

УДК 630*5:528.85:630*9

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.45

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ
НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ, ДАННЫХ ЛЕСОУСТРОЙСТВА И АЛГОРИТМА k-NN
(НА ПРИМЕРЕ ЛОДЕЙНОПОЛЬСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА
ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Д.М. Черниховский, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [I-7020-2016](#),

ORCID: [0000-0002-6375-3080](#)

А.С. Алексеев, д-р геогр. наук, проф.; ResearcherID: [F-6891-2010](#),

ORCID: [0000-0001-8795-2888](#)

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021;

e-mail: a_s_alekseev@mail.ru, cherndm2006@yandex.ru

Российская система национальной (государственной) инвентаризации лесов, действующая с 2007 г., в методическом отношении несовершенна и служит объектом критики и дискуссий. К слабым ее сторонам следует отнести недостаточное внимание, уделяемое дистанционным методам. Возможное направление совершенствования отечественной системы инвентаризации лесов – использование автоматической классификации их характеристик на основе материалов дистанционного зондирования Земли. Одним из перспективных алгоритмов автоматической классификации является метод «ближайшего соседа», или k-NN (k-nearest neighbors) метод, успешно применяемый при проведении инвентаризации лесов в других странах. Он основан на регрессии между спектральными характеристиками пикселей с известными характеристиками лесов и остальных пикселей изображения. Вопросы практического применения этого метода в целях национальной инвентаризации лесов впервые были поставлены и изучены финскими исследователями в 90-х гг. прошлого века. На протяжении двух последних десятилетий в разных странах проведено значительное количество экспериментов в этой области. Цель данного исследования – оценка возможности применения k-NN метода для определения обобщенных характеристик лесов на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области. Площадь лесничества – 401 866 га, в его состав входят 16 участковых лесничеств. В целях формирования набора тренировочных участков для классификации средствами геоинформационных технологий в пределах лесничества создана регулярная сеть с шагом 1×1 км. В качестве тренировочных участков, расположенных в узлах сети, использовались либо участки круглой формы радиусом 10 м, либо лесотаксационные выделы, которым присваивались лесотаксационные характеристики на основе материалов лесоустройства. Для проведения классификации применялись снимки Landsat-8 (спектральные каналы – GREEN, RED, NIR, SWIR 2). Выполнена автоматическая классификация снимков Landsat-8 по ряду лесотаксационных характеристик – среднему запасу на 1 га, среднему классу бонитета, средней относительной полноте, доле площади хвойных и лиственных насаждений. Результаты классификации k-NN методом сравнивались с материалами лесоустройства. Систематические ошибки оценки запаса, полноты и бонитета для территории Лодейнопольского лесничества составили менее 5 %. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего изучения теоретических и практических вопросов применения k-NN метода для определения характеристик лесов. Развитие данного направления может способствовать совершенствованию методики российской государственной инвентаризации лесов.

Для цитирования: Черниховский Д.М., Алексеев А.С. Метод определения характеристик лесов на основе материалов дистанционного зондирования Земли, данных

лесоустройства и алгоритма k-NN (на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области) // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 45–65. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.45

Ключевые слова: метод ближайших соседей, дистанционные методы, инвентаризация лесов, автоматическая классификация изображений, дистанционное зондирование Земли.

Введение

Государственная инвентаризация лесов (ГИЛ) – приоритетное направление отечественных лесоучетных работ. Начиная с момента внедрения в 2007 г., является предметом острых дискуссий и критики. По совокупности причин отечественная методика ГИЛ (направление – «Определение количественных и качественных характеристик лесов») и получаемые на ее основе результаты признаются несовершенными [1–3, 15, 26]. К явным методическим недостаткам этого направления, отмечаемым многими специалистами, относят недостаточное внимание дистанционным методам, необоснованное планирование размещения наземных пробных площадей, а также экономически низкоэффективное одиночное (а не кластерное) размещение пробных площадей. Указанные противоречия особенно явно прослеживаются при сравнении действующей в России методики ГИЛ с методиками национальной инвентаризации лесов (НИЛ) других стран [11, 29]. Авторы обширного обзора [11] отмечают, что при разработке отечественной системы НИЛ целесообразно ориентироваться на опыт стран, сопоставимых с Россией по площади, занятой лесами (Канада, США). Также рекомендуется учитывать опыт стран, определяющих тенденции развития государственных систем инвентаризации лесов в Европейском регионе (Швеция, Финляндия, Германия).

Для решения задач НИЛ в разных странах активно применяются дистанционные методы [11, 29, 36, 40, 46, 47]. Одним из распространенных в мире алгоритмов автоматической классификации материалов спутниковой съемки в целях НИЛ является метод «ближайших соседей», или k-NN (k-nearest neighbors) метод, который основан на регрессии между спектральными характеристиками пикселей изображения с известными характеристиками лесов, относящимися к наземным пробным площадям, и остальных пикселей. Обзор публикаций демонстрирует значительный интерес к данному направлению на протяжении последних десятилетий. Впервые возможности практического применения k-NN метода были исследованы и опробованы в целях НИЛ в Финляндии в 1990 г. Вскоре он стал стандартом для работ по НИЛ в Финляндии, Швеции, позднее – в Австрии и США. Исследователь Erkki Tomppo в 1997 г. стал лауреатом премии Маркуса Валленберга за свои работы по k-NN методу. Сущность этого метода изложена в монографиях по НИЛ Финляндии «Forest Inventory: Methodology and Applications» [29] и «Multi-Source National Forest Inventory: Methods and Applications» [47], а также в многочисленных публикациях начала 2000-х гг. [27, 30–34, 37, 38, 41, 43, 46]. Особенности применения k-NN метода для решения задач инвентаризации лесов отдельных стран отражены в национальных руководствах по НИЛ и публикациях [27, 32, 33, 41, 46].

Необходимо отметить, что k-NN метод позволяет оценивать ряд важнейших характеристик лесов на основе данных, полученных при обследовании наземных пробных площадей, и материалов дистанционного зондирования Земли – ДЗЗ (в основном материалов съемки Landsat, находящихся в свободном доступе). Преимуществом k-NN метода является возможность оперативного получения результатов для значительных по площади территорий (стран, регионов, муниципалитетов) с приемлемой точностью для решения задач НИЛ и формированием карт распределения характеристик лесов.

Исследователи из разных стран активно изучают возможные направления дальнейшего применения и совершенствования k-NN метода. Помимо вопросов, касающихся решения задач НИЛ в разных странах [30–32, 34, 38, 39, 42, 45], изучаются возможности оптимизации самого алгоритма классификации, использования дополнительных данных и процедур обработки, способных повлиять на результат [29–32, 34, 35, 37, 38, 41, 42, 45, 47, 48].

Среди русскоязычных публикаций, посвященных применению и развитию методов автоматического дешифрирования материалов ДЗЗ в лесном хозяйстве, можно выделить ряд взаимопересекающихся направлений: фундаментальные исследования отображения характеристик лесов на материалах ДЗЗ [8, 9, 22]; картографирование растительности с выделением различных типов растительных группировок, изучением их структуры и состояния [14, 18, 19, 25]; оценка лесистости территорий [16]; инвентаризация охотничьих угодий [18]; изучение процессов лесовосстановления [4, 6, 7, 10], динамики лесных экосистем, природных и антропогенных ландшафтов [20, 24]; определение отдельных лесотаксационных характеристик лесов [16, 19, 21]; оценка лесопатологического состояния лесов [17].

В большинстве перечисленных публикаций решение поставленных задач осуществляется путем выполнения автоматической классификации материалов ДЗЗ (такими материалами в основном служат снимки Landsat).

Краткий обзор публикаций, связанных с автоматическим дешифрированием лесов, свидетельствует о значительном интересе ученых к данному направлению, высоком научном уровне проводимых исследований, знакомстве отечественных специалистов с мировым опытом, широком спектре потенциальных возможностей методов автоматического дешифрирования в лесном хозяйстве.

