

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 630\*2 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.2.36.43

**Определение таксационных показателей  
чистых насаждений сосны  
по данным спутника «Канопус-В»**

**В. М. Сидоренков**, к. с.-х. н., [lesvn@yandex.ru](mailto:lesvn@yandex.ru)

ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства»,  
г. Пушкино, Московская область, Российская Федерация

**Д. О. Астапов**, [astdann09@yandex.ru](mailto:astdann09@yandex.ru)

ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства»,  
г. Пушкино, Московская область, Российская Федерация

**О. В. Перфильева**, к. т. н., [kushnyr@ntsomz.ru](mailto:kushnyr@ntsomz.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**О. В. Рябцев**, к. с.-х. н., [sektorles@yandex.ru](mailto:sektorles@yandex.ru)

ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства»,  
г. Пушкино, Московская область, Российская Федерация

**А. С. Рыбкин**, [a.rybkin@ntsomz.ru](mailto:a.rybkin@ntsomz.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Развитие инновационных технологий определения количественных и качественных характеристик лесов является приоритетным направлением проведения лесотаксационных работ. Содержащиеся в статье методические аспекты дают возможность дешифрирования запаса, полноты, а также количества деревьев в насаждении по данным съемки со спутника «Канопус-В» в зимний период. Возможность определения перечисленных показателей позволяет применять результаты работы при выполнении широкого спектра работ в области лесоустройства, мониторинга, использования и воспроизводства лесов. Исследование показывает значительный потенциал технологий по автоматизации лесотаксационного дешифрирования на базе геоинформационных программных продуктов.

**Ключевые слова:** насаждения сосны, дешифрирование, количественные и качественные показатели лесов, запас, полнота насаждений, количество деревьев, «Канопус-В»

## Determination of Taxation Indicators of Pure Pine Plantations According to the Data of the Kanopus-V satellite

**V. M. Sidorenkov**, *Cand. Sci. (Agriculture)*, [lesvn@yandex.ru](mailto:lesvn@yandex.ru)  
*All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry,*  
*Pushkino, Moscow Region, Russian Federation*

**D. O. Astapov**, [astdann09@yandex.ru](mailto:astdann09@yandex.ru)  
*All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry,*  
*Pushkino, Moscow Region, Russian Federation*

**O. V. Perfilieva**, *Cand. Sci. (Engineering)*, [kushnyr@ntsomz.ru](mailto:kushnyr@ntsomz.ru)  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**O. V. Ryabtsev**, *Cand. Sci. (Agriculture)*, [sektorles@yandex.ru](mailto:sektorles@yandex.ru)  
*All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry,*  
*Pushkino, Moscow Region, Russian Federation*

**A. S. Rybkin**, [a.rybkin@ntsomz.ru](mailto:a.rybkin@ntsomz.ru)  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The development of innovative technologies for determining the quantitative and qualitative characteristics of forests is a priority area for carrying out forest inventory work. The methodological aspects contained in the article make it possible to decipher the stock, completeness, as well as the number of trees in the plantation according to the surveying data from the Kanopus-V satellite in winter. The ability to determine these indicators makes it possible to apply the results when performing a wide range of work in the field of forest management, monitoring, use and reproduction. The study shows a significant potential of technologies for automating forest inventory interpretation based on geoinformation software products.

**Keywords:** Pine forest stands, deciphering, quantitative and qualitative indicators of forests, standing volume, forest density, number of trees, Kanopus-V

## Введение

Актуальность темы заключается в развитии методов и технологий лесотаксационного дешифрирования в целях повышения эффективности лесоправления, лесоустройства, систем мониторинга лесов, предусмотренных Стратегией развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. Особое значение в рамках обозначенных направлений имеют технологии импортозамещения, заключающиеся в использовании информации с российских космических аппаратов мультиспектральной съемки. Решение данного вопроса осуществлялось с использованием мультиспектральной съемки со спутника «Канопус-В».

