

**Д.Ю. Капиталинин, В.М. Сидоренков, Ю.С. Ачиколова, Д.О. Астапов,
О.В. Рябцев, Р.В. Щекалев**

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТАКСАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЕСОТАКСАЦИОННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ SENTINEL-2

Введение. Лесоустройство зародилось из необходимости иметь точную информацию о лесах. Лесоустройство берет свое начало на рубеже XVII–XVIII веков. Именным указом Петра I от 19 ноября 1703 года впервые предписывалось описать леса в городах и уездах, во исполнение которого были учтены леса по берегам больших (Волга, Дон, Днепр) и малых (Воронеж, Десна, Хопёр) рек. Учитывая важность оценки запаса лесных ресурсов, уже в те давние времена лесоустройство и таксация леса начинают производить точный учет количественных и качественных характеристик лесных насаждений [Черных, 2018; История..., 2024; Лесоустройство..., 2024].

С вовлечением в хозяйственный оборот значительных площадей лесов, внедрением средств механизации при использовании лесов развиваются и методы учета леса. Появляются технологии дистанционного зондирования Земли, которые позволяют провести первичную оценку лесного фонда на значительных территориях. Первые работы в области использования дистанционных методов лесоустройства были начаты в 20–30-е годы прошлого века с использованием данных аэрофотосъемки на территории Ленинградской и Калининградской областей. На основе разработанных технологий в конце 50-х годов прошлого века было проведено изучение и картографирование лесов. До начала Отечественной войны Всесоюзной лесоустроительной конторой «Леспроект» сформирован комбинированный метод таксации с дешифрированием аэрофотоснимков, установлена точность инвентаризации с учетом технологий применения материалов съемки. Значительный вклад в развитие дистанционных методов в это время внесли Новосельский А.Е., Пронин А.К., Самойлович Г.Г. и др. [Дмитриев и др. 1989; Малышева, 2012].

Появление цветной спектрально-зональной съемки в конце 50-х привело к увеличению точности лесотаксационного дешифрирования и переводу из вспомогательных методов учета леса в основные. Появление в конце 60-

х годов прошлого века спутниковых данных открыло новые горизонты для лесотаксационного дешифрирования [Данюлис и др., 2004].

В то же время возросшие требования к достоверности и оперативности получения информации о лесном фонде побуждали перейти на передовые технологии ее получения и использования. Возникла необходимость в разработке технологий автоматизации процесса лесотаксационного дешифрирования различных данных.

Приведенное положение было поддержано в тексте Концепции развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли (далее ДЗЗ) до 2025 года [Концепция..., 2006]. Концепция способствует развитию российского рынка ДЗЗ, концентрируя выделенные ресурсы для достижения национальных целей использования ДЗЗ и решения приоритетных задач, определяющих темпы социально-экономического развития России. Важным направлением в достижении поставленной цели является апробация разработанных технологий лесотаксационного дешифрирования и их проверка в полевых условиях.

Современные технологические решения в области таксационного дешифрирования позволяют с достаточной точностью определить породный состав насаждений, сомкнутость полога и запас. В значительном объеме исследований, применяемых в таксации в настоящее время, решение данных вопросов построено на комплексном дешифрировании данных спутниковой съемки, сочетающем элементы визуального анализа, а также результаты обработки спектральных характеристик [Сухих, 2005; Толпин и др., 2011; Жарко и др., 2016; Барталев и др., 2017].

Алгоритмы спектрального анализа основываются на обработке данных по отражению насаждениями света. Спектральная яркость древесной растительности сильно изменяется, но имеет общность, выражающуюся в минимумах и максимумах в оптическом диапазоне спектра. Минимум наблюдается из-за поглощения солнечных лучей синего и красного участков спектра пигментами листьев растений. Максимум наблюдается в зеленом участке спектра, он обусловлен отражением излучения поверхностями листьев, а в ближней инфракрасной части спектра – внутренней структурой листа. Изменение коэффициента спектральной яркости (r) в различных диапазонах спектра позволяет сформировать спектральный образ исследуемых объектов. Полученные взаимосвязи спектральных образов с породами деревьев, их таксационными характеристиками являются основой для автоматизации процессов распознавания породного состава насаждений с учетом долевого участия пород в составе верхнего полога. Обзор ранее