Есть основания предполагать, что действующая методика работ по ГИЛ (направление – «Определение количественных и качественных характеристик лесов») будет пересмотрена и усовершенствована. Среди вероятных направлений совершенствования этой методики – более активное использование дистанционных методов (в том числе автоматическая классификация материалов ДЗЗ) с учетом накопленного мирового опыта НИЛ.

Основная цель исследования – оценка возможностей применения k-NN метода для определения обобщенных характеристик лесов на основе материалов ДЗЗ на примере конкретного лесничества Ленинградской области.

Задачи исследования:

– формирование набора исходных пространственных данных для выполнения автоматической классификации лесов средствами геоинформационных технологий;

- оценка обобщенных характеристик лесов путем выполнения автоматической классификации материалов космической съемки k-NN методом;
- сравнение результатов классификации с результатами лесоустройства.

Актуальность исследования связана с общепризнанной необходимостью совершенствования методики отечественной системы ГИЛ. Рассматривается возможность применения в российских условиях k-NN метода – одного из наиболее распространенных в мире алгоритмов автоматической классификации лесов, успешно используемого при проведении НИЛ.

Новизна исследования заключается в экспериментальном применении k-NN метода для определения ряда обобщенных характеристик лесов на основе материалов съемки Landsat и данных лесоустройства конкретного лесничества.

Объекты и методы исследования

Исходными данными при выполнении НИЛ с использованием k-NN метода служат материалы наземных пробных площадей (ПП) и материалы ДЗЗ [29, 33, 46]. При этом наземные ПП обычно располагаются кластерами (в виде различных геометрических фигур) в узлах регулярной сети, покрывающей всю территорию страны. Отдельные ПП часто имеют форму круга радиусом около 10 м. Рекомендуется использовать порядка 500 ПП на одну сцену снимка Landsat [33]. Получение такого набора данных (в виде совокупности наземных ПП, расположенных в узлах регулярной сети) без организации масштабных исследований невозможно. Даже наземные ПП ГИЛ Российской Федерации не соответствуют подобным требованиям – их расположение не является регулярным (к тому же данные о координатах ПП ГИЛ засекречены), а известные примеры расположения ПП в отдельных регионах [23] демонстрируют приуроченность ПП ГИЛ к дорогам и рекам, что ставит под сомнение репрезентативность и охват лесорастительных условий. Использование данных лесоустройства отчасти позволяет решить задачу выбора тренировочных (пробных) участков для классификации. Именно таким образом поступили авторы работы [5], демонстрируя возможности k-NN метода.

В качестве модельной территории выбрано Лодейнопольское лесничество Ленинградской области (рис. 1).

Общая площадь лесничества составляет 401 866 га. В состав лесничества входят 16 участковых лесничеств. Последнее лесоустройство было проведено в 2017 г. [12]. Леса лесничества относятся к таежной зоне, Балтийско-Белозерскому таежному району Российской Федерации (Средне-Таежному району европейской части Российской Федерации). В лесничестве эксплуатационные леса составляют 55,6 %, защитные – 44,4 %. Площадь земель лесного фонда на 89,4 % представлена лесными землями, из которых покрытые лесной растительностью – 86,1 %, непокрытые – 3,3 %. На долю нелесных земель приходится 10,6 % территории лесничества, среди них преобладают болота (8,1 %). Земли, покрытые лесной растительностью, представлены сосняками (33,25 %), ельниками (31,74 %), березняками (26,48 %), осинниками (7,87 %) и насаждениями иных пород – ольхи серой и черной, ивы древовидной и др. (0,66 %).

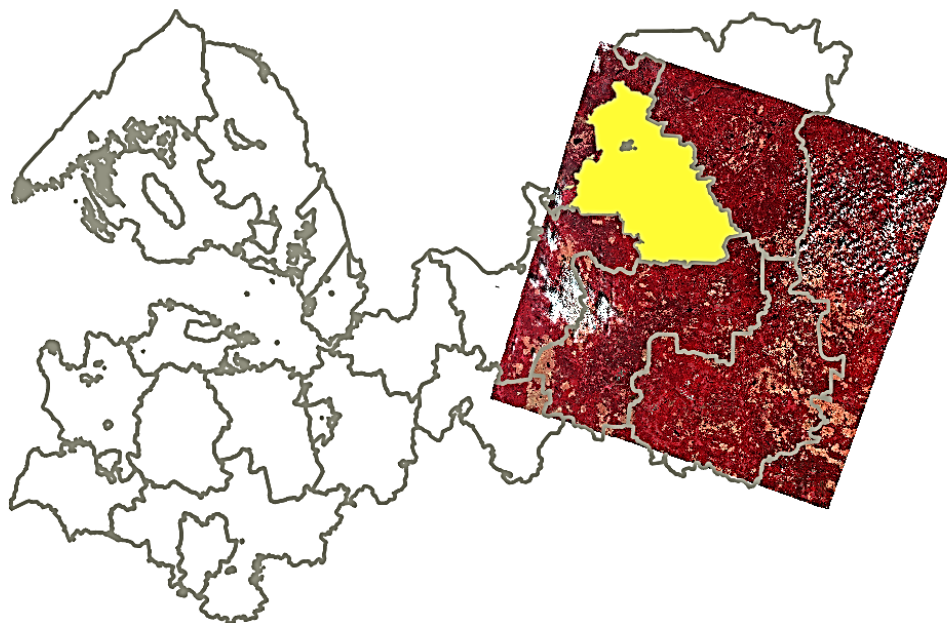


Рис. 1. Расположение Лодейнопольского лесничества и снимка Landsat-8 OLI (дата съемки – 20.08.2018 г.) на территории Ленинградской области (лесничество выделено желтым цветом)

Fig. 1. Position of the Lodeynopol'skoe forest district and satellite image Landsat-8 OLI (survey date 20.08.2018) in the territory of Leningrad Region (the district is highlighted in yellow)

Материалы лесоустройства не являются оптимальными исходными данными для формирования тренировочных участков НИЛ по ряду причин. При использовании подобных участков на качество результатов автоматической классификации будет негативно влиять пространственная неоднородность лесоустроительных выделов. Неоднородность лесотаксационных характеристик внутри выдела допускается Лесоустроительной инструкцией и подразумевает возможное отличие характеристик насаждений в разных частях выдела от обобщенной (указанной в таксационном описании) характеристики. Поэтому механическое присвоение ПП атрибутов лесотаксационного выдела, в который она попадает, может приводить к ошибкам.

При выборе тренировочных участков для классификации использовано два варианта:

- формирование буферных зон – полигонов радиусом 10 м вокруг узлов регулярной сети с шагом 1×1 км;
- выбор лесотаксационных выделов, пересекающихся с узлами сети.

В качестве базового программного обеспечения выбрана географическая информационная система (ГИС) QGIS. В табл. 1 кратко отражены основные этапы работ и их содержание.

Для оценки возможностей применения k-NN метода использовался свободный плагин (программный модуль) k-NN classifier к ГИС QGIS, разработанный для учебных целей (разработчик – Вентспилсская высшая школа, Латвия). Теоретической основой плагина послужили статьи [30, 44].

Таблица 1

Порядок и содержание основных этапов работ по оценке возможностей применения k-NN метода для определения обобщенных характеристик лесов на основе материалов лесоустройства

Этап	Содержание	Программное обеспечение
Формирование геоинформационного проекта модельной территории	Создание нового геоинформационного проекта на модельную территорию. Экспорт набора векторных слоев из геоинформационных баз данных лесоустройства	ГИС QGIS и WinGIS, программы PLP-2015, MS Excel
Загрузка и первичная обработка материалов ДЗЗ	Выбор и получение материалов спутниковых съемок территории лесничества. Выполнение атмосферной коррекции и обрезки изображений. Формирование наборов спектральных каналов	ГИС QGIS, плагин Semi-Automatic Classification, картографический сервис USGS (https://earthexplorer.usgs.gov)
Формирование набора тренировочных участков для классификации	Формирование наборов тренировочных участков на основе регулярной сети. Определение атрибутивных характеристик участков на основе данных лесоустройства и материалов ДЗЗ. Ограничение числа участков, пригодных для классификации	ГИС QGIS, плагин k-NN classifier, картографические сервисы открытого доступа
Выполнение автоматической классификации	Определение спектральных характеристик тренировочных участков. Выполнение классификации с использованием разных параметров. Оценка точности классификации	ГИС QGIS, плагин k-NN classifier

Результаты исследования и их обсуждение

Для территории Лодейнопольского лесничества выбраны снимки Landsat-8 (съемка выполнена 8 августа 2018 г.). Выбор, загрузка, атмосферная коррекция и обрезка каналов космических снимков проведены средствами плагина Semi-Automatic Classification для ГИС QGIS [28].