Анализ литературных источников показывает, что в большинстве работ [1, 5, 7, 8] определение количественных и качественных характеристик лесов осуществляется в основном с использованием съемки с иностранных мультиспектральных спутников Sentinel-2, Landsat-8 [9–13]. Такая тенденция связана с возможностями бесплатного получения данных спутниковой съемки, а также с возможностью использования бесплатного программного обеспечения для предварительной обработки информации. В решении задач определения количественных и качественных характеристик лесов важное значение имеет сезонность определения показателей. Ранее проведенные исследования показывают, что для определения запаса, полноты насаждений, количества деревьев на участке наиболее высокая точность характерна при дешифрировании зимних снимков [1]. В этом случае из-за маскирования снегом напочвенного покрова снижаются искажения спектрально-отражательных характеристик снимков и, как следствие, повышается точность статистических моделей оценки запаса и полноты насаждения, количества деревьев.

Результаты обзора других исследований показывают возможность определения таксационных показателей насаждений по их спектрально-отражательным характеристикам на основе их связи с вегетационными индексами [3, 5, 7, 8]. Преимуществом использования вегетационных индексов является комплексный подход связи двух и более спектральных каналов с количественными показателями лесных насаждений. Изменение спектраль-

ных каналов при сезонной динамике лесных насаждений позволяет определять не только породный состав лесов, но и различную степень деградации лесных насаждений [1]. Использование индексов также эффективно для определения типов леса, связанных с избыточным переувлажнением почвы. Применение данных технологий при анализе материалов спутниковой съемки с сенсора «Канопус-В» имеет ограничение из-за незначительного количества каналов видимого и инфракрасного диапазонов. Согласно данным свойствам при проведении статистического анализа принимались во внимание взаимосвязи запаса, полноты насаждения и количества деревьев со спектрально-отражательными характеристиками в зеленом, красном и инфракрасном каналах [2, 4].

## Методы

При анализе снимков использовались данные 54 пробных площадей, заложенных на территории Алтайского края. Пробные площади представляли собой насаждения сосны различного возраста, полноты и запаса. Закладка пробных площадей осуществлялась в соответствии с требованиями проведения лесотаксационных работ, содержащимися в лесоустроительной инструкции. Пробные площади закладывались по методу круговых площадок постоянного радиуса с использованием оборудования Haglof. Учет деревьев проводился по принятым в таксации леса методам; пропорционально ступеням толщины каждого яруса проводилось измерение до 10 деревьев различных пород [6]. Определение возраста деревьев осуществлялось по кернам, полученным с использованием приростного бурава Пресслера. При определении возраста учитывался период достижения деревом высоты в том месте, где проводилось взятие кернов.

Предварительная обработка данных спутниковой съемки включала радиометрическую коррекцию данных с использованием программного обеспечения, разработанного в НЦ ОМЗ в рамках соглашения о сотрудничестве по научно-исследовательской деятельности. При анализе данных применялись спутниковые снимки за зимний период (см. таблицу).

Таблица. Используемые при выполнении исследований данные спутниковой съемки с сенсора «Канопус-В»

№	Наименование КА	Виток	Маршрут	Дата	Территория
1	«Канопус-В-ИК»	2369	1	17.12.2017	Алтайский край
2	«Канопус-В-ИК»	2384	1	18.12.2017	Алтайский край
3	«Канопус-В-ИК»	3143	1	06.02.2018	Алтайский край
4	«Канопус-В1»	24231	1	03.12.2016	Алтайский край
5	«Канопус-В1»	24307	1	08.12.2016	Алтайский край
6	«Канопус-В1»	25340	2	14.12.2017	Алтайский край
7	«Канопус-В1»	25507	1	25.12.2017	Алтайский край
8	«Канопус-В1»	30004	1	18.12.2017	Алтайский край
9	«Канопус-В1»	30232	1	02.01.2018	Алтайский край
10	«Канопус-В1»	30946	2	18.02.2018	Алтайский край

Создание матрицы спектрально-отражательных характеристик пробных площадей проводилось с учетом анализа однотипности пикселей около координат центра пробы. Однородность информации по пикселям, используемым для анализа, обеспечивалась закладкой пробных площадей на участках, характерных для выдела или площади около 0,5 га рядом с центром пробы. Статистическая обработка данных пробных площадей осуществлялась в программе Statistica 13 методом полиномиальной регрессии.

