

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СМЕШАННЫХ НАСАЖДЕНИЙ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ СО СПУТНИКА SENTINEL-1

© 2023 г. В. М. Сидоренков^а, В. Н. Косицын^б, Л. А. Бадак^с, Д. О. Астапов^а, Ю. С. Ачиколова^{а, *}

^аФБУ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства,
Пушкино, Россия

^бФедеральное агентство лесного хозяйства, Москва, Россия

^сАО Российские космические системы, Москва, Россия

*E-mail: pipintook@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.03.2022 г.

В работе приведены исследования по использованию радиолокационных данных с сенсора Sentinel-1 для определения таксационных показателей смешанных насаждений. Экспериментальные работы выполнены на территории Костромской, Вологодской, Архангельской областей, Удмуртской республики. На основе результатов экспериментальных исследований определены зависимости количественных и качественных показателей насаждений с параметрами радиолокационной съемки. Полученные результаты позволяют осуществить зонирование исследуемой территории по запасу и полноте насаждений.

Ключевые слова: радиолокационные данные, Sentinel-1, таксационные показатели, запас, полнота, состав насаждений

DOI: 10.31857/S0205961423010116, **EDN:** MNNFJY

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проведенных исследований обусловлена задачами, сформулированными в Основах государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года в части развития современных технологий по совершенствованию системы лесоустройства, государственной инвентаризации лесов, мониторинга лесов, а также создания информационной базы о состоянии, использовании, охране, защите и воспроизводстве лесов.

Методы лесотаксационного дешифрирования радиолокационных данных для определения количественных и качественных показателей лесов имеют значительную перспективу, так как не зависят от облачности атмосферы, погоды и освещенности местности.

Известно, что измерений в С-диапазоне недостаточно для оценки параметров деревьев из-за слабого проникновения волн вглубь растительности (Захаров А.И., 2012). Однако, текстура и пространственные вариации могут дать дополнительную информацию: так, для определения класса возраста леса достаточно измерения текстурных признаков радиолокационных изображений С-диапазона с высоким разрешением.

В работе (Lukman A. Et al., 1994) для решения данной задачи использовались изображения, полученные в С- и Х-диапазонах самолетным радаром с полосой съемки 20 км, а также снимки LANDSAT TM в красном, ближнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах. По результатам работы наиболее эффективными текстурными характеристиками оказались характеристики, полученные на основе матрицы совместной встречаемости GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix).

В работе (Pulliainen et al., 1994) проведены измерения значений УЭПР для нескольких тестовых районов леса, полученных по данным космического аппарата ERS-1, в которых основными породами деревьев являются сосна и норвежская ель. Использовались наземные данные о биомассе, возрасте, высоте, типе деревьев, типе почвы. Исследования показали, что корреляция значений УЭПР леса с биомассой в С-диапазоне может быть положительная, нулевая и отрицательная.

В работе (MacDonald K.C., 1994) по данным JPL AIRSAR, SIR C/X и ERS-1 исследованы 4 лесных массива в Канаде: 2 с преобладанием сосны, 1 с преобладанием ели и 1 с преобладанием осины. С апреля 1994 г. были собраны наземные данные о диэлектрических свойствах стволов,

движении воды в деревьях, температуре почвы. Получены данные о связи значений УЭПР примененных радаров с физиологическим состоянием растений в период мороза, оттепели и роста растительности.

Результаты экспериментов, демонстрирующие возможность использования радаров для оценки характеристик лесной растительности, в том числе биомассы лесов, представлены в многочисленных статьях отечественных и зарубежных авторов, таких как (Ulaby et al., 1987), (Le Toan T., et al., 1992), (Kuplish T.M., Curran P.J., 1999), (Hoscilo, 2018), (Цыдыпов Б.З., 2010), (Кирбижекова И.И., 2013), (Захаров А.И., 2014).

Ранее проведенные в лаборатории таксации и лесоустройства Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ) исследования по разработке методов лесотаксационного дешифрирования также показали возможность определения запаса, полноты, сомкнутости насаждений по радиолокационным спутниковым снимкам. При разновозрастной структуре насаждений, которая формируется при интенсивном антропогенном (рубки леса) или естественном (пожары) воздействии на леса, возможно определение возраста и бонитета насаждений, так как по текстурным признакам можно определить класс возраста насаждений. В контексте высокого разнообразия лесов при отработке алгоритмов лесотаксационного дешифрирования требуется закладка значительного количества пробных площадей с учётом региональной специфики лесных насаждений и лесотипологических условий произрастания. Сеть пробных площадей является важным элементом при верификации различных методов таксации лесов по данным спутниковой съемки. Приведенные в статье исследования выполнены на территории таежной зоны Европейской части России и Западной Сибири. При разработке алгоритмов лесотаксационного дешифрирования данных радиолокационной съемки использовалась сеть пробных площадей из 360 участков, различающихся по породному составу, возрасту, запасам насаждений. Основная доля пробных площадей заложена на территории Костромской, Вологодской, Архангельской, Нижегородской областей, Удмуртской республики, Тюменской области.

На основе данных ДЗЗ разработаны современные дистанционные методы таксации лесов, которые имеют важное значение в стратегии планирования и ведения лесного хозяйства, а также в совершенствовании различных технологий лесоустройства (Моисеев и др., 2017, Рафаилов, 2016).

Целью исследования являлась разработка методов лесотаксационного дешифрирования данных радиолокационной съемки. Такие методы

позволяют создать основу для развития автоматизированных сервисов обработки радиолокационной спутниковой съемки для получения таксационных показателей лесных насаждений. На основе разработанных технологий возможно будет осуществить переход к цифровым, интеллектуальным производственным технологиям в области получения актуальной информации о лесах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные работы включали закладку пробных площадей с учетом признаков различия насаждений по данным оптической и радиолокационной спутниковой съемки. Исследования проведены на территории Костромской, Вологодской, Архангельской, Тюменской, Нижегородской областей, Алтайского края и Удмуртской республики в смешанных насаждениях, различающихся по породному составу, возрасту, запасу, полноте. В общем заложено 360 пробных площадей.

Определение мест закладки пробных площадей осуществлялось по материалам лесоустройства и данным оптической съемки и состояло из нескольких шагов. Сначала проводился первичный анализ по материалам лесоустройства, определялись различия насаждений по запасам, полнотам, возрасту, планировался маршрут с учетом доступности насаждений. Вторым шагом проводился анализ материалов оптической съемки в несколько этапов. На первом этапе производилась дифференциация территории на лесные и нелесные земли на основе разделения по NDVI-индексу в зимний период. Значения данного индекса для нелесных территорий, на величину которого также влияют особенности зарастания площадей древесно-кустарниковой растительностью и наличие лесовозобновления на вырубках, изменяются в пределах 0.08–0.1 единиц в зависимости от региональных особенностей лесов. Реализация данного алгоритма осуществлялась через дерево решений в программном комплексе Envi 5.2 (Руководство, 2013). По результатам классификации была создана маска лесных земель (рис. 1). При этом из лесных земель исключались населенные пункты, дороги, лесозащитные полосы. Применение маски позволило выделить земли, занятые лесной растительностью.

