the age structure of the groups of forest types on satellite images Landstad. *Russian Journal of Forest Science*, 2014, no. 5, pp. 3–12. (In Russ.)

Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. The Use of survey materials in assessing the regenerative dynamics of forests in flat areas. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa*, 2011, vol. 8, no. 2, pp. 208–216. (In Russ.)

Isaev A.S. Abstracts of speeches to the Council of federations, 2016. (In Russ.)

Kononov M.E., Danilin D.M., Nazimova D.I. Formation of the cedar thinnings in the dark zone of the Western Sayan mountains. *Russian Journal of Forest Science*, 2017, no. 5, pp. 16–27. (In Russ.)

Minin N.S., Zakharov A.Yu. Growth of pine forests of artificial origin under the influence of felling. *Scientific notes of Petrozavodsk state University*, 2013, no. 6, pp. 60–64. (In Russ.)

Panfilov A.V. Ecological bases of sustainable forest management of Russia Report at the meeting of the Federal environmental Council. URL: <https://www.mnr.gov.ru/activities/detail.php?ID=138090&print=Y> Oh

Sennov S.N. The results of long-term observations of the natural growth of forest stands and the impact of felling care. SPb.: St. Petersburg forestry research Institute, 2008. 29 p. (In Russ.)

Tsvetkov V.F. Studies of the ecology of the forest: monograph. Arkhangelsk: ASTU, 2009. 354 p.

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. [Data set]. EARSeL eProceedings. 2016.

Arianoutsou M. Post-fire successional recovery of a phryganic (East Mediterranean) ecosystem. *Acta Oecol. (Oecol. Plant.)*, 1984, no. 5(19), pp. 287–394.

Calvo L., Tarrega R., Luis E. The dynamics of Mediterranean shrubs species over 12 years following perturbations. *Plant ecology*, 2002, no. 160, pp. 25–42.

Chu T., Guo X., Takeda K. Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest. *Ecological Indicators*, 2016, no. 62, pp. 32–46.

Clemente A., Rego F., Correia A. Demographic patterns and productivity of post-fire regeneration in Portuguese Mediterranean maquis. *Int. J. of Wildland Fire*, 1996, no. 6(1), pp. 5–12.

Cruz A., Pérez B., Moreno J.M. Resprouting of the Mediterranean type shrub *Erica australis* with modified lignotuber carbohydrate content. *J. Ecol.*, 2003, no. 91, pp. 348–356.

Frazier R.J., Coops N.C., Wulder M.A. (2015). Boreal Shield forest disturbance and recovery trends using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 2015, no. 170, pp. 317–327.

Gauthier 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, no. 6 (2), pp. 510–532.

Gitas I., Mitri G., Veraverbeke S., Polychronaki A. Advances in Remote Sensing of Post-Fire Vegetation Recovery Monitoring – A Review. In *Remote Sensing of Biomass – Principles and Applications*, 2012.

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), no. 105.

Vilaa 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, no. 210, pp. 75–84.

Keshava N. Performance comparisons for spectral unmixing algorithms. *M.R. Descour, S.S. Shen et al. Imaging Spectrometry VII*, 2002.

Lu D., Chen Q., Wang G., Liu L., Li G., Moran E. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 2014, no. 9(1), pp. 63–105.

Tanase M., Riva J., Santoro M., Pérez-Cabello F., Kasischke E. Sensitivity of SAR data to post-fire forest regrowth in Mediterranean and boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, 2011, no. 115, pp. 2075–2085.

Mitri G., Gitas I.Z. Mapping postfire vegetation recovery using EO-1 Hyperion imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, no. 48, pp. 1613–1618.

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, no. 37(1), pp. 138–149.

The Forest Resources Assessment Programme (FRA). 2015. URL: <http://www.fao.org/docrep/017/ap862e/ap862e00.pdf>

Thuan Chua, Xulin Guoa, Kazuo Takeda. Long-Term Satellite Detection of Post-Fire Vegetation Trends in Boreal Forests of China. *Remote Sensing*, 2013, no. 5, pp. 6938–6957.

Wang J., Meng J.J., Cai Y.L. Assessing vegetation dynamics impacted by climate change in the southwestern karst region of China with AVHRR NDVI and AVHRR NPP time-series. *Environ. Geol*, 2008, no. 54, pp. 1185–1195.