## Результаты и обсуждение

Предварительный анализ данных 54 пробных площадей по снимкам в зимний период показал наличие взаимосвязей запаса, полноты насаждений, а также количества деревьев в них с зеленым, красным и инфракрасным каналами. При оценке статистической совокупности были исключены выбросы за пределами 2 сигм, что позволило исключить некорректные данные и улучшить взаимосвязи. При получении взаимосвязей таксационных показателей со спектрально-отражательными каналами использовались данные зимней съемки (см. таблицу).

Результаты статистического анализа данных показывают, что оптимальная взаимосвязь запаса насаждения со спектрально-отражательными ха-

рактеристиками наблюдается при использовании многомерной полиномиальной регрессии с зеленым, красным и инфракрасным каналами (1):

$$M = -1019,4179933 + 23\,636,3822149 \cdot B2 - 54\,542,7687256 \cdot B2^2 - 13\,360,9091225 \cdot B3 + 37\,946,9019809 \cdot B3^2 - 974,342146244 \cdot B4 + 1155,37937091 \cdot B4^2, \quad (1)$$

где  $M$  — запас насаждения, м<sup>3</sup>/га;

$B2$  — значение зеленого спектрального канала, мкм;

$B3$  — значение красного спектрального канала, мкм;

$B4$  — значение инфракрасного спектрального канала, мкм.

Коэффициент корреляции модели  $R = 0,74$ , уровень значимости  $p = 0,00006$ , что подтверждает достоверность модели и прогноза запаса насаждений (рис. 1).

Полученная модель апробирована для чистых насаждений сосны на территории ленточных боров Алтайского края (рис. 4, Б). Проверка модели на экспериментальных данных показала сложность прогноза запаса лесных насаждений, представленных молодняками до 20-летнего возраста, то есть до процессов разреживания насаждения. Данная категория объектов исключалась из анализа. В связи с природной спецификой таких

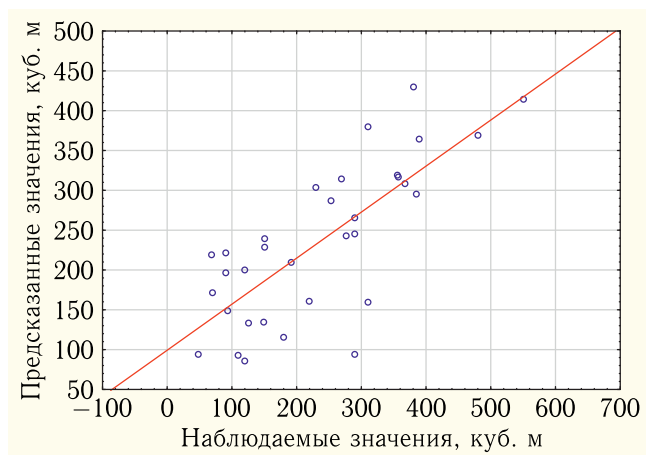


Рис. 1. Оценка предсказанных значений запаса насаждений на основе полиномиальной регрессии с зеленым, красным и инфракрасным каналами

объектов для них требуется разработка отдельных моделей по оценке запаса и полноты насаждений.

С учетом приемлемых результатов прогнозирования запаса насаждений с использованием многомерной полиномиальной регрессии с зеленым, красным и инфракрасным каналами данная модель была апробирована для определения полноты насаждения и количества деревьев, то есть показателей, которые влияют на запас насаждений. Характер взаимосвязи полноты насаждений со спектрально-отражательными характеристиками насаждений повторяет тенденцию ранее рассмотренной взаимосвязи с запасом насаждений (2):

$$P = -1,5505152 + 43,789303 \cdot B2 - 98,951078 \cdot B2^2 - 30,351867 \cdot B3 + 84,063447162 \cdot B3^2 - 0,61869201 \cdot B4 + 1,32541299981 \cdot B4^2, \quad (2)$$

где  $P$  — полнота насаждения;

$B2$  — значение зеленого спектрального канала, мкм;

$B3$  — значение красного спектрального канала, мкм;

$B4$  — значение инфракрасного спектрального канала, мкм.