Далее проводился анализ определения мест закладки пробных площадей на основе алгоритма неконтролируемой классификации (IsoData) и анализ территории по индексу содержания влаги в растительности на основе индекса MSI (Moisture Stress Index) для снимков в период июля–августа (рис. 2, 3). Индекс содержания влаги в растительности — один из важных показателей разнообразия лесных экосистем. По данным спутника Sentinel-2 этот индекс определяется от-

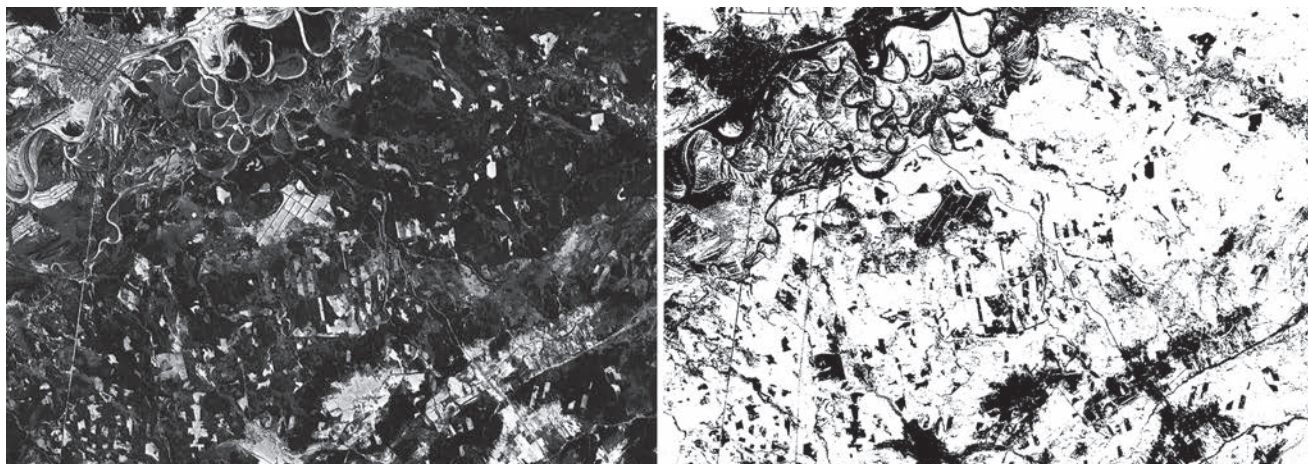


Рис. 1. Формирование маски лесных земель на основе индекса NDVI зимнего снимка (слева — исходный зимний снимок, справа — маска лесных земель, черный цвет).

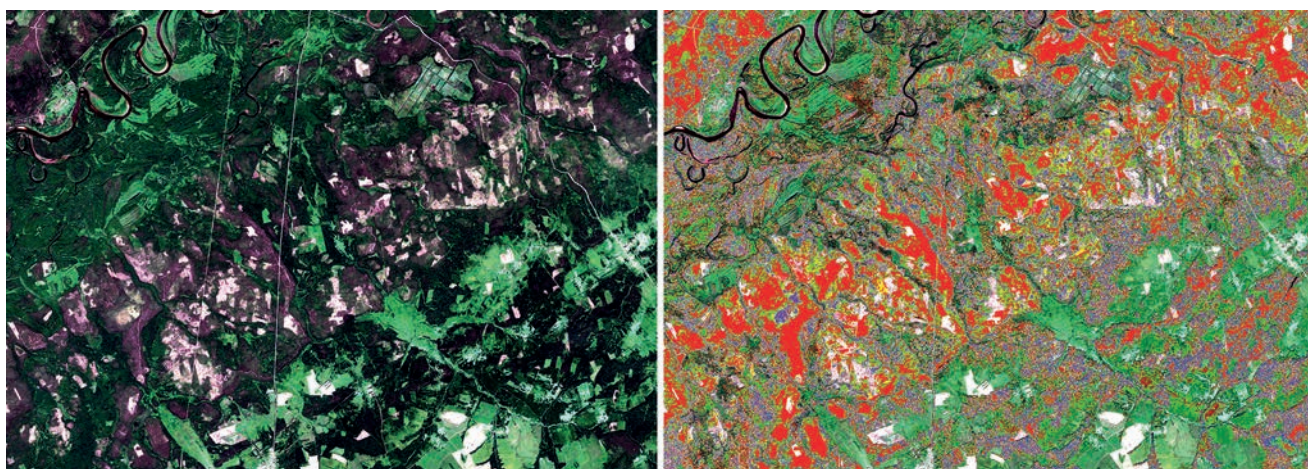


Рис. 2. Неконтролируемая классификация данных спутниковой съемки на основе алгоритма IsoData (слева — исходный снимок, справа — результаты неконтролируемой классификации).

ношением значения канала SWIR (средний инфракрасный канал — 1599 nm) к значению канала NIR (ближний инфракрасный канал — 819 nm), то есть канала b11 к b8 соответственно (Pulliainen J. et al., 2003). Общий диапазон индекса MSI для лесной растительности находится в пределах от 0.08 до 0.4 единиц. Размерность данного индекса зависит от породного состава насаждений, составляя для средневозрастных, спелых и перестойных хвойных древостоев 0.07–0.08 единиц, для мягколиственных — больше 0.10 единиц.

Приемлемые результаты определения объема экспериментальных работ наблюдаются при количестве кластеров от 30 до 40 шт. В кластер входит около 10 вариантов насаждений, незначительно различающихся по разнообразию древесных пород, возрастной структуре, полноте насаждений. Различия между кластерами насаждений по пере-

численным показателям существенны. В пределах кластера при проведении исследований для получения статистически достоверных зависимостей необходима закладка не менее двух пробных площадей.

Получение атрибутивной информации каждого кластера возможно на основе совмещения данных лесоустройства, пробных площадей или лесотаксационного дешифрирования съемки среднего и высокого разрешения. Результаты неконтролируемой классификации также косвенно определяют специфику лесорастительных условий на основе различий насаждений по их спектральным характеристикам.

Рассмотренные методы предварительного анализа разнообразия лесных экосистем позволяют определить предпочтительные места закладки пробных площадей.

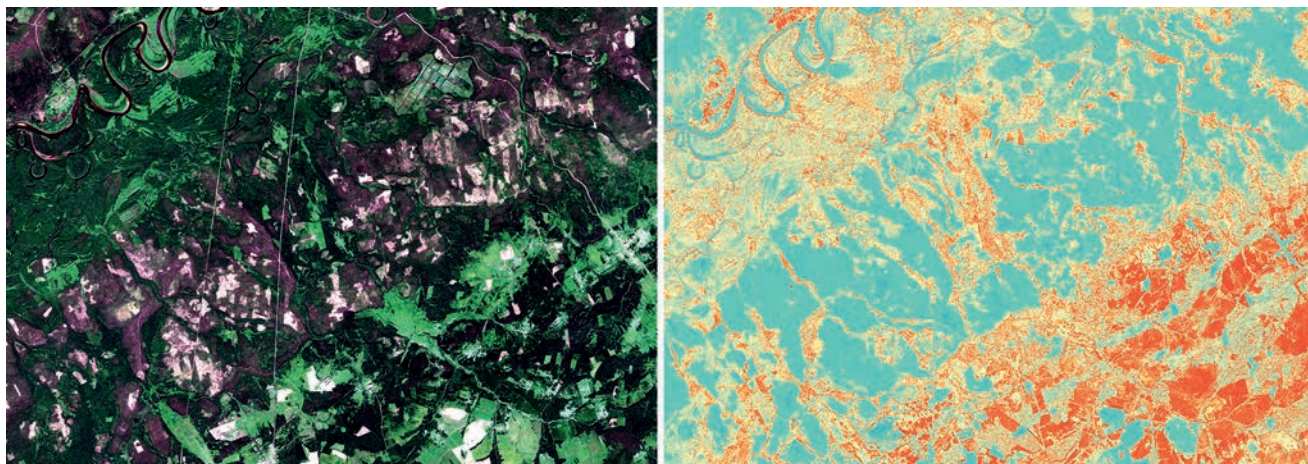


Рис. 3. Результаты анализа территории по содержанию влаги в растительности на основе индекса MSI (слева — исходный снимок, справа — индекс MSI).