Для выполнения анализа был использован набор спектральных каналов Landsat: зеленый (Green, 0,525...0,600 мкм), красный (Red, 0,630...0,680 мкм), ближний инфракрасный (NIR, 0,845...0,885 мкм), коротковолновый инфракрасный (SWIR2, 1,560...1,660 мкм). Территория лесничества покрыта регулярной сеткой с шагом 1 км. В узлах сетки построены тренировочные участки круговой формы радиусом 10 м. Средствами ГИС-технологий участкам присвоен набор лесотаксационных характеристик на основе материалов лесоустройства. Для каждого участка определены следующие характеристики: преобладающая древесная порода, группа типов леса, средний класс бонитета, средний запас на 1 га, средняя относительная полнота. Далее на основе материалов лесоустройства и снимков высокого разрешения открытого доступа из дальнейшего анализа были исключены участки, попадающие на нелесные и не покрытые лесом земли, на облака и их тени, а также насаждения возрастом до 40 лет (такие насаждения обычно имеют неоднородную пространственную структуру и сложны для адекватного описания дистанционными методами).

Сформировано два варианта наборов тренировочных участков на основе регулярной сети с шагом 1 км:

вариант 1 – с использованием круговых площадок радиусом 10 м (969 площадок общей площадью 30,0 га);

вариант 2 – с использованием лесотаксационных выделов, попадающих на узлы сети (638 участков общей площадью 6 346,1 га)

На рис. 2 показаны общая схема расположения тренировочных участков на снимке Landsat, а также фрагменты их расположения для классификации в виде круговых площадок и лесотаксационных выделов, находящихся в узлах регулярной сети.

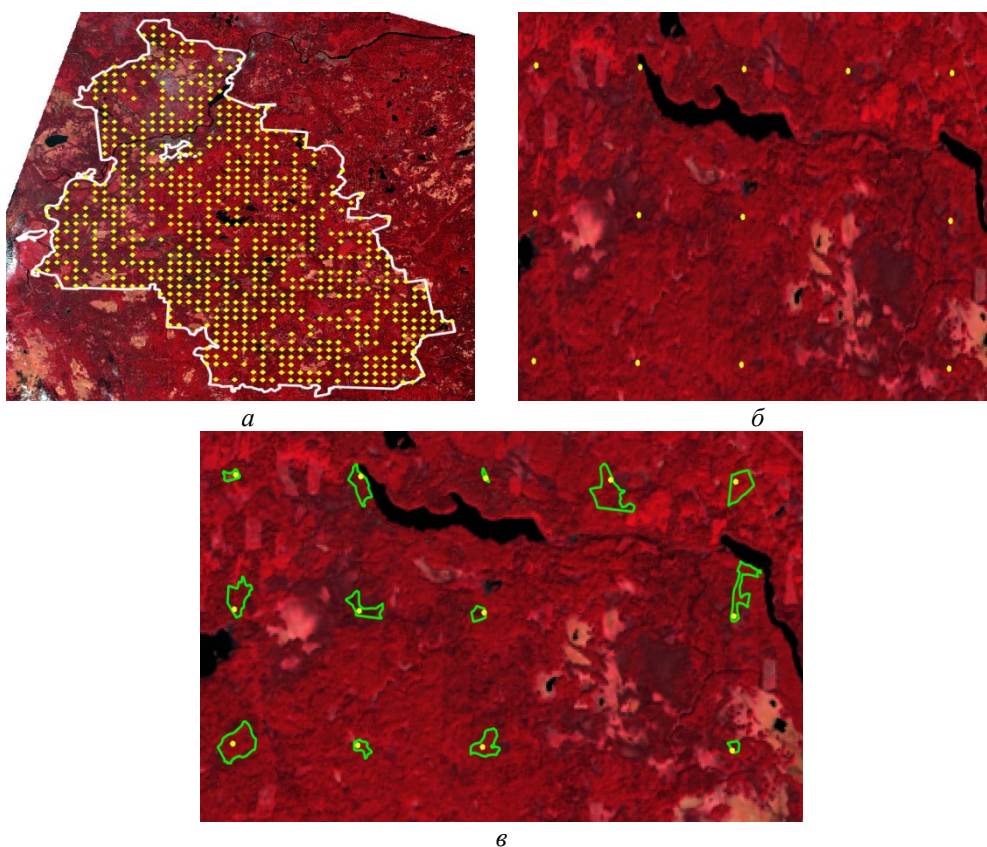


Рис. 2. Расположение сети тренировочных участков на территории Лодейнопольского лесничества Ленинградской области: *а* – схема расположения сети тренировочных участков на снимке Landsat с шагом 1 км в пределах лесничества; *б* – фрагмент снимка Landsat с расположением круговых тренировочных участков в узлах регулярной сети с шагом 1 км; *в* – фрагмент снимка Landsat на территорию лесничества с расположением лесотаксационных выделов в узлах регулярной сети с шагом 1 км

Fig. 2. The position of the trial plots network on the territory of the Lodeynopol'skoe forest district of Leningrad region: *a* – the scheme of the trial plots network in the Landsat image with the resolution of 1 km within the boundaries of the district; *б* – a fragment of the Landsat image with the location of round trial plots in the nodes of the regular network with the resolution of 1 km; *в* – a fragment of the Landsat image with the location of forest inventory compartments in the nodes of the regular network with the resolution of 1 km

Средствами плагина k-NN classifier выполнена автоматическая классификация снимка Landsat по набору характеристик лесов – среднему запасу древесных пород на 1 га, средней относительной полноте, среднему классу бонитета, группам преобладающих пород. Использовались следующие настройки: число ближайших соседей – 3; дистанционная метрика – евклидово расстояние; спектральные каналы – Green, Red, NIR, SWIR2. На основе полученных в результате классификации растровых карт средствами ГИС-технологий оценены обобщенные значения лесотаксационных характеристик внутри лесотаксационных выделов (рис. 3).

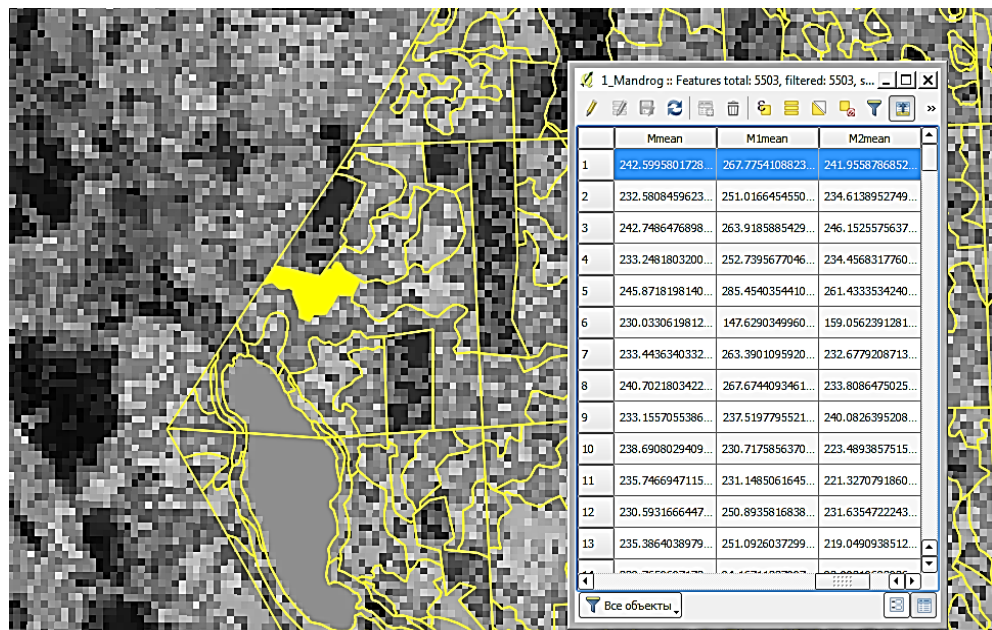


Рис. 3. Фрагмент растровой карты значений среднего запаса древесных пород, определенных в результате k-NN классификации, и векторный слой границ лесотаксационных выделов (на основе результатов классификации для каждого лесотаксационного выдела определены средние значения запасов)