Точность модели характеризуется высоким коэффициентом корреляции  $R = 0,77$ , уровень значимости модели  $p = 0,00027$ , что подтверждает достоверность модели и прогноза полноты насаждений (рис. 2).

Модель апробирована для чистых насаждений сосны (рис. 5, Б). Высокая связь полноты со спектрально-отражательными характеристиками объясняется зависимостью данного показателя от сомкнутости насаждений. Результаты статистического анализа данных показали полиномиальную взаимосвязь количества деревьев в насаждении со спектрально-отражательными характеристиками с зеленым, красным и инфракрасным каналами с коэффициентом корреляции  $R = 0,77$  и уровнем значимости  $p = 0,000157$  (3):

$$N = -1535,53291371 + 33\,243,9905691 \cdot B2 - 77\,258,1149607 \cdot B2^2 - 12\,075,2616117 \cdot B3 + 30\,323,2301553 \cdot B3^2 - 6335,7194362 \cdot B4 + 14\,907,745016 \cdot B4^2, \quad (3)$$

где  $N$  — количество деревьев, шт./га;

$B2$  — значение зеленого спектрального канала, мкм;

$B3$  — значение красного спектрального канала, мкм;

$B4$  — значение инфракрасного спектрального канала, мкм.

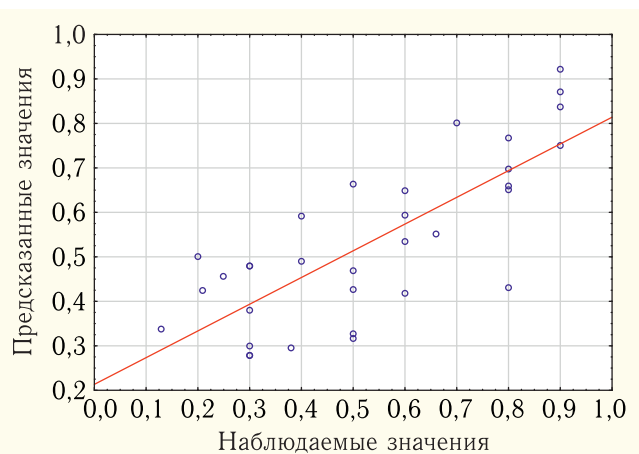


Рис. 2. Оценка предсказанных значений полноты насаждений на основе полиномиальной регрессии с зеленым, красным и инфракрасным каналами

Анализ установленной взаимосвязи количества деревьев со спектрально-отражательными характеристиками насаждения в зеленом, красном и инфракрасном каналах позволяет на высоком уровне спрогнозировать показатели количества деревьев, относительную и абсолютную полноту (рис. 3).



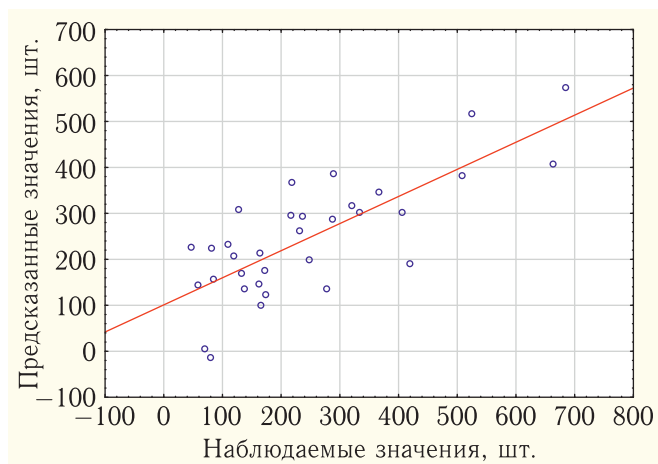


Рис. 3. Оценка предсказанных значений количества деревьев в насаждении на основе полиномиальной регрессии с зеленым, красным и инфракрасным каналами