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, no. 5(12), pp. 6938–6957

Zhao F., Meng R., Huang C., Zhao M., Zhao F., Gong P., ... Zhu Z. Long-Term Post-Disturbance Forest Recovery in the Greater Yellowstone Ecosystem Analyzed Using Landsat Time Series Stack. *Remote Sensing*, 2016, no. 8(11), p. 898.

Материал поступил в редакцию 18.04.2019

Карпов А.А., Богданов А.П., Пирцхалава-Карпова Н.Р., Демина Н.А. Использование ДЗЗ для мониторинга лесовосстановления в бореальных лесах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 229. С. 23–43. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.229.23-43

Оценка лесовосстановления по спутниковым снимкам и создание системы мониторинга является важной задачей на сегодняшний день. Российские и зарубежные ученые проводят исследования в этом направлении, но анализ лесовосстановления является сложной темой исследования в отличие от выявления вырубок и гарей по спутниковым снимкам. Лесовосстановление также является сложным, многофакторным процессом, зависящим от множества факторов. Данная статья описывает мировой опыт создания различных методик для мониторинга

лесовосстановления, используя различные подходы анализа данных и сенсоры, установленные на спутниках. В рамках статьи рассмотрено применение оптических, радарных снимков и данных, полученных с лидарных сенсоров. Это попытка структурировать накопленный опыт в данной сфере и сгруппировать разработанные методики для анализа их преимуществ и недостатков. Тип сенсора определяет длительность периода мониторинга. Радарные данные позволяют определять процесс лесовосстановления до 60 лет в отличие от оптических сенсоров, которые имеют значительно меньший период оценки лесовосстановления. Применение радарных данных может быть ограничено стоимостью работы и сложностью обработки радарных данных, поэтому использование тех или иных методик может иметь финансовые ограничения. Данный обзор показывает все основные методы оценки лесовосстановления.

Ключевые слова: мониторинг, лесовосстановление, дистанционное зондирование Земли, спектральные индексы.

Karpov A.A., Bogdanov A.P., Pirtskhalava-Karpova N.R., Demina N.A. Using remote sensing for monitoring of reforestation in boreal forest. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2019, is. 229, pp. 23–43 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.229.23-43

Assessment of reforestation using satellite images and creation of a monitoring system is an important task today. Russian and foreign scientists are conducting research in this direction, but the analysis of reforestation is a complex topic of research in contrast to the detection of cuttings and burned areas by satellite images. The process of reforestation is a complex, multi-factor process depending on many factors. This article describes the world experience of creating different methods for monitoring forest regeneration and uses different approaches to data analysis and sensors installed on satellites. In the framework of article was considered using of optical, radar images and data obtained from lidar sensors. This is an attempt to structure the accumulated experience in this field and group the developed methods to analyze their advantages and disadvantages. Data from different sensors have different monitoring period. Radar data allow determining the process of reforestation up to 60 years in contrast to optical sensors, which have a much shorter period of reforestation assessment. The using of radar data were limited by the cost of operation and complexity of radar data processing and using of certain techniques may have financial limitations. This review showed all the main methods of assessment of reforestation.

Key words: monitoring, reforestation, Remote Sensing, spectral indexes.

КАРПОВ Александр Анатольевич – инженер-исследователь Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства.

163062, ул. Никитова, д. 13 г. Архангельск, Россия. E-mail: lesnoy.monitoring@gmail.com

KARPOV Aleksandr A. – research engineer FBI Northern Research Institute of Forestry.

163062. Nikitov str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: lesnoy.monitoring@gmail.com

БОГДАНОВ Александр Петрович – старший научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства.

163062, ул. Никитова, д. 13 г. Архангельск, Россия. E-mail: aleksandr_bogd@mail.ru

BOGDANOV Aleksandr P. – senior researcher FBI Northern Research Institute of Forestry.

163062. Nikitov str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: aleksandr_bogd@mail.ru

ПИРЦХАЛАВА-КАРПОВА Нана Роландиевна – аспирант Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова.

163000, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: nanahoroshaya@gmail.com

PIRTSKHALAVA-KARPOVA Nana R. – PhD student Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

163000. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: nanahoroshaya@gmail.com

ДЕМИНА Надежда Александровна – старший научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: nadya2100@mail.ru.

DEMINA Nadezhda A. – senior researcher FBI Northern Research Institute of Forestry.

163062. Nikitov str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: nadya2100@mail.ru