Fig. 3. A fragment of the raster map of growing stock average values of tree species obtained as a result of using the k-NN classification, and the vector layer of the boundaries of the forest inventory compartments (average values of growing stock are determined for each forest inventory compartment based on the results of classification)

Критериями оценки качества k-NN классификации при расчетах служили: среднеквадратическая ошибка RMSE (Root Mean Square Error) анализируемого показателя (при оценке количественных или непрерывных характеристик) и статистика Каппа-Коэна – KHAT (при оценке качественных или категориальных характеристик).

Среднеквадратическая ошибка оценивается как

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}}, \quad (1)$$

где \hat{y}_i – значение параметра, определенное в результате классификации; y_i – значение классифицируемого параметра в соответствии с исходными данными пробных площадей; N – общее число пикселей раstra.

Статистика Каппа–Коэна

$$\text{КНАТ} = \frac{d - q}{N - q}, \quad (2)$$

где d – число случаев получения правильных результатов (сумма значений, находящихся на диагонали матрицы ошибок); q – число случайных результатов, вычисляемое через число результатов в столбцах n_c и строках n_r матрицы ошибок [13, 44]:

$$q = \sum_{i=1}^N n_c n_r / N. \quad (3)$$

Для определения средних запасов каждого выдела по материалам лесоустройства использованы базы данных. Средние запасы каждого выдела на основе результатов k -NN классификации вычислялись с помощью операции «Зональная статистика» в ГИС QGIS. Сравнение полученных результатов по участковым лесничествам Лодейнопольского лесничества показано в табл. 2–4.

Оценки качества классификации по варианту 1 (участки круглой формы) составили: по среднему запасу $\text{RMSE} = 50,45 \text{ м}^3/\text{га}$; по относительной полноте $\text{RMSE} = 0,86$; по классу бонитета $\text{RMSE} = 0,72$; по группам пород $\text{КНАТ} = 0,51$.

Оценки качества классификации по варианту 2 (выделы лесоустройства) составили: по среднему запасу $\text{RMSE} = 67,97 \text{ м}^3/\text{га}$; по относительной полноте $\text{RMSE} = 1,23$; по классу бонитета $\text{RMSE} = 0,92$; по группам пород $\text{КНАТ} = 0,54$.

Полученные оценки качества определялись путем сравнения значений исходных (данные лесоустройства) и прогнозируемых (установленных в результате k -NN классификации) характеристик лесов для пикселей, относящихся к тренировочным участкам. Сравнительно высокие значения ошибок характерны для k -NN метода оценки лесов и не являются критичными. Считается, что точность классификации будет возрастать с увеличением размеров оцениваемых площадей [40].

Кроме типовой оценки качества классификации на основе тренировочных участков выполнялась оценка систематических и случайных ошибок определения обобщенных характеристик лесов по результатам классификации на уровне участковых лесничеств. Средствами ГИС-технологий оценивались средневзвешенные значения обобщенных лесотаксационных показателей по выделам участковых лесничеств. Например, средневзвешенные значения запаса на 1 га (см. табл. 2) определялись по следующей формуле:

$$\overline{M}_j = \frac{\sum_{i=1}^N S_i M_i}{\sum_{i=1}^N S_i}, \quad (4)$$

где \overline{M}_j – средневзвешенный запас лесных насаждений на 1 га по j -му участковому лесничеству, $\text{м}^3/\text{га}$; N – число выделов, шт.; S_i – площадь i -го выдела, га; M_i – средний запас i -го выдела, $\text{м}^3/\text{га}$.

Таблица 2

Сравнение результатов оценки запасов (м³/га) лесных насаждений на основе k-NN классификации снимка Landsat-8 с материалами лесоустройства на примере Лудейнопольского лесничества Ленинградской области

№ п/п	Участковое лесничество	Число выделов, шт./общая площадь, га	По данным лесоустройства	По результатам классификации с использованием лесотаксационных выделов	
				По данным лесоустройства	По результатам классификации с использованием лесотаксационных выделов
1	Мандрогское	3 944 / 11 019,5	248,9	215,2	198,7
2	Кондушское	4 273 / 12 733,1	201,6	201,2	183,8
3	Свирское	6 610 / 20 663,7	201,6	196,6	188,1
4	Лудейнопольское	3 110 / 13 365,2	195,9	206,7	196,8
5	Тенское	2 552 / 12 378,1	209,3	217,0	210,7
6	Шоткусское	2 016 / 8 202,6	175,9	169,4	169,9
7	Лютовское	2 392 / 12 135,8	214,4	206,5	193,1
8	Шапшинское	4 819 / 16 289,1	231,6	216,1	212,2
9	Доможировское	3 514 / 12 958,0	163,2	173,8	172,9
10	Свирское сельское	6 383 / 23 277,2	211,8	212,6	207,2
11	Яровщинское	3 944 / 17 612,7	197,7	207,6	201,4
12	Алеховщинское	4 531 / 19 343,3	217,2	220,7	219,9
13	Ребовское	7 047 / 27 082,2	235,7	223,0	222,7
14	Пирозерское	3 762 / 15 598,1	235,5	216,1	211,5
15	Алеховщинское сельское	5 128 / 18 821,0	213,7	222,7	220,5
16	Тервенинское	5 752 / 28 249,6	233,7	225,4	223,6
			Случайная ошибка определения запаса, %		±6,55
			Систематическая ошибка определения запаса, %		-1,14

Таблица 3
Сравнение результатов оценки относительной полноты и класса бонитета лесных насаждений на основе k-NN классификации снимка Landsat-8 с материалами лесоустройства на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области

№ п/п	Участковое лесничество	Относительная полнота				Класс бонитета			
		по данным лесоустройства	по результатам классификации с использованием круговых площадок	леса таксационных выделов	по результатам классификации с использованием круговых площадок	по данным лесоустройства	по результатам классификации с использованием круговых площадок	леса таксационных выделов	
1	Мандрогское	0,66	0,64	0,61	4,46	4,85	5,09		
2	Кондушское	0,62	0,63	0,60	4,96	5,04	5,29		
3	Свирское	0,63	0,63	0,62	4,90	5,03	5,14		
4	Лодейнопольское	0,67	0,64	0,64	4,73	4,66	4,66		
5	Тененское	0,66	0,63	0,63	4,59	4,50	4,55		
6	Шоткусское	0,62	0,60	0,60	5,37	5,53	5,53		
7	Луговское	0,66	0,65	0,65	4,46	4,62	4,63		
8	Шапшинское	0,62	0,62	0,63	4,70	4,52	4,61		
9	Доможировское	0,61	0,60	0,61	5,57	5,48	5,44		
10	Свирское сельское	0,61	0,63	0,63	4,63	4,67	4,71		
11	Яровицкое	0,68	0,65	0,64	4,90	4,85	4,90		
12	Алеховицкое	0,67	0,64	0,64	4,76	4,64	4,68		
13	Ребовское	0,63	0,62	0,63	4,53	4,43	4,52		
14	Пирозерское	0,68	0,63	0,64	4,47	4,49	4,57		
15	Алеховицкое сельское	0,60	0,63	0,63	4,45	4,39	4,44		
16	Тервницкое	0,64	0,63	0,63	4,17	4,26	4,32		
Случайная ошибка, %		–	±3,18	±3,31	–	±3,14	±4,21		
Систематическая ошибка, %		–	–1,66	–2,07	–	0,42	1,93		