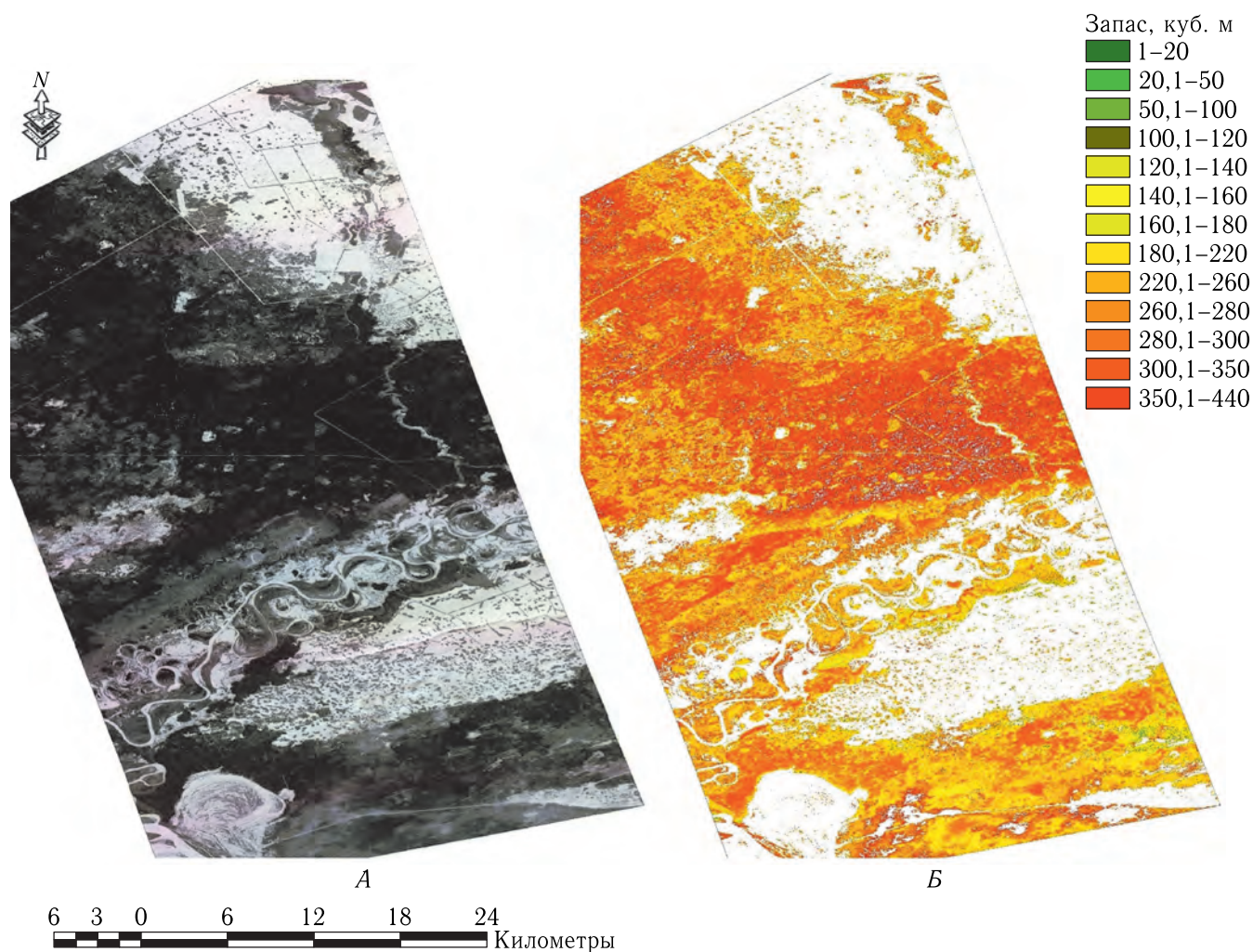


Рис. 4. Классификация района исследований по запасу насаждений с использованием модели множественной полиномиальной регрессии (А — исходный снимок, Б — классификация по запасу)