Количество пробных площадей зависит от разнообразия лесных насаждений и природных условий их произрастания. Исходя из результатов ранее проведенных исследований, установлено необходимое для большинства случаев минимальное количество пробных площадей — 30 шт. на территорию участкового лесничества. Данное количество гарантирует учет каждой группы насаждений при проведении анализа, но не отражает повторность наблюдений в каждой группе (кластере). Учитывая необходимую повторность не менее 3 вариантов в каждой группе, оптимальное количество пробных площадей может достигать от 120 до 200 шт. на исследуемую территорию. Пробные площади для учета разнообразия насаждений необходимо закладывать в пределах выделенных групп.

Для апробации разработанных методов получения характеристик смешанных насаждений по общедоступным радарным спутниковым данным в работе использовались данные радиолокационных изображений (РЛИ) съемочной системы Sentinel-1 со сроком актуальности снимков менее трех лет с момента закладки пробных площадей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате апробации методов получения характеристик лесов по данным с радиолокационных спутников за период январь—февраль на территории таежной зоны Западной Сибири для чистых насаждений сосны были установлены корреляционные зависимости запаса и полноты насаждений с показателями радиолокационной съемки со спутников Sentinel-1: УЭПР в значении гамма-ноль на VH-поляризации (GammaVH), УЭПР в значении гамма-ноль на VV-поляризации (GammaVV), суммой УЭПР объектов в

значении гамма-ноль на VV- и VH-поляризациях (Sum), текстурный признак “суммарное среднее” (GLCMMean). Наиболее высокие коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и прогнозными значениями, установленные для зимних месяцев — января и февраля, составили 0.4–0.5. По ранее проведенным исследованиям в летний период значения не превысили 0.2 (Сидоренков и др., 2021б).

Учитывая ранее проведенные исследования, для повышения точности определения таксационных характеристик была проведена значительная экспериментальная работа по уточнению методов анализа, которая разделялась на два этапа:

1) Исследование влияния факторов, зависящих от характеристик РЛИ и методов их обработки, которые могут приводить к снижению коэффициентов корреляции на всем периоде наблюдения в результате:

- недостаточного пространственного разрешения РЛИ;
- присутствия спекл-шума на РЛИ, ухудшающего его радиометрическое разрешение.

2) Исследование влияния метеоусловий в момент проведения радиолокационной съемки, которые могут приводить к снижению коэффициентов корреляции, особенно в периоды, для которых характерна высокая погодная изменчивость.

Для улучшения методов обработки РЛИ с целью повышения корреляционных зависимостей были внесены изменения в разработанный ранее метод предварительной обработки амплитудных РЛИ Sentinel-1. В результате внесения изменений получены два различных уточненных варианта обработки:

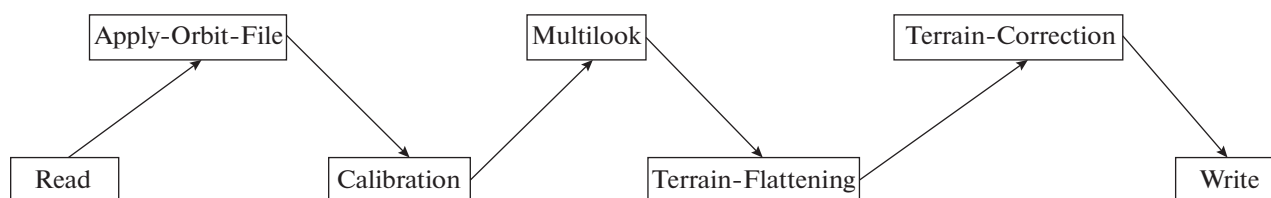


Рис. 4. Граф для формирования геопривязанных РЛИ в значениях УЭПР в ПО SNAP с использованием процедуры некогерентного накопления.

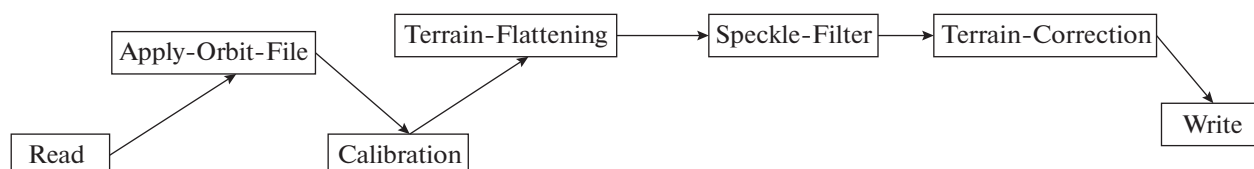


Рис. 5. Граф для формирования геопривязанных РЛИ в значениях УЭПР в ПО SNAP с использованием процедуры цифровой фильтрации – фильтр Frost.

1. Проведение обработки РЛИ без подавления спекл-шума с целью сохранения исходного пространственного разрешения РЛИ (20 м);

2. Использование процедуры цифровой фильтрации для снижения уровня спекл-шума на РЛИ вместо процедуры некогерентного накопления.

В совокупности с использованным ранее методом обработки амплитудных РЛИ с применением процедуры некогерентного накопления для расчета корреляционных зависимостей характеристик лесов с показателями радиолокационной съемки со спутников Sentinel-1 данные обработаны по трем вариантам:

1. Применение фильтра некогерентного накопления;
2. Применение фильтра Фрост;
3. Без фильтрации данных.

Расчет радиолокационных индексов и текстурных характеристик Харалика проводился по каждому набору данных, полученных по трем вариантам предварительной обработки амплитудных РЛИ. В алгоритмы получения характеристик радиолокационных изображений изменения не вносились.

Обработка данных производилась в разработанном Европейским космическим агентством открытом программном обеспечении SNAP. Для проведения процедуры обработки РЛИ использованы модули Graph Builder и Batch Processing, позволяющие создавать и применять подготовленные алгоритмы обработки (“графы”) с настраиваемыми параметрами. Расчет радиолокационного индекса NRVI производился в программном комплексе Matlab посредством написанной функции, в связи с отсутствием возможности корректного расчета индекса в ПО SNAP.

Для варианта подавления спекл-шумов процедурой некогерентного накопления были использованы материалы и графы предыдущего этапа исследований по насаждениям таежной зоны (Сидоренков и др., 2021a). Пример графа в ПО SNAP представлен на рис. 4.

Процедура некогерентного накопления подразумевает усреднение изображения в окне размером $N \times M$ пикселей с последующим укрупнением элементов изображения. При этом уровень спекл-шума уменьшается, но уменьшается и размер изображения в пикселях. Ввиду небольших размеров пробных площадей (до 1 га), был выбран размер окна некогерентного накопления равный 2×2 , что позволило снизить уровень спекл-шума и повысить радиометрическое разрешение РЛИ. При этом размер пикселя РЛИ Sentinel-1 (20 м) остался приемлемым для проведения исследования по участкам такого размера.

При использовании процедуры цифровой фильтрации для снижения уровня спекл-шума с фильтром Фрост (Frost) использовался размер окна 5×5 с коэффициентом демпфирования 2 (рис. 5). Данные параметры были выбраны на основе анализа ранее проведенных исследований (Костылев, 2009, Frost, 1982, Salepci, 2017, Santoso, 2016, Wahyu, 2019). Фильтр Фрост относится к адаптивным алгоритмам фильтрации, учитывающим характер распределения значений пикселей изображения, поэтому позволяет сглаживать однородные области, сохраняя при этом границы объектов. При данном методе фильтрации размер пикселя составляет 10 м.