проведенных исследований показывает возможность автоматизации процессов определения ряда таксационных показателей насаждений по данным съемки с сенсоров *Landsat 8*, *Sentinel-2*, *Канопус-В* [Жири́н и др., 1995; Барта́лев и др., 2016, 2017]. Спектральный образ объекта несет информацию только по его состоянию на определённый момент времени. Учитывая, что в зависимости от сезона года, характеристики лесной растительности меняются, для распознавания породного состава необходимо иметь набор спектрально-отражательных характеристик по каждому спутнику для разных сезонов года с учетом фенологической динамики для различных времен года.

Одним из основных дешифрируемых элементов является различие у разных пород процессов развития ассимиляционного аппарата в течение года. Особенно данный вопрос актуален при дешифрировании березовых и осиновых насаждений. Участие в составе насаждения различных пород существенно усложняет задачу и снижает точность исследований. В ранее проведенных исследованиях большинство алгоритмов определения породного состава лесов ориентировано на чистые насаждения. В указанных работах смешанные насаждения относятся к двум категориям – леса с преобладанием хвойных пород и леса с преобладанием лиственных пород. [Жири́н и др., 1995; Лупя́н и др., 2014; Барта́лев и др., 2016, 2017]. Сложность определения породного состава лесов по спектральным данным связана с различными коэффициентами отражения в зависимости от возраста древостоя, смешения пород и сезона года. Создание библиотек спектрально-отражательных характеристик, учитывающих влияние перечисленных выше факторов, является сложной задачей, но практически единственным выходом для реализации алгоритмов автоматического дешифрирования спутниковых данных с различных сенсоров. Перспективность данного направления доказана экспериментальными работами по дешифрированию породного состава лесов России в программном комплексе Вега (разработка ИКИ РАН) [Лупя́н и др., 2014]. Метод основывается на анализе рядов еженедельных композитов изображений r , отражающих динамику лесной растительности. Данный метод позволил сформировать временные ряды композитных изображений спутниковых наблюдений сенсором *Modis* в красном (0,62–0,67) и ближнем инфракрасном (0,84–0,88) каналах для всей территории России. Были получены данные по изменению спектральных характеристик в красном и ближнем инфракрасном каналах для всех типов насаждений. Обобщение изменений спектральных отражательных характеристик растительного покрова позволило получить данные по фенологи-

ческой динамике лесов [Лупян и др., 2014]. Учитывая проведенные ранее исследования, дешифрирование данных спутниковой съемки *Sentinel-2* осуществлялось в зимний период времени, когда спектрально-отражательные характеристики насаждений не имеют различия в зависимости от фенологических фаз.

Одним из нерешённых вопросов в области дешифрирования данных спутниковой съемки является определение возрастных характеристик насаждений. По результатам выполненных ранее оценок установлено, что даже применение современных методов классификации не позволяет получить необходимую точность определения возраста насаждений. Сложность решения затронутого вопроса зависит от проработки методов верификации условий произрастания. В частности, одним из таких факторов является бонитет насаждений, который прямо коррелирует с условиями произрастания. Точность его определения при лесоустройстве практически создает основу для зонирования территории по продуктивности условий произрастания. Бонитировка территории является основой для установления возраста насаждений по связям с запасом насаждений, полнотой и числом деревьев основного полога. В большинстве лесорастительных условий (кроме лесов северной тайги и редкостойных насаждений) зонирование территории по бонитету является показателем перманентным. В теоретическом аспекте естественно возобновившиеся леса после антропогенного воздействия (рубки ухода) или природных факторов (ветровал, вредители леса и пр.) должны приводить к формированию насаждений не ниже класса бонитета ранее существовавших [Сидоренков и др., 2019]. Результаты практических исследований показывают, что для большинства лесорастительных условий в светлохвойных формациях лесов, а также в мягколиственных вторичных лесах сохраняется данная тенденция. Исключение составляют темнохвойные формации лесов, естественная биология формирования которых (длительное произрастание под пологом) может приводить к погрешности в возрасте до 60 лет. В то же время оценка чистых или смешанных насаждений с учетом хода роста хоть и приводит к ошибке в возрасте насаждений, но практически соответствует точности их определения по показателям средней высоты, запаса и бонитету.