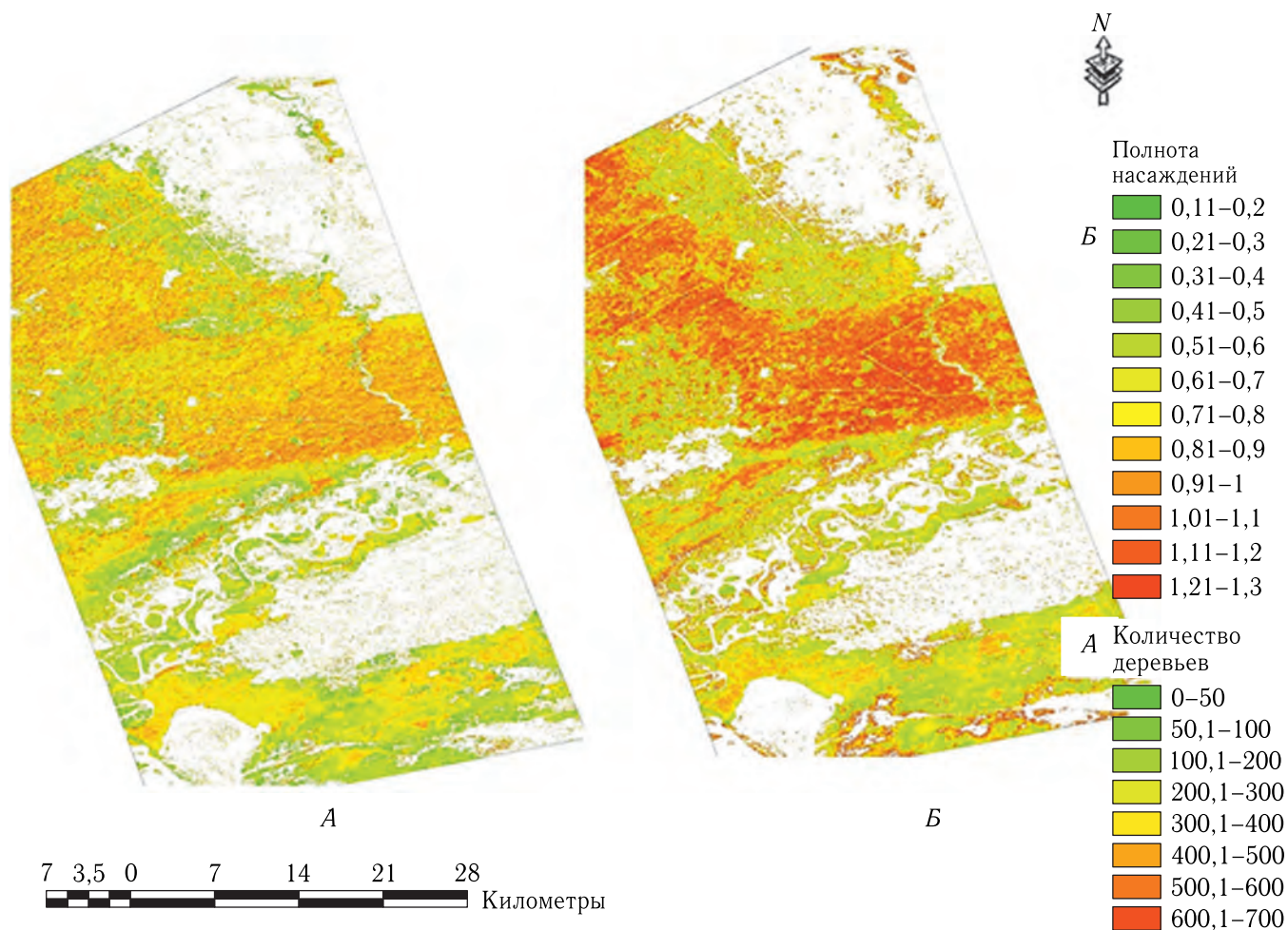


Рис. 5. Классификация района исследований по полноте насаждений и количеству деревьев с использованием модели множественной полиномиальной регрессии (А — количество деревьев, шт./га, Б — полнота)