Таблица 4

Сравнение результатов оценки площадей (га) групп лесных насаждений на основе k-NN классификации снимка Landsat-8 с материалами лесоустройства на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области

№ п/п	Участковое лесничество	Лиственные			Хвойные		
		по данным лесоустройства	по результатам классификации с использованием круговых площадок	лесотаксационных выделов	по данным лесоустройства	по результатам классификации с использованием круговых площадок	лесотаксационных выделов
1	Мандрогское	4 588,1	6 871,5	2 083,1	6 430,7	4 198,9	8 987,3
2	Кондушское	2 315,7	10 730,1	1 297,4	10 415,7	2 083,7	11 516,4
3	Сви́рское	5 676,6	16 685,3	4 419,7	14 979,9	4 114,4	16 380,0
4	Лодейнопольское	5 386,5	8 118,6	6 380,7	7 978,7	5 329,7	7 067,6
5	Тененское	5 324,4	4 795,6	6 098,0	7 039,1	7 658,4	6 356,0
6	Шоткусское	952,8	7 020,7	792,7	7 213,9	1 238,1	7 466,1
7	Лноговское	6 043,7	7 820,1	6 486,0	6 092,1	4 385,1	5 719,1
8	Шаплинское	5 600,5	4 723,3	6 963,3	10 688,6	11 657,3	9 417,3
9	Доможировское	1 911,1	11 664,8	2 090,0	11 033,8	1 370,9	10 945,7
10	Сви́рское сельское	9 365,6	11 332,2	9 269,8	13 880,0	12 097,4	14 159,7
11	Ярови́нское	2 456,8	6 429,7	2 933,4	15 153,9	11 294,0	14 790,3
12	Алехови́нское	2 872,2	3 747,7	4 511,3	16 471,1	15 705,5	14 941,9
13	Ребовское	11 903,2	4 558,7	11 542,6	15 179,0	22 696,7	15 712,7
14	Пирозерское	5 642,6	11 361,2	6 437,3	9 949,2	4 324,7	9 248,7
15	Алехови́нское сельское	9 195,6	4 814,8	8 999,6	9 625,4	14 119,2	9 934,4
16	Терени́нское	17 912,2	5 899,3	15 998,5	10 224,4	21 731,4	11 632,2
Случайная ошибка, %		–	±208,71	±12,93	–	±55,05	±26,99
Систематическая ошибка, %		–	121,68	–1,69	–	–18,23	0,63

Полученные значения систематических и случайных ошибок определения обобщенных характеристик лесов по участковым лесничествам Лодейнопольского лесничества оказались незначительными (табл. 2, 3). Для таких характеристик лесов, как средний запас, относительная полнота и средний класс бонитета, значения систематических и случайных ошибок были близкими. По перечисленным показателям также не отмечается значительной разницы между двумя выбранными вариантами тренировочных участков (круговые пробные площади и выделы лесоустройства).

Полученные результаты в целом не противоречат литературным данным. Ошибки k-NN классификации на уровне пикселей и насаждений хорошо изучены в Финляндии [29, 40, 43].

Для нахождения площадей групп преобладающих древесных пород по участковым лесничествам определялось число пикселей, отнесенных к хвойной или лиственной группе. Затем число пикселей умножалось на площадь одного пикселя (сторона пикселя снимка Landsat-8 – 30 м, площадь пикселя – 0,09 га).

Оценка результатов классификации по преобладающим породам показала неудовлетворительные результаты. Поэтому использовали группировку покрытых лесом площадей по преобладающим породам (хвойные и лиственные). Приемлемые по качеству классификации результаты были получены только для второго варианта тренировочных участков (на основе выделов лесоустройства).

В табл. 4 приведены результаты сравнения площадей групп насаждений по данным материалов лесоустройства и k-NN классификации. Значительные ошибки при использовании варианта 1 пробных участков (круговые площадки радиусом 10 м) можно объяснить недостаточным охватом пикселей и варьированием породного состава (соответственно, и спектральных характеристик) в пределах лесотаксационных выделов. Так, одна круговая площадка радиусом 10 м может располагаться в пределах от одного до четырех пикселей Landsat-8 с размером стороны 30 м. При использовании в качестве тренировочных участков лесотаксационных выделов учитываются десятки и сотни пикселей в пределах выделов. В производственных условиях (при организации и проведении полевых работ по НИЛ) сплошной пересчет деревьев на значительных по площади выделах будет слишком трудоемким, а сам процесс выделения границ лесостроительных выделов достаточно сложным, субъективным и не связанным с выполнением работ по НИЛ. Вероятно, компромиссом между рассмотренными в данном исследовании вариантами (круговыми площадками и выделами лесоустройства) являются кластеры из 4–12 близко расположенных пробных площадей, используемые в большинстве стран.

Заключение

Результаты экспериментального исследования по оценке обобщенных характеристик лесов путем выполнения автоматической классификации космических снимков k-NN методом подтвердили перспективность указанного

метода. Ряд обобщенных характеристик лесов на уровне участковых лесничеств (средний запас на 1 га, площади хвойных и лиственных насаждений, средняя относительная полнота и класс бонитета) был определен с приемлемой точностью.

При этом исследование проводилось по упрощенному алгоритму (в качестве тренировочных данных использовались материалы лесоустройства; установки k-NN классификации были фиксированными; маски территорий, исключаемых их анализа, не применялись; использовалась одна сцена Landsat-8).

Наиболее очевидным направлением возможного практического применения k-NN метода в России является ГИЛ. Ожидаемая в ближайшее время модификация методики ГИЛ с высокой степенью вероятности затронет те же аспекты, что и в большинстве стран, чьи методики НИЛ за последние десятилетия эволюционировали по схожему сценарию. К этим аспектам относятся: регулярное размещение наземных ПП, активное использование материалов дистанционного зондирования и средств их обработки (в частности, k-NN метода), использование дополнительных пространственных данных и геоинформационных технологий. Результатами внедрения перечисленных изменений в методики НИЛ стали: сокращение расходов на НИЛ, повышение точности, актуальности и оперативности выполнения оценок характеристик лесов, возможность одновременного охвата значительных по площади и разнообразных по пространственной структуре территорий (включая труднодоступные леса).

Знакомство с k-NN методом классификации материалов ДДЗ, как эффективным современным инструментом инвентаризации и мониторинга лесов, представляет интерес для отечественной лесной науки, лесоустроительного производства и лесного образования. Также целесообразно инициирование и проведение научно-исследовательской и опытно-экспериментальной деятельности в данном направлении с изучением накопленного мирового опыта и возможной адаптацией k-NN метода к условиям отечественных лесохозяйственных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А.С.* Теоретические основы государственной (национальной) инвентаризации лесов // Лесн. хоз-во. 2009. № 4. С. 31–33.
2. *Алексеев А.С.* Методологические основы организации и проведения государственной инвентаризации лесов // Материалы Всерос. совещ. «Использование материалов государственной инвентаризации лесов в интересах охраны окружающей среды», Брянск, 9–10 окт. 2013 г. М.: Рослесинфорг, 2013. С. 87–96.
3. *Архипов В.И.* Особенности национальной инвентаризации. Какая инвентаризация лесов требуется России? // Материалы Всерос. совещ. «Использование материалов государственной инвентаризации лесов в интересах охраны окружающей среды», Брянск, 9–10 окт. 2013 г. М.: Рослесинфорг, 2013. С. 105–112.
4. *Белова Е.И., Еришов Д.В.* Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение. 2015. № 5. С. 339–345.
5. *Гольцев В., Толонен Т., Сюнёв В., Далин Б., Герасимов Ю., Карвинен С.* Лесозаготовки и логистика в России – в фокусе научные исследования и бизнес-возможности: отчет исследовательского проекта (заключительный) / ред. С. Карвинен // Working Papers of the Finnish Forest Research Institut. 2012. Вып. 221. 159 с. Режим доступа: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp221.htm> (дата обращения: 16.02.2019).