Эффективность ведения лесного хозяйства определяется актуальными данными лесоустройства. Перечисленные особенности взаимосвязи таксационных характеристик насаждений с их спектрально-отражательными показателями дают возможность для разработки сервисов автоматизации

определения таксационных характеристик насаждений и проверки данных лесоустройства.

В современной политике государства данное направление приобретает значительную актуальность в деятельности контролирующих органов. Одним из направлений такой политики является применение риск-ориентированного подхода при организации государственного контроля. Хотя контроль качества проведения лесоустройства не относится к контрольно-надзорной деятельности, однако, по сути, проверочные мероприятия сопоставимы с принципами применения риск-ориентированного подхода.

Риск-ориентированный подход представляет собой метод организации и осуществления контроля, при котором в предусмотренных случаях выбор интенсивности (формы, продолжительности, периодичности) проведения мероприятий по контролю определяется отнесением производственных объектов к определенной категории риска. Соответствующие категории риска при контроле качества проведения лесоустройства необходимо устанавливать с учетом тяжести потенциальных негативных последствий возможного несоблюдения обязательных требований, а также с учетом оценки вероятности такого несоблюдения.

Основными нормативно-правовыми актами при контроле качества проведения лесоустройства являются Лесоустроительная инструкция [Приказ..., 2022] и Регламент [Приказ..., 2024]. Согласно тексту Лесоустроительной инструкции заказчик контролирует организацию и оценивает качество проведения полевых работ по таксации лесов исполнителем. Также заказчик проводит выборочную проверку полевых работ по таксации лесов, при которой в отношении исполнителя единовременной проверке подлежат 30 лесотаксационных выделов при средней величине лесотаксационного выдела до 15 гектар включительно и 20 лесотаксационных выделов при средней величине лесотаксационного выдела более 15 гектар.

В среднем на объект лесоустройства (от лесопользователя с десятком кварталов в аренде до полноценного лесничества с сотнями кварталов) приходится порядка тысячи выделов. Таким образом, проверке подвергается менее 3% лесотаксационных выделов на каждый объект лесоустройства, что является крайне незначительным. С целью повышения контроля качества лесотаксационной информации, объективного подбора объектов проверки необходимо по возможности внедрять предварительную оценку

несоответствий (риск-ориентированный подход) с помощью ДЗЗ и программных продуктов на основе искусственного интеллекта, чтобы в последующем осуществлять выход в натуру.

Методика выполнения работ. Методика выполнения работ построена на сочетании различных способов таксации леса и автоматических систем дешифрирования данных спутниковой съемки. Учитывая важность практического внедрения результатов исследований, проверка материалов таксации леса осуществляется в соответствии с установленными критериями точности различных показателей, определённых лесоустроительной инструкцией. В пределах выдела в автоматическом режиме проводится анализ спектрально-отражательных характеристик насаждения, определяются их средние значения по каналам в видимом диапазоне спектра и в инфракрасном (b1 – b4) по данным зимней спутниковой съемки *Sentinel-2*. При анализе исключаются прогалины, нехарактерные для выдела участка. На основе полученных данных формируется таблица соответствия спектрально-отражательных характеристик насаждений и таксационных показателей по каждому выделу.

Анализ данных материалов таксации осуществляется с использованием различных алгоритмов машинного обучения: полиномиальная, факторная, множественная регрессии, а также алгоритмы на основе нейросетей глубокого обучения с использованием среды разработки *Python* и библиотеки *Keras*. Первичная обработка данных осуществляется в программном пакете *Statistica*. На ее основе определяются зависимости спектрально-отражательных характеристик насаждений с их таксационными показателями на основе полиномиального уравнения множественной регрессии.

Исследования проводились по материалам таксации лесов на территории Ерахтурского лесничества Рязанской области. В результате по показателю запаса и возраста насаждений получены модели их определения по спектрально-отражательным характеристикам, проведены расчеты их прогнозируемых значений (рис. 1, 2). Отклонение фактических значений от прогноза более чем на 30% принималось за вероятную ошибку таксации.