Вариант алгоритма обработки РЛИ Sentinel-1 без подавления спекл-шума представлял собой исключение блока процедуры некогерентного

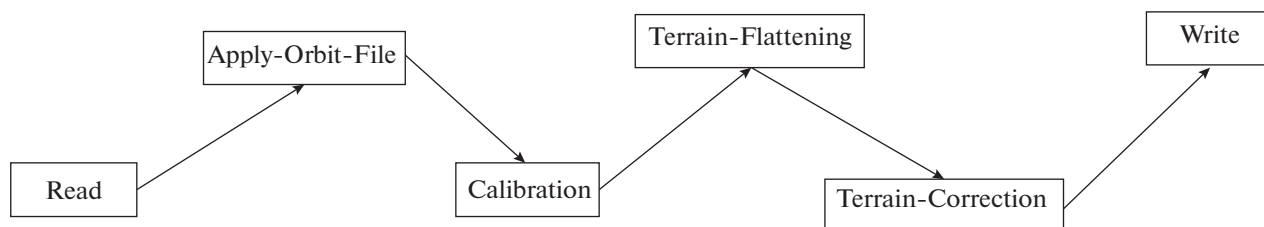


Рис. 6. Граф для формирования геопривязанных РЛИ в значениях УЭПР в ПО SNAP без процедуры подавления спекл-шума.

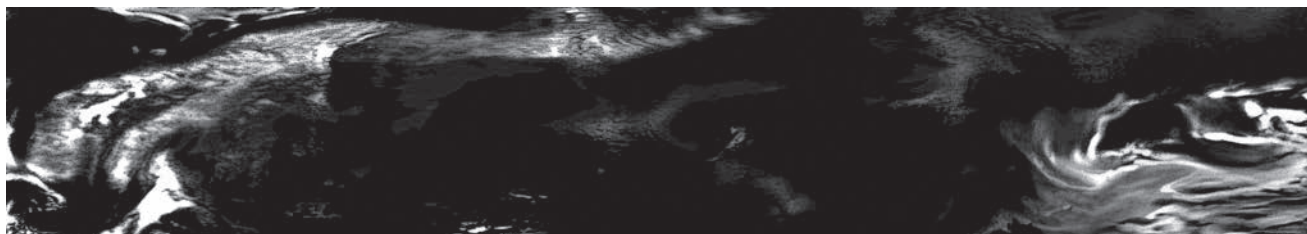


Рис. 7. Пример данных метеополя осадков 03.01.2019 г.

накопления (multilook) с размером окна 2×2 из графа амплитудной обработки РЛИ. Влияние спекл-шума учитывалось на этапе статистического анализа. В данном случае разрешение пикселя остается равным 10 м. Пример графа в ПО SNAP представлен на рис. 6.

Вторым этапом разработки уточненных методов получения характеристик лесов по данным радиолокационной спутниковой съемки является изучение влияния метеоусловий в момент съемки, которые могут приводить к снижению коэффициентов корреляции.

В рамках постановки эксперимента предполагалось, что на значения коэффициентов корреляции характеристик лесов с показателями амплитудных радиолокационных данных могут оказывать влияние следующие метеопараметры:

- температура воздуха в приземном слое атмосферы;
- осадки и другие метеоявления;
- скорость ветра в приземном слое атмосферы.

Из-за влияния указанных метеопараметров состояние лесных насаждений в момент проведения радиолокационной съемки может измениться, что в свою очередь приводит к изменениям интенсивности рассеиваемого этими насаждениями радиолокационного сигнала.

На втором этапе экспериментальных исследований использовались глобальные данные реанализа NCEP GFS (National Centers for Environmental Prediction's Global Forecast System) с разрешением 0.25 градуса (25 км), имеющиеся в открытом доступе (CISL RDA, 2022). На основании этих данных для каждого анализируемого РЛИ получены количественные показатели температуры, осадков и скорости ветра (примеры полученных показателей в формате метеополей представлены на рис. 7, 8, 9), а также сформирована маска со значениями 0 и 1, где 0 означает неблагоприятные метеоусловия, а 1 — благоприятные. Пример маски представлен на рис. 10.

На основании значений маски проводится отбор РЛИ, во время съемки которых метеоусловия



Рис. 8. Пример данных метеополя температуры 03.01.2019 г.



Рис. 9. Пример данных метеополя скорости ветра 03.01.2019 г.

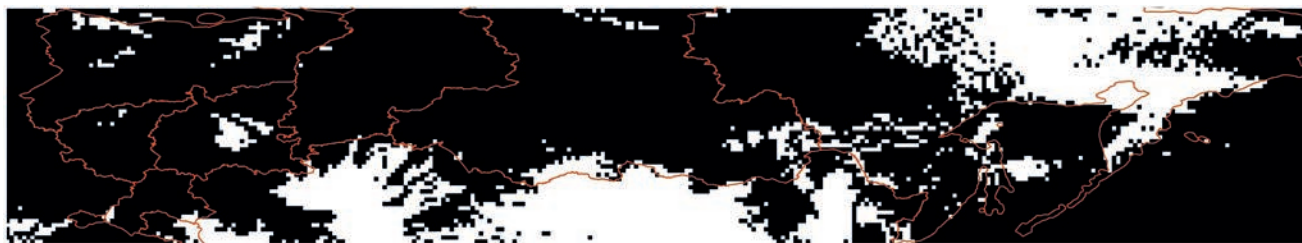


Рис. 10. Пример маски, используемой при отборе РЛИ для анализа при оценке лесотаксационных характеристик (черный цвет — неблагоприятные метеоусловия, белый — благоприятные).

были признаны благоприятными. На основе отобранных РЛИ рассчитываются корреляционные зависимости показателей радиолокационной съемки с лесотаксационными характеристиками насаждений. Результаты, полученные по отобранным РЛИ, сравниваются с результатами, разработанными по всем РЛИ за весь период наблюдения. По окончании исследования производится оценка влияния исключения из анализа РЛИ с неблагоприятными условиями на повышение коэффициента корреляции.

Создание алгоритмов (моделей) связей таксационных характеристик насаждений с данными радиолокации осуществлялось на основе различных методов статистического анализа, экспериментальных исследований и данных радиолокационной съемки.

Первым звеном в системе статистической обработки данных является корреляционный анализ связей количественных и качественных характеристик насаждения с показателями радарной съемки. Предварительный анализ данных позволил определить признаки, имеющие корреляционные связи, которые в дальнейшем были использованы для построения моделей взаимосвязей запаса и полноты насаждений с показателями радиолокационной съемки на основе моделей множественной регрессии. Результаты корреляционного анализа показывают слабые зависимости запаса, полноты, количества деревьев, возраста, состава насаждений от показателей съемки только для зимних месяцев с устойчивым снежным покровом.

При анализе различных методов предварительной обработки данных радиолокационной съемки с целью получения количественных и качественных характеристик лесов применялся единый алгоритм множественной факторной регрессии таксационных характеристик насаждений с показателями УЭПР в значении гамма-ноль на VV-поляризации (Γ_{VV}); радарным индексом, представляющим отношение четырех УЭПР-объектов в значении гамма-ноль на поляризации VH к сумме УЭПР-объектов в значении гамма-ноль на VV и VH поляризациях (R_{VI}); текстурными признаками “суммарное среднее” ($GLCM_{Mean}$); мерой разброса значений вокруг среднего значения комбинаций опорных и соседних пикселей ($GLCM_{Variance}$); и мерой линейной связи уровней яркости пар пикселей ($GLCM_{Correlation}$). Данный подход позволяет выделить наиболее подходящий метод из рассмотренных вариантов по предварительной обработке данных радиолокационной съемки различными способами фильтрации спекл-шума.

Результаты анализа эффективности определения таксационных показателей на основе данных радиолокационной съемки при различных методах ее предварительной обработки показывают близкие значения (табл. 1). Несмотря на высокие коэффициенты корреляции наблюдаемых и прогнозных признаков, уровень значимости для большинства вариантов анализа незначительный ($p > 0.05$), что может привести к ошибкам прогноза за пределами анализируемой статистической выборки.