6. *Жирин 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.

7. *Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П.* Эколого-динамическое исследование лесообразовательного процесса по космическим снимкам // Лесоведение. 2013. № 5. С. 76–85.

8. *Жирин 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.

9. *Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П.* Оценка влияния морфологии древесного полога и рельефа на спектральные характеристики лесов по данным Landsat // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 10–20. DOI: 10/7868/S0205961416050080

10. *Жирин 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. Т. 9, № 1. С. 87–94.

11. *Креснов В.В., Страхов В.В., Филипчук А.В.* Национальная инвентаризация лесов в зарубежных странах // Лесхоз. информ. 2008. № 10-11. С. 53–88.

12. Лесохозяйственный регламент Лодейнопольского лесничества Ленинградской области / ФГБУ «РОСЛЕСИНФОРГ» филиал ФГБУ «РОСЛЕСИНФОРГ» «СЕВЗАПЛЕСПРОЕКТ». СПб., 2017. 306 с.

13. *Мальшиева Н.В.* Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУЛ, 2012. 154 с.

14. *Нештаев М.В., Нештаев В.Ю.* Комбинированный метод картографирования растительности (на примере Лапландского заповедника) // Изв. СПбЛТА. 2012. Вып. 201. С. 29–40.

15. *Перепечина Ю.И., Глушенков О.И., Глушенков И.С.* Государственная инвентаризация российских лесов // Лесотехн. журн. 2014. № 2. С. 60–67. DOI: 10.12737/4508

16. *Перепечина Ю.И., Глушенков О.И., Корсиков Р.С.* Определение лесистости и количественных характеристик лесов по космическим снимкам Sentinel-2 (на примере Шебекинского муниципального района Белгородской обл.) // Лесхоз. информ. 2017. № 4. С. 85–93. DOI: 10.24419/LNI.2304-3083.2017.4.09

17. *Савченко А.А., Выводцев Н.В.* Оценка возможностей применения данных дистанционного зондирования при мониторинге санитарного и лесопатологического состояния лесов // Учен. заметки ТОГУ. 2015. Т. 6, № 4. С. 658–661. Режим доступа: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2015/TGU_6_237.pdf (дата обращения: 16.02.2019).

18. *Сидоренков В.М., Дороженкова Э.В., Лопатин Е.В., Рябцев О.В., Сидоренкова Е.М.* Зонирование территории Удмуртской Республики по категориям среды обитания охотничьих ресурсов на основе данных спутниковой съемки Landsat 8 OLI-TIRS // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 3(19). С. 84–93. DOI: 10.12737/14156

19. *Солдатенков А.А.* Дешифрирование состава лесной растительности в условиях среднегорного рельефа // Вестн. Адыг. гос. ун-та. 2014. Сер. 4: Естеств.-мат. и техн. науки. Вып. 1(133). С. 127–130.

20. *Соромотин А.В., Бродт Л.В.* Мониторинг растительного покрова при освоении нефтегазовых месторождений по данным многозональной съемки Landsat // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Экология и природопользование. 2018. Т. 4, № 1. С. 37–49. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49

21. *Терехов А.Г., Макаренко Н.Г., Пак И.Т.* Автоматический алгоритм классификации снимков Quickbird в задаче оценки полноты леса // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 3. С. 580–583. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-580-583

22. Толкач И.В., Кравченко О.В., Ожич О.С., Таркан А.В., Ильючик М.А. Закономерности изменчивости спектральных яркостей полого основных лесобразующих пород Беларуси на снимках сканера ADS 100 // Тр. БГТУ. Сер. 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2(198). С. 43–49.
23. Фарбер С.К., Брюханов Н.В. Материалы массовой таксации и государственной инвентаризации лесов: характеристика расхождений, причины, анализ // Сиб. лесн. журн. 2014. № 5. С. 16–28.
24. Черных Д.В., Бирюков Р.Ю., Золотов Д.В., Вагнер А.А. Антропогенные модификации и трансформации ландшафтов в бассейне р. Касмала: классификация и динамика на основе данных дистанционного зондирования // Вестн. Алтайской науки. 2014. № 1(19). С. 233–240.
25. Шарикалов А.Г., Якутин М.В. Анализ состояния таежных экосистем с использованием методики автоматизированного дешифрирования // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2014. Вып. 3-1(83). С. 123–127. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-22
26. Ярошенко А.Ю., Владимирова Н.А., Кобяков К.Н. Предложения по оптимизации государственной инвентаризации лесов с точки зрения использования ее результатов в интересах охраны окружающей среды // Материалы Всерос. совещ. «Использование материалов государственной инвентаризации лесов в интересах охраны окружающей среды», Брянск, 9–10 окт. 2013 г. М.: Рослесинфорг, 2013. С. 82–86.
27. Beaudoin A., Bernier P.Y., Guindon L., Villemaire P., Guo X.J., Stinson G., Bergeron T., Magnussen S., Hall R.J. Mapping Attributes of Canada's Forests at Moderate Resolution through kNN and MODIS Imagery // Canadian Journal of Forest Research. 2014. Vol. 44(5). Pp. 521–532. DOI: 10.1139/cjfr-2013-0401
28. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.2.0.1. 2019. 212 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.29474.02242/1
29. Forest Inventory: Methodology and Applications / ed. by A. Kangas, M. Maltamo. Netherlands: Springer, 2006. 362 p. DOI: 10.1007/1-4020-4381-3
30. Franco-Lopez H., Ek A.R., Bauer M.E. Estimation and Mapping of Forest Stand Density, Volume, and Cover Type Using the k-Nearest Neighbors Method // Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 77, iss. 3. Pp. 251–274. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00209-7
31. Gjertsen A.K. Accuracy of Forest Mapping Based on Landsat TM Data and a kNN-Based Method // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 7–11.
32. Gjertsen A.K. Accuracy of Forest Mapping Based on Landsat TM Data and a kNN-Based Method // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 110, iss. 4. Pp. 420–430. DOI: 10.1016/j.rse.2006.08.018
33. Haapanen R., Ek A. Software and Instructions for kNN Applications in Forest Resources Description and Estimation // Department of Forest Resources Staff Paper Series. St. Paul, MN: University of Minnesota, 2001. No. 152. 19 p.
34. Haapanen R., Ek A.R., Bauer M.E., Finley A.O. Delineation of Forest/Nonforest Land Use Classes Using Nearest Neighbor Methods // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 89, iss. 3. Pp. 265–271. DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.002
35. Katila M., Tomppo E. Selecting Estimation Parameters for the Finnish Multi-source National Forest Inventory // Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 76, iss. 1. Pp. 16–32. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00188-7
36. Koch B. Remote Sensing Supporting National Forest Inventories NFA // Knowledge Reference for National Forest Assessments. Rome: FAO, 2015. Pp. 77–92. Режим доступа at: <http://www.fao.org/3/a-i4822e.pdf> (дата обращения: 21.02.19).
37. Koukal T., Suppan F., Schneider W. The Impact of Relative Radiometric Calibration on the Accuracy of kNN-Predictions of Forest Attributes // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 17–21.
38. McInerney D., Pekkarinen A., Haakana M. Combining Landsat ETM+ with Field Data for Ireland's National Forest Inventory – A Pilot Study for co. Clare // Proceedings of

ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 12–16.

39. *McRoberts R.E.* Remote Sensing Support for the National Forest Inventory of the United States of America // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 1–6.