Ошибки материалов таксации определяются как отклонение прогнозируемых моделью показателей и измеренных в пределах установленной лесоустроительной инструкции точности (отклонение по показателю запаса, полноты, возраста более 30%).

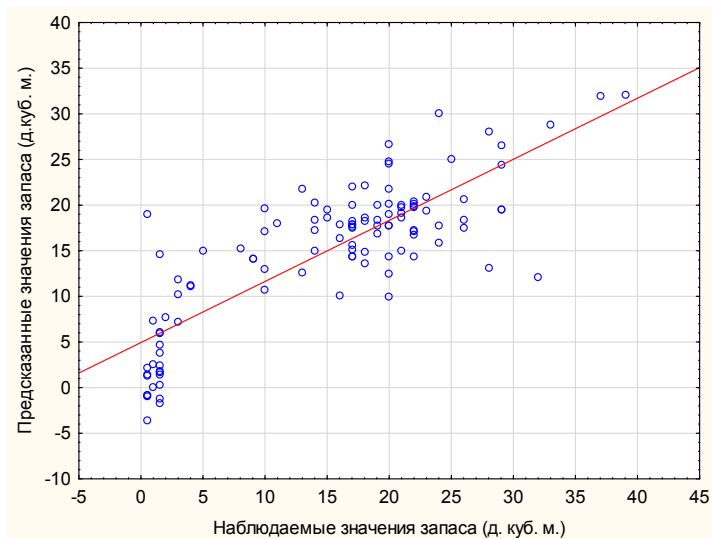


Рис. 1. Получение прогнозных значений запаса насаждений на основе модели полиномиальной множественной регрессии ($R=0,8$; $p=0$; $F=20$)

Fig. 1. Obtaining forecast values of the stock of plantings based on the model of polynomial multiple regression ($R=0,8$; $p=0$; $F=20$)

Модель оценки запаса насаждения по спектрально-отражательным характеристикам можно описать уравнением:

$$M = 43,189 - 117,935*b_1 + 204,198*b_1^2 - 1388,355*b_2 + 4896,398*b_2^2 + 2037,914*b_3 - 10330,613*b_3^2 - 511,604*b_4 + 3078,236*b_4^2 - 10,91*B + 2,086*B^2, \quad (1)$$

где M – запас насаждения, на га в д. м³; b_1, b_2, b_3, b_4 – спектральные каналы; B – бонитет насаждения.

По таблице выбросов составляется геоинформационная карта нахождения участков с ошибками таксации насаждений. На основе полученной информации осуществляется проверка данных в полевых условиях методами глазомерно-измерительной таксации (реласкопическими площадками). При проведении полевых исследований данные повторно анализируются, отмечаются неточности модели и совершенствуется алгоритм определения таксационных характеристик насаждений.

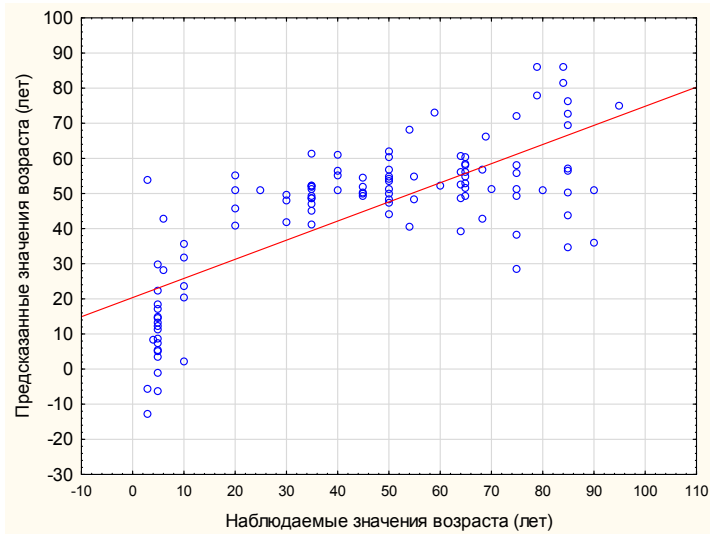


Рис. 2. Получение прогнозных значений возраста насаждений на основе модели полиномиальной множественной регрессии ($R=0,7$; $p=0$; $F=15$)