Таблица 1. Эффективность определения таксационных показателей насаждения (характеристик лесов) при использовании различных методов предварительной обработки данных радиолокационной съемки

Метод фильтрации	таксационные показатели			
	запас м ³ /га (М)	относительная полнота (Р)	возраст, лет (А)	количество деревьев, шт (N)
Frost	0.74	0.7	0.83	0.71
Без подавления спекл-шума с сохранением исходного пространственного разрешения	0.78	0.86	0.72	0.71
С применением процедуры некогерентного накопления	0.8	0.8	0.8	0.8

Результаты проведенных исследований не позволили выявить влияние метеофакторов на точность получения таксационных показателей насаждений по данным радиолокационной спутниковой съемки.

Полученные связи были апробированы для территории Октябрьского лесничества Костромской области (рис. 11, 12).

Определение породного состава насаждений по данным радиолокационной съемки осуществлялось с использованием нейронной сети на основе метода MLPClassifier, который реализует алгоритм многослойного перцептрона (multilayer perceptron, MLP), обучаемого с использованием обратного распределения. За основу нейронной сети взят метод BFGS (акроним имен его авторов: Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno), представля-

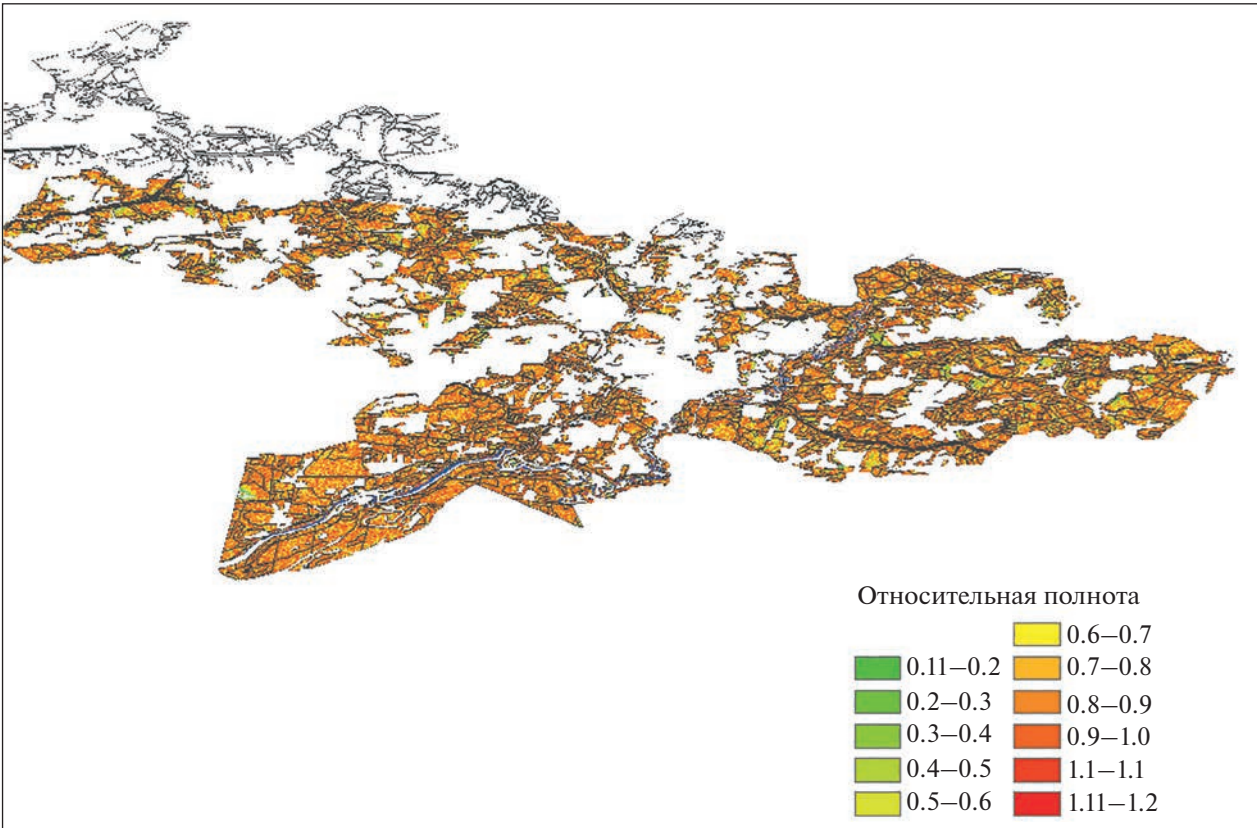


Рис. 11. Дешифрирование полноты насаждений по данным радиолокационной съемки.

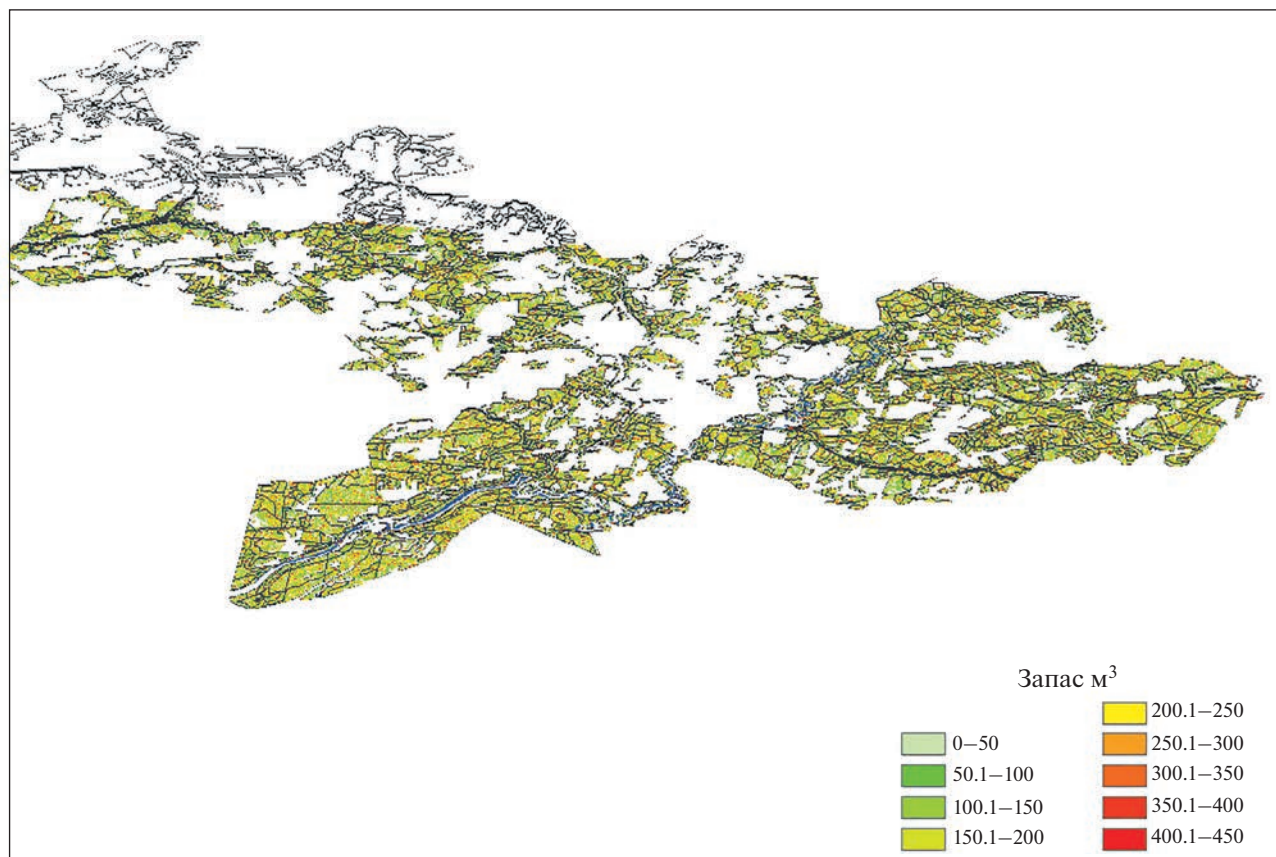


Рис. 12. Дешифрирование запаса насаждений по данным радиолокационной съемки.