Учитывая значительную разницу количества деревьев в молодняках до момента смыкания крон, молодняки не включались в статистический анализ. Полученная зависимость определения количества деревьев от спектральных характеристик апробирована для чистых насаждений сосны в ленточных борах (рис. 5, А)

## Выводы

Результаты исследований показывают возможность определения запаса, относительной полноты, количества деревьев однопорodных одновозрастных или условно разновозрастных насаждений сосны по данным зимней спутниковой съемки со спут-

ника «Канопус-В». При этом наиболее высокие показатели точности наблюдаются при определении полноты и количества деревьев. Ошибка приближается к установленной погрешности для второго и третьего разрядов лесоустройства. Увеличение количества экспериментальных данных позволит повысить точность моделей. В последующей работе планируется использовать данные лесоустройства на район исследований с целью увеличения точности моделей. Проведенное исследование раскрывает потенциал использования спутниковой съемки с «Канопус-В» для оценки таксационных характеристик насаждений для труднодоступных территорий Сибири, где произрастают в основном однопорodные леса с преобладанием в составе лиственницы. В рамках исследования

использовались данные ДЗЗ с космического аппарата типа «Канопус-В», в этой связи применение рассматриваемого в статье метода к данным ДЗЗ, полученным с иностранных космических аппаратов, требует дополнительного исследования.

## Список литературы

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лулян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России // М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. *Бурицев М.А., Лулян Е.А., Крамарева Л.С.* Оценка возможности использования данных спутников «Канопус-В» №3, 4 для оценки изменений в лесном покрове // Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН, 2018. С. 392.
3. *Горбунов А.В., Слободской И.Н.* Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» // Геоматика, 2010, № 1. С. 30–34.
4. *Колесник Т.В.* Оценка валидности результатов дешифрирования снимков в задачах дистанционного зондирования земли при помощи спутника «Канопус-В» // Молодой ученый, 2016, № 11(115). С. 185–187. <https://moluch.ru/archive/115/30818/> (Дата обращения 12.05.2021).
5. *Лабутина И.А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков. М., 2004. 184 с.
6. Приказ Минприроды России от 29.03.2018 № 122 (ред. от 12.05.2020) «Об утверждении Лесоустроительной инструкции» (Зарегистрировано в Минюсте России 20.04.2018 № 50859).
7. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
8. *Ялдыгина Н.Б.* Использование программного комплекса ENVI для решения задач лесного хозяйства // Геоматика, № 3. С. 34–39.
9. *Ganz S., Adler P., Kändler G.* Forest cover mapping based on a combination of aerial images and Sentinel-2 satellite data compared to National Forest Inventory data // Forests, 2020, vol. 11, № 12. P. 1322–1341.
10. *Gu H., Dai L., Wu G., Xu D., Wang S., Wang H.* Estimation of forest volumes by integrating Landsat TM imagery and forest inventory data // Science in China Series E: Technological Sciences, 2006, vol. 49, № 1. P. 54–62.
11. *Walsh S.J.* Coniferous tree species mapping using LANDSAT data // Remote Sensing of Environment, 1980, vol. 9, № 1. P. 11–26.
12. *Waser L.T., Rüetschi M., Psomas A., Small D., Rehush N.* Mapping dominant leaf type based on combined Sentinel-1/-2 data — Challenges for mountainous countries // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, vol. 180. P. 209–226.
13. *Wolter P.T., Mladenoff D.J., Host G.E., Crow T.R.* Improved forest classification in the Northern Lake States using multi-temporal Landsat imagery // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1995, vol. 61, № 9. С. 1129–1143.