40. *McRoberts R.E., Tomppo E.O.* Remote Sensing Support for National Forest Inventories // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 110, iss. 4. Pp. 412–419. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.034

41. *Meng Q., Cieszewski C.J., Madden M., Borders B.E.* K Nearest Neighbor Method for Forest Inventory Using Remote Sensing Data // GIScience & Remote Sensing. 2007. Vol. 44, iss. 2. Pp. 149–165. DOI: 10.2747/1548-1603.44.2.149

42. *Nilsson M., Holm S., Reese H., Wallerman J., Engberg J.* Improved Forest Statistics from the Swedish National Forest Inventory by Combining Field Data and Optical Satellite Data Using Post-Stratification // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 22–26.

43. *Özsakabaşı F.* Classification of Forest Areas by k Nearest Neighbor Method: Case Study, Antalya. M.Sc. in Geodetic and Geographic Information Thesis. Antalya: Middle East Technical University, 2008. 101 p.

44. Supervised kNN Classifier (*kNN*). Updated: 22.05.2017. 19 p. Режим доступа: https://github.com/m6ev/kNN/blob/master/kNN_Documentation.pdf (дата обращения: 21.02.19).

45. *Tomppo E.O.* The Finnish Multi-Source Inventory // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 27–37.

46. *Tomppo E., Czaplewski R., Mäkisara K.* The Role of Remote Sensing in Global Forest Assessment. Forest Resources Assessment – WP no. 61. Rome: FAO, 2002. Режим доступа: <http://www.fao.org/docrep/006/ad650e/AD650E00.htm#TopOfPage> (дата обращения: 21.02.19).

47. *Tomppo E., Haakana M., Katila M., Peräsaari J.* Multi-Source National Forest Inventory: Methods and Applications. Netherlands: Springer, 2008. 373 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8713-4

48. *Tomppo E., Halme M.* Using Coarse Scale Forest Variables as Ancillary Information and Weighting of Variables in k-NN Estimation: A Genetic Algorithm Approach // Remote Sensing of Environment, 2004. Vol. 92, iss. 1. Pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.rse.2004.04.003

Поступила 21.02.19

UDC 630*5:528.85:630*9

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.45

**The Method for Determining Forest Characteristics Based on Earth Remote Sensing Materials, Forest Management Data and the k-NN Algorithm
(Case Study of Lodeynopol'skoe Forest District of Leningrad Region)**

D.M. Chernikhovskii, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; *ResearcherID: I-7020-2016*, *ORCID: 0000-0002-6375-3080*

A.S. Alekseev, Doctor of Geography, Prof.; *ResearcherID: F-6891-2010*, *ORCID: 0000-0001-8795-2888*

St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: cherndm2006@yandex.ru, a_s_alekseev@mail.ru

The Russian system of National (State) Forest Inventory (NFI) valid from 2007 is methodologically imperfect and serves as a target of criticism and discussion. Insufficient attention paid to remote sensing should be attributed to the system's weaknesses. A possible way of improving the NFI system is the use of automatic classification of forests' characteristics based on materials of Earth remote sensing. One of the advanced automatic methods for

forest remote sensing materials classification is k-NN or k-nearest neighbors algorithm, which have been successively used in the NFIs in other countries. It is based on regression between the spectral response characteristics of pixels with known forest characteristics and remaining pixels of the image. Questions of practical application of this method for the purposes of NFI were first raised and studied by Finnish researchers in the 1990s. Over the past two decades, a considerable amount of research in this area has been carried out in different countries. The purpose of our research is to assess the feasibility of using the k-NN method for determining the generalized characteristics of forests on the example of the Lodeynopol'skoe forest district in Leningrad region. The forest district area is 401,866 ha. It consists of 16 forest sub-districts. A regular network was created at a pitch of 1×1 km in order to form a set of trial plots for the classification by the means of GIS-technologies within the forest district. Round-shaped plots with a radius of 10 m or forest inventory compartments were used as trial plots located in the network nodes. Forest description for both types of plots was taken from the forest management data. Landsat-8 images were used for the classification (spectral channels: GREEN, RED, NIR, SWIR 2). The Landsat-8 images were automatically classified according to a number of forest inventory characteristics: average growing stock per 1 ha; middle class of bonitet; average relative density; share of coniferous and deciduous plantations area. The results of the k-NN classification were compared with the forest management materials. Systematic errors in the assessment of growing stocks, completeness and bonitet for the territory of Lodeynopol'skoe forest district made up less than 5 %. The obtained results confirm the potential of further study of conceptual and practical issues of the k-NN method application for determining forest characteristics. The development of this direction can contribute to the improvement of the Russian State Forest Inventory methodology.

For citation: Chernikhovskii D.M., Alekseev A.S. The Method for Determining Forest Characteristics Based on Earth Remote Sensing Materials, Forest Management Data and the k-NN Algorithm (Case Study of Lodeynopol'skoe Forest District of Leningrad Region). *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 45–65. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.45

Keywords: k-nearest neighbors algorithm, remote sensing methods, forest inventory, automatic classification of images.

REFERENCES

1. Alekseev A.S. Theoretical Foundations of the State (National) Forest Inventory. *Lesnoye khozyaystvo*, 2009, no 4, pp. 31–33.
2. Alekseev A.S. Methodological Foundations of Organization and Conducting the State Forest Inventory. *Proceedings of the All-Russian Conf. "The Use of Materials of the State Forest Inventory for Environmental Protection"*, Bryansk, October 9–10, 2013. Moscow, Roslesinform Publ., 2013, pp. 87–96.
3. Arkhipov V.I. Special Features of the National Forest Inventory. What Kind of Forest Inventory does Russia Need? *Proceedings of the All-Russian Conf. "The Use of Materials of the State Forest Inventory for Environmental Protection"*, Bryansk, October 9–10, 2013. Moscow, Roslesinform Publ., 2013, pp. 105–112.
4. Belova E.I., Ershov D.V. Assessing Reforestation on Clear Cuts Based on Landsat Time Series. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 5, pp. 339–345.
5. Gol'tsev V., Tolonen T., Syunev V., Dalin B., Gerasimov Yu., Karvinen S. Wood Harvesting and Logistics in Russia – Focus on Research and Business Opportunities: Final Report of the Research Project. Ed. by S. Karvinen. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. 2012, iss. 221. 159 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp221.htm> (Accessed 16.02.19).
6. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Application of Space Images for Reforestation Dynamics Evaluating on the Plane Territories. *Sovremennye problemy*

distantcionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2011, vol. 8, no. 2, pp. 208–216.

7. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. The Eco-Dynamical Study of Forest-Forming Process with Space Imagery. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2013, no. 5, pp. 76–85.

8. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Dynamics of Spectral Brightness for Species/Age Structure of Groups of the Forest Types on LANDSAT Satellite Images. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2014, no. 5, pp. 3–12.

9. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Influence of Forest Canopy Morphology and Relief on Spectral Characteristics of Taiga Forests. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2016, no. 5, pp. 10–20. DOI: 10/7868/S0205961416050080

10. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P., Zukert N.V. Seasonal Informative Properties of Multispectral High-Resolution Space Images for Studying of Forest Species and Age Dynamics. *Sovremennye problemy distantcionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2012, vol. 9, no. 1, pp. 87–94.

11. Kresnov V.V., Strakhov V.V., Filipchuk A.V. National Forest Inventory in Foreign Countries. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2008, vol. 10-11, pp. 53–58.

12. *Forest Management Regulation of the Lodeynopol'skoe Forest District of Leningrad Region*. FSBI «ROSLESINFORG», Branch of the FSBI «ROSLESINFORG» «SEVZAPLESPROEKT». Saint Petersburg, 2017. 306 p.

13. Malysheva N.V. *Automated Interpretation of Aerospace Images of Forest Stands*: Educational Textbook. Moscow, MSTU Publ., 2012. 154 p.

14. Neshataev M.V., Neshataev V.Yu. Combined Method for Vegetation Mapping (On the Example of the Lapland Reserve). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2012, iss. 201. pp. 29–40.

15. Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Glushenkov I.S. State Forest Inventory of Russian Forests. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, no. 2, pp. 60–67. DOI: 10.12737/4508

16. Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Korsikov R.S. Automated Detection of Forest Cover and Forest Characteristics Kolichestvennykh of Municipal Shebekinskiy District of the Belgorod Region on Space. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2017, no. 4, pp. 85–93. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2017.4.09

17. Savchenko A.A., Vyvodzev N.V. Evaluate the Possible Application Remote Sensing Data for Monitoring the Health and Forest State Forests. *Uchenye zametki TOGU* [Scientists notes PNU], 2015, vol. 6, no. 4, pp. 658–661. Available at: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2015/TGU_6_237.pdf (Accessed 16.02.19).

18. Sidorenkov V.M., Doroshenkova E.V., Lopatin E.V., Ryabtsev O.V., Sidorenkova E.M. Zoning of the Udmurtija Republic Territory by Game Resource Habitat Categories Based on Landsat 8 Oli-Tirs Satellite Survey Data. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2015, vol. 5, no. 3(19), pp. 84–93. DOI: 10.12737/14156

19. Soldatenkov A.A. Interpretation of Structure of Forest Vegetation in Conditions of Mid-Mountain Relief. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [The Bulletin of Adyghe State University. Series 4: Natural-Mathematical and Technical Sciences], 2014, iss. 1(133), pp. 127–130.

20. Soromotin A.V., Brodt L.V. Monitoring of Vegetation Cover during the Development of Oil and Gas Fields According to the Landsat Multispectral Survey Data. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodnopol'zovanie* [Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology], 2018, vol. 4, no. 1, pp. 37–49. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49

21. Terehov A.G., Makarenko N.G., Pak I.T. Automatic Classification Algorithm of QuickBird Images in the Problem of Evaluating of Forest Completeness. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2014, vol. 38, iss. 3, pp. 580–583. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-580-583

22. Tolkach I.V., Kravchenko O.V., Ozhich O.S., Tarkan A.V., Il'yuchik M.A. Regularities of Variability of the Spectral Brightness Canopy of the Main Forest Species of Belarus on Images of Scanner ADS 100. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyayemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry. Environmental management. Reprocessing of renewable resources], 2017, no. 2(198), pp. 43–49.
23. Farber S.K., Bryuhanov N.V. Mass Forest Survey and State Forest Inventory Data: Specification of the Discrepancies, Causes, Analysis. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2014, no. 5, pp. 16–28.
24. Chernykh D.V., Biryukov R.Yu., Zolotov D.V., Vagner A.A. Anthropogenic Modifications and Transformations of Landscapes in the Basin of the Kasmala River: Classification and Dynamics Based on the Remote Sensing Data. *Vestnik altaiskoy nauki*, 2014, no. 1(19), pp. 233–240.
25. Sharikalov A.G., Yakutin M.V. The Analysis of Taiga Ecosystems Condition Applying Automatic Decoding Method. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya of Altai State University], 2014, iss. 3-1(83), pp. 123–127. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-22
26. Yaroshenko A.Yu., Vladimirova N.A., Kobayakov K.N. Suggestions on Optimizing the State Forest Inventory in Turms of Using Its Results for Environmental Protection. *Proceedings of the All-Russian Workshop "The Use of Materials of the State Forest Inventory for Environmental Protection"*, Bryansk, October 9–10, 2013. Moscow, Roslesinform Publ., 2013, pp. 82–86.
27. Beaudoin A., Bernier P.Y., Guindon L., Villemaire P., Guo X.J., Stinson G., Bergeron T., Magnussen S., Hall R.J. Mapping Attributes of Canada's Forests at Moderate Resolution through kNN and MODIS Imagery. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 44(5), pp. 521–532. DOI: 10.1139/cjfr-2013-0401
28. Congedo L. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.2.0.1*. 2019. 212 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.29474.02242/1
29. *Forest Inventory: Methodology and Applications*. Ed. by A. Kangas, M. Malta-mo. Netherlands, Springer, 2006. 362 p. DOI: 10.1007/1-4020-4381-3
30. Franco-Lopez H., Ek A.R., Bauer M.E. Estimation and Mapping of Forest Stand Density, Volume, and Cover Type Using the k-Nearest Neighbors Method. *Remote Sensing of Environment*, 2001, vol. 77, iss. 3, pp. 251–274. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00209-7
31. Gjertsen A.K. Accuracy of Forest Mapping Based on Landsat TM Data and a kNN-Based Method. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 7–11.
32. Gjertsen A.K. Accuracy of Forest Mapping Based on Landsat TM Data and a kNN-Based Method. *Remote Sensing of Environment*, 2007, vol. 110, iss. 4, pp. 420–430. DOI: 10.1016/j.rse.2006.08.018
33. Haapanen R., Ek A. Software and Instructions for kNN Applications in Forest Resources Description and Estimation. *Department of Forest Resources Staff Paper Series*. St. Paul, MN, University of Minnesota, 2001, no. 152. 19 p.
34. Haapanen R., Ek A.R., Bauer M.E., Finley A.O. Delineation of Forest/Nonforest Land Use Classes Using Nearest Neighbor Methods. *Remote Sensing of Environment*, 2004, vol. 89, iss. 3, pp. 265–271. DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.002
35. Katila M., Tomppo E. Selecting Estimation Parameters for the Finnish Multi-source National Forest Inventory. *Remote Sensing of Environment*, 2001, vol. 76, iss. 1, pp. 16–32. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00188-7
36. Koch B. Remote Sensing Supporting National Forest Inventories NFA. *Knowledge Reference for National Forest Assessments*. Rome, FAO, 2015, pp. 77–92. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i4822e.pdf> (Accessed 21.02.19).

37. Koukal T., Suppan F., Schneider W. The Impact of Relative Radiometric Calibration on the Accuracy of kNN-Predictions of Forest Attributes. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 17–21.

38. McInerney D., Pekkarinen A., Haakana M. Combining Landsat ETM+ with Field Data for Ireland's National Forest Inventory – A Pilot Study for co. Clare. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 12–16.

39. McRoberts R.E. Remote Sensing Support for the National Forest Inventory of the United States of America. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 1–6.

40. McRoberts R.E., Tomppo E.O. Remote Sensing Support for National Forest Inventories. *Remote Sensing of Environment*, 2007, vol. 110, iss. 4, pp. 412–419. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.034

41. Meng Q., Cieszewski C.J., Madden M., Borders B.E. K Nearest Neighbor Method for Forest Inventory Using Remote Sensing Data. *GIScience & Remote Sensing*, 2007, vol. 44, iss. 2, pp. 149–165. DOI: 10.2747/1548-1603.44.2.149

42. Nilsson M., Holm S., Reese H., Wallerman J., Engberg J. Improved Forest Statistics from the Swedish National Forest Inventory by Combining Field Data and Optical Satellite Data Using Post-Stratification. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 22–26.

43. Özsakabaşı F. *Classification of Forest Areas by k Nearest Neighbor Method: Case Study, Antalya*. M.Sc. in Geodetic and Geographic Information Thesis. Antalya, Middle East Technical University, 2008. 101 p.

44. Supervised kNN Classifier (*kNN*). Updated: 22.05.2017. 19 p. Available at: https://github.com/m6ev/kNN/blob/master/kNN_Documentation.pdf (Accessed 21.02.19).

45. Tomppo E.O. The Finnish Multi-Source Inventory. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 27–37.

46. Tomppo E., Czaplewski R., Mäkisara K. *The Role of Remote Sensing in Global Forest Assessment. Forest Resources Assessment – WP no. 61*. Rome, FAO, 2002. Available at: <http://www.fao.org/docrep/006/ad650e/AD650E00.htm#TopOfPage> (Accessed 21.02.19).

47. Tomppo E., Haakana M., Katila M., Peräsaari J. *Multi-Source National Forest Inventory: Methods and Applications*. Netherlands, Springer, 2008. 373 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8713-4

48. Tomppo E., Halme M. Using Coarse Scale Forest Variables as Ancillary Information and Weighting of Variables in k-NN Estimation: A Genetic Algorithm Approach. *Remote Sensing of Environment*, 2004, vol. 92, iss. 1, pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.rse.2004.04.003

Received on February 21, 2019