ющий из себя итерационный метод численной оптимизации. При проведении исследований использовалась библиотека машинного обучения Scikit-learn.

Нейронная сеть обучается на двух массивах: массив (X) размера, который содержит обучающие образцы, представленные как векторы признаков с плавающей запятой; и массив (Y) размера, который содержит целевые значения (метки классов) для обучающих выборок. Преимуществом многослойного перцептрона является возможность имитировать сложные нелинейные модели. Сеть типа MLP чувствительна к масштабированию функций, так как она имеет непараболическую функцию потерь, когда существует более одного локального минимума. Разные инициализации случайных весов могут привести к разной точности проверки. Анализ исследований показывает, что лучший результат по определению преобладающей породы в составе лесных насаждений по данным радиолокационной съемки с использованием нейронных сетей наблюдается на основе необработанных данных, без фильтрации (рис. 13, 14, 15).

ВЫВОДЫ

По итогам работы можно сделать вывод, что лучшие решения наблюдаются при использовании метода предварительной обработки данных с применением процедуры некогерентного накопления. Результаты исследований также показали, что наиболее достоверные значения запаса и полноты насаждений позволяют получить модели на основе множественной факторной регрессии.

Наиболее точные показатели определения породного состава насаждений при анализе радиолокационных данных методами квазиньютоновских нейронных сетей типа BFGS наблюдаются при съемке более высокого разрешения (с пространственным разрешением 20 м). Фильтрация данных методами Frost и некогерентного накопления снижает разрешение съемки и, как следствие, точность прогноза породного состава насаждений. Оптимальные результаты прогноза характерны для нейронных сетей с небольшим количеством скрытых нейронов (до 5 шт.).

По результатам проведенного исследования влияние метеофакторов на точность получения таксационных показателей насаждений по дан-

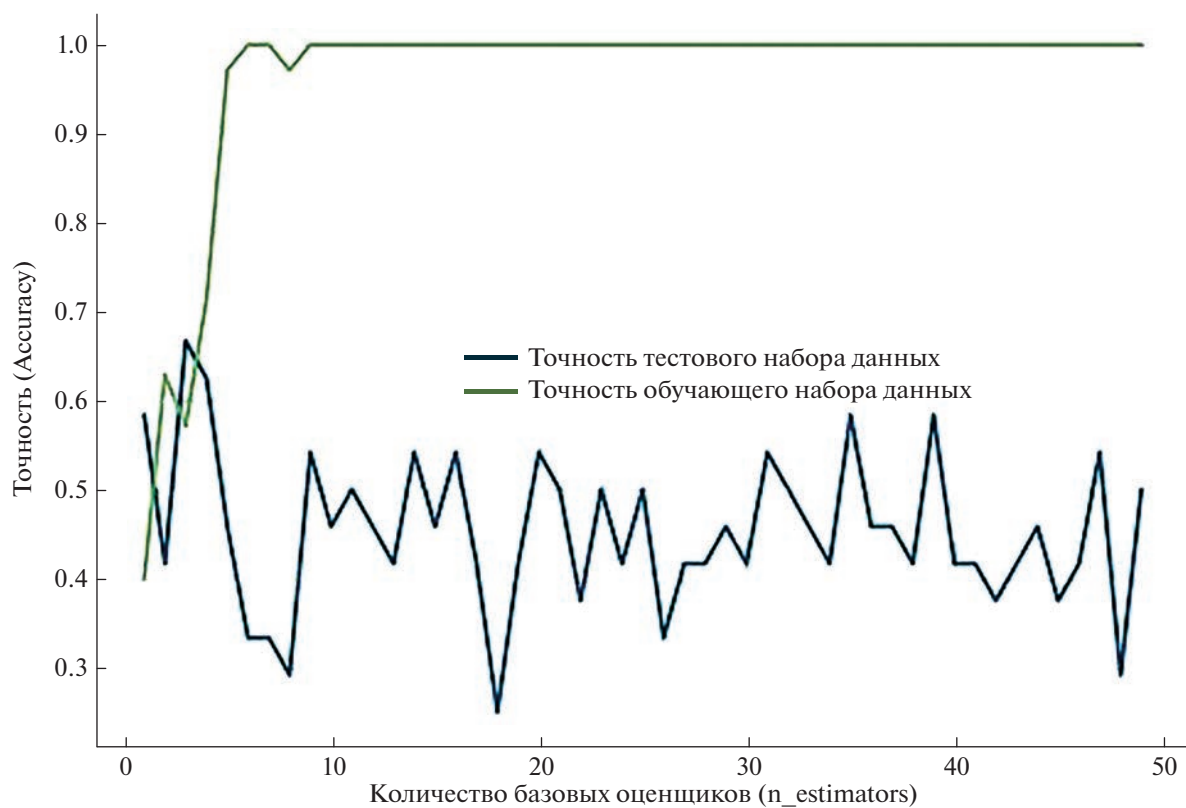


Рис. 13. Результаты определения преобладающего породного состава лесов на основе данных радиолокационной съемки без фильтрации.

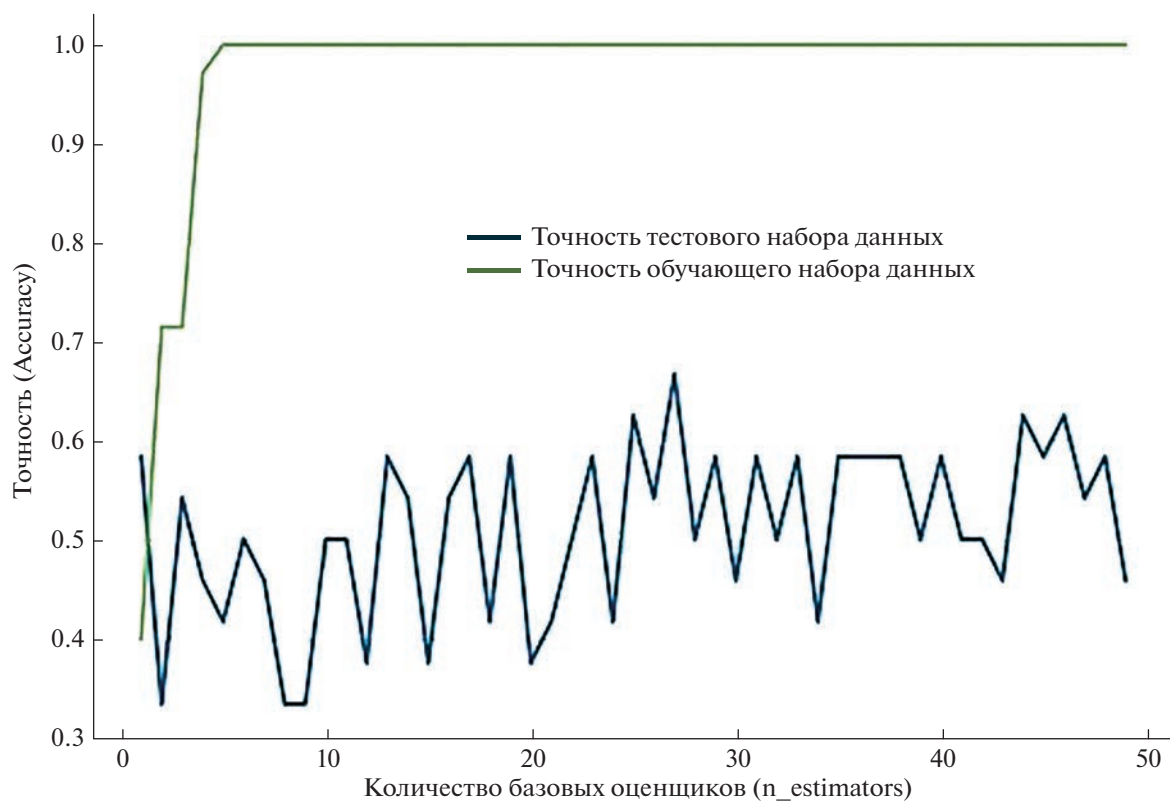


Рис. 14. Результаты определения преобладающего породного состава лесов на основе данных радиолокационной съемки с фильтрацией Frost.

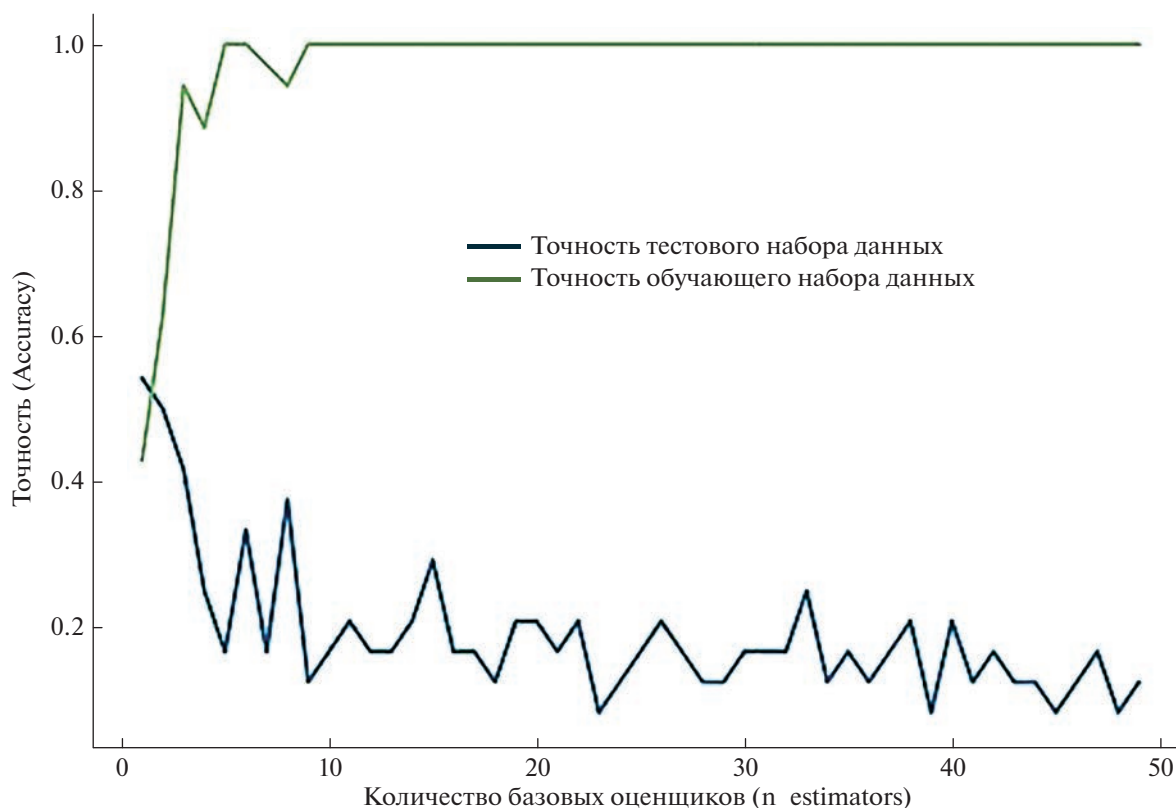


Рис. 15. Результаты определения преобладающего породного состава лесов на основе данных радиолокационной съемки с использованием данных некогерентного накопления.

ным радиолокационной спутниковой съемки не было выявлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Захаров А.И., Захарова Л.Н. Сезонные вариации отражательных свойств подстилающих покровов по территории Подмосковья по данным радиолокатора PALSAR // Тезисы докладов XXII открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 10–14 ноября 2014г.) М: ИКИ РАН, 2014.

Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: КРАСАНД, 2012. 248 с.

Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Гармаев А.М., Гусев М.А. Применение радиолокационных данных для картографирования биомассы лесной растительности в условиях сложного рельефа // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2013. № 82. Т. 56. С. 201–202.

Костылев А.Г. Оценка эффективности фильтров в задачах обработки изображений в условиях помех // Вестник Московского государственного университета леса. 2009. № 6. С. 4–17.

Моисеев Н.А., Мартынюк А.А., Мураев И.Г., Гиряев М.Д. О концепции современного лесоустройства в России // РОСЛЕСИНФОРГ — 80 лет служения лесу. Материа-

лы конференции. М.: ФГБУ «Рослесинфорг». 2017. С. 22–29.

Рафаилов М.К., Мартынюк А.А. Стратегическое планирование в лесном хозяйстве России на уровне субъектов Российской Федерации // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Экономика и управление. 2016. № 3(31). С. 38–50.

Руководство пользователя Envi 5.1. М.: Совзонд. 242 с.

Сидоренков В.М., Кушнырь О.В., Бадак Л.А., Астапов Д.О., Букась А.В. Возможности таксации лесов на основе данных радиолокационной спутниковой съемки // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 5. С. 72–84.

Сидоренков В.М., Астапов Д.О., Бадак Л.А., Ачиколова Ю.С. Возможности таксации лесов на основе данных радиолокационной спутниковой съемки на примере ленточных боров Алтайского края // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса / Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 329.

Цыдыпов Б.З., Кирбижекова И.И., Доржиев Б.Ч., Очиров О.Н. Определение биомассы леса с использованием спутниковых радарных данных // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2010. № 3. С. 79–86.

CISL RDA: NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive // Электронный ресурс (дата обращения: 11.01.2022).

- Frost V.S., Stiles J.A., Shanmugan K.S., Holtzman J.C. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1982. T.: PAMI-4. № 2. P. 157–166.
- Hoscilo A., Lewadowska A., Ziolkowski D., Sterenczak K., Lisanczuk M., Schmullius C., Pathe C. & IEEE (2018): Forest aboveground biomass estimation using a combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data, IGARSS 2018, New York, P. 9026–9029.
- Kuplish T.M., Curran P.J. Temporal analysis of JERS-1/SAR images over regenerating forests in Brazilian Amazonia // Proceedings of IGARSS-99, Hamburg, Germany, 28 June–2 July 1999.
- Le Toan T., Beaudoin A., Riou J., Guyon D. Relating forest biomass to SAR data., IEEE Transaction on geoscience and remote sensing. V. 30. № 2. March 1992.
- Ulaby F.T., El-Raies M.A. Microwave dielectric spectrum of vegetation – Part II: Dual-dispersion model // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1987. GE-25(5). P. 550–557.
- Lukman A., Groom G., Baker J. Forest age discrimination from texture measures of SAR Imagery. Proceedings of IGARSS-94, Pasadena, California, 8–12 August 1994.
- MacDonald K.C., Zimmermann R., Way J.B., Rigno E. Characterization of canopy physiology at boreas with SAR // Proceedings of IGARSS-94, Pasadena, California, 8–12 August, 1994.
- Pulliainen J., Engdahl M., Hallikainen M. Feasibility of multi-temporal interferometric SAR data for stand-level estimation of boreal forest stem volume // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 85. № 4. P. 397–409.
- Pulliainen J., Mikkela P., Heiska K., Koskinen J., Hallikainen M. Seasonal effects on C- and X-band backscattering properties of Finnish boreal forests // Proceedings of IGARSS-94, Pasadena, California, 8–12 August, 1994. P. 238–240.
- Salepci N., Eckardt R., Richter N. Speckle Filtering. Basics, Concepts & Techniques // Germany: Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2017.
- Santoso A.W., Bayuaji L., Sze L.T. Comparison of various speckle-noise reduction filters on synthetic aperture radar image // International J. Applied Engineering Research. 2016. V. 11. № 15. P. 8760–8767.
- Wahyu H.G.A., Ade F.S.P., Haeydar A.H. Performance of various speckle filter methods in modeling forest aboveground biomass using Sentinel-1 data: a case study of Barru Regency, South Sulawesi // Sixth Geoinformation Science Symposium. International Society for Optics and Photonics, Yogyakarta, Indonesia 2019. V. 1131. P. 113–110.

Possibilities of Determining Quantitative and Qualitative Characteristics of Mixed Forest Stands Using Sentinel-1 Imagery

V. M. Sidorenkov¹, V. N. Kositsyn², L. A. Badak³, D. O. Astapov¹, and I. S. Achikolova¹

¹All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Pushkino, Russia

²Federal Forestry Agency, Moscow, Russia

³Russian Space Systems, Moscow, Russia

The paper presents studies on using Sentinel-1 imagery data to determine attributes of mixed forest stands. The fieldwork was carried out on the territory of the Kostroma, Vologda, Arkhangelsk regions, the Udmurt Republic. The study revealed that quantitative and qualitative forest characteristics correlate with radar survey parameters; the value of this correlation was identified. The obtained results enabled to make study area zoning according to the standing volume and forest density.

Keywords: radar survey, Sentinel-1, forest attributes, forest density, standing volume, remote sensing

REFERENCES

- Kirbizhekova I.I., Chimtdorozhiev T.N., Garmaev A.M., Gusev M.A. Primenenie radiolokacionnykh dannykh dlya kartografirovaniya biomassy lesnoy rastitel'nosti v usloviyakh slozhnogo rel'efa [Applying radar data for mapping forest vegetation biomass in complex terrain conditions] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika. 2013. № 82. V. 56. P. 201–202. (In Russian).
- Kostylev A.G. Otsenka effektivnosti fil'trov v zadachakh obrabotki izobrazheniy v usloviyakh pomekh [Filter efficiency evaluation within tasks of image processing under noise conditions] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta 2009. № 6. P. 4–17. (In Russian).
- Moiseev N.A., Martynyuk A.A., Muraev I.G., Giryayev M.D. O kontseptsii sovremennoogo lesoustroystva v Rossii [On the concept of modern forest management in Russia] // ROS-LESINFORG – 80 let sluzheniya lesu. Materialy konferentsii. M.: FGBU “Roslesinforg”. 2017. P. 22–29. (In Russian).
- Rafailov M.K., Martynyuk A.A. Strategicheskoe planirovanie v lesnom khozyaystve Rossii na urovne sub'ektov Rossiyskoy Federatsii [Strategic planning of Russian forestry at the level of subjects of the Russian Federation] // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie. 2016. № 3(31). P. 38–50. (In Russian).
- Sidorenkov V.M., Kushnyr' O.V., Badak L.A., Astapov D.O., Bukas' A.V. Vozmozhnosti taksatsii lesov na osnove dannykh radiolokatsionnoy sputnikovoy s'emki [Possibilities of implementing forest inventory based on radar satellite imagery data] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2021. № 5. P. 72–84. (In Russian).

- Sidorenkov V.M., Astapov D.O., Badak L.A., Achikolova Yu.S.* Vozmozhnosti taksatsii lesov na osnove dannykh radiolokatsionnoy sputnikovoy s'emki na primere lentochnykh borov Altayskogo kraia [Possibilities of implementing forest inventory based on radar satellite imagery data on the example of the Altai ribbon forests] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* / Pod red. E.A. Lupyana, O.Yu. Lavrovoy. M.: IKI RAN, 2021. P. 329. (In Russian).
- Tsydyrov B.Z., Kirbizhekova I.I., Dorzhiev B.CH., Ochirov O.N.* Opredelenie biomassy lesa s ispol'zovaniem sputnikovyykh radarnykh dannykh [Forest biomass determination of using satellite radar data] // *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova*. 2010. № 3. P. 79–86. (In Russian).
- User Guide Envi 5.1. M.: Sovzond. 242 p. (in Russian).
- Zakharov A.I., Zakharova L.N.* Sezonnye variatsii otrazhatel'nykh svoystv podstilayuschikh pokrovov po territorii Podmoskov'ya po dannym radiolokatora PALSAR [Seasonal variations in the reflective properties of the underlying covers for Moscow region territory according to PALSAR radar data] // *Tezisy dokladov XXII otkrytoy Vserossiyskoy konferentsii "Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Moskva 10-14 noyabrya 2014) M: IKI RAN, 2014. (In Russian).
- Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M.* Spurnikovyy monitoring Zemli: Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti [Satellite Earth monitoring: radar surface sensing]. – M.: KRASAND, 2012. – 248 p (in Russian).
- CISL RDA: NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive // Web-source (appeal date: 11.01.2022).
- Frost V.S., Stiles J.A., Shanmugan K.S., Holtzman J.C.* A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1982. – T.: PAMI-4. № 2. P. 157–166.
- Hoscilo A., Lewadowska A., Ziolkowski D., Sterenczak K., Lisanczuk M., Schmullius C., Pathe C. & IEEE (2018):* Forest aboveground biomass estimation using a combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data, IGARSS 2018, New York, P. 9026–9029.
- Kuplish T.M., Curran P.J.* Temporal analysis of JERS-1/SAR images over regenerating forests in Brazilian Amazonia // *Proceedings of IGARSS-99*, Hamburg, Germany, 28 June–2 July 1999.
- Le Toan T., Beaudoin A., Riom J., Guyon D.* Relating forest biomass to SAR data., *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*. V. 30. № 2. March 1992.
- Lukman A., Groom G., Baker J.* Forest age discrimination from texture measures of SAR Imagery. *Proceedings of IGARSS-94*, Pasadena, California, 8–12 August 1994.
- MacDonald K.C., Zimmermann R., Way J.B., Rigno E.* Characterization of canopy physiology at boreas with SAR // *Proceedings of IGARSS-94*, Pasadena, California, 8–12 August, 1994.
- Pulliainen J., Engdahl M., Hallikainen M.* Feasibility of multi-temporal interferometric SAR data for stand-level estimation of boreal forest stem volume // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 85. № 4. P. 397–409.
- Pulliainen, J., Mikkela P., Heiska K., Koskinen J., Hallikainen M.* Seasonal effects on C- and X-band backscattering properties of Finnish boreal forests // *Proceedings of IGARSS-94*, Pasadena, California, 8–12 August, 1994. P. 238–240.
- Salepci N., Eckardt R., Richter N.* Speckle Filtering. Basics, Concepts & Techniques // Germany: Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2017.
- Santoso A.W., Bayuaji L., Sze L.T.* Comparison of various speckle-noise reduction filters on synthetic aperture radar image // *International J. Applied Engineering Research*. 2016. V. 11. № 15. P. 8760–8767.
- Ulaby F.T., El-Rayes M.A.* Microwave dielectric spectrum of vegetation – Part II: Dual-dispersion model // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1987. GE-25(5). P. 550–557.
- Wahyu H.G.A., Ade F.S.P., Haeydar A.H.* Performance of various speckle filter methods in modeling forest aboveground biomass using Sentinel-1 data: a case study of Barru Regency, South Sulawesi // *Sixth Geoinformation Science Symposium. International Society for Optics and Photonics*, Yogyakarta, Indonesia 2019. V. 1131. P. 113–110.