Fig. 2. Obtaining predictive values of the age of plantings based on the model of polynomial multiple regression ($R=0,7$; $p=0$; $F=15$)

Модель оценки возраста насаждения по спектрально-отражательным характеристикам можно описать уравнением:

$$\begin{aligned} A = & 91,714 - 201,587 \cdot b_1 + 143,149 \cdot b_1^2 - 3780,160 \cdot b_2 + \\ & + 13368,607 \cdot b_2^2 + 5132,959 \cdot b_3 - 27794,024 \cdot b_3^2 - \\ & - 1046,106 \cdot b_4 + 8095,291 \cdot b_4^2 - 2,68 \cdot B - 0,487 \cdot B^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где A – возраст насаждения, лет; b_1 , b_2 , b_3 , b_4 – спектральные каналы; B – бонитет насаждения

Обсуждение. Апробация технологии лесотаксационного дешифрирования спутниковых данных позволила выявить ошибки на 33 участках, для большинства из этих участков наблюдается ошибка по нескольким показателям (рис. 3–5).

Апробация полученных результатов проводилась по данным повторных полевых исследований. При проведении полевых исследований определение таксационных характеристик проводилось методом реласкопических площадок. Результаты апробации показывают, что из 33 выделов ошибки таксации подтвердились в 5 выделах по возрасту и в 16 выделах по запасу. Процент подтверждения ошибок таксации составляет 64% (табл. 1).

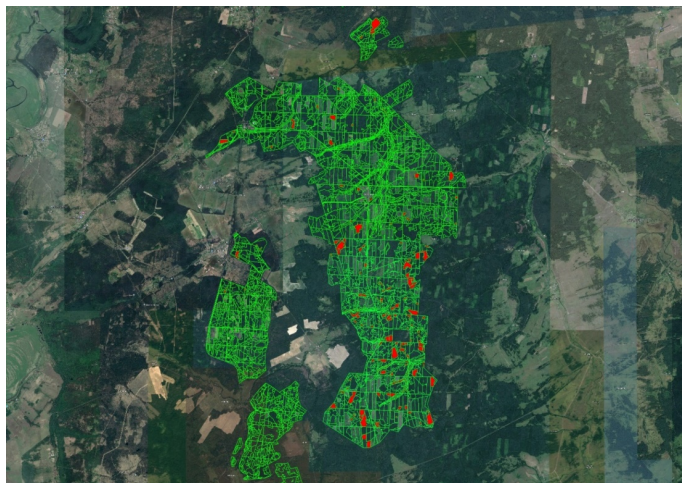


Рис. 3. Ошибки определения запаса насаждений, выявленные по результатам работы модели

Fig. 3. Errors in determining the stock of plantings identified by the results of the model

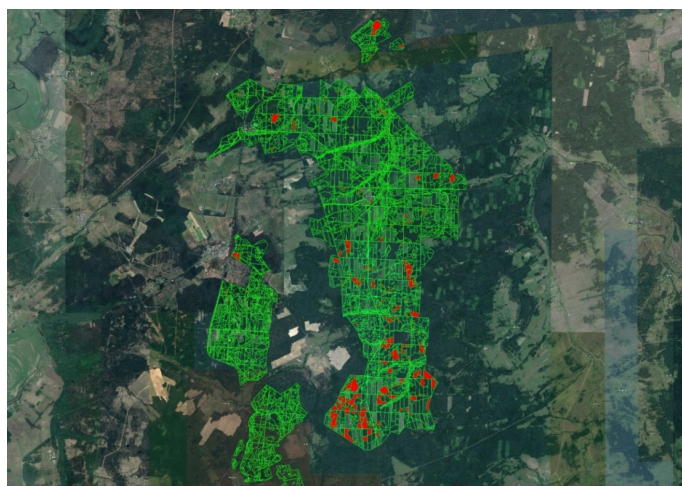


Рис. 4. Ошибки определения возраста насаждений, выявленные по результатам работы модели

Fig. 4. Errors in determining the age of plantings identified by the results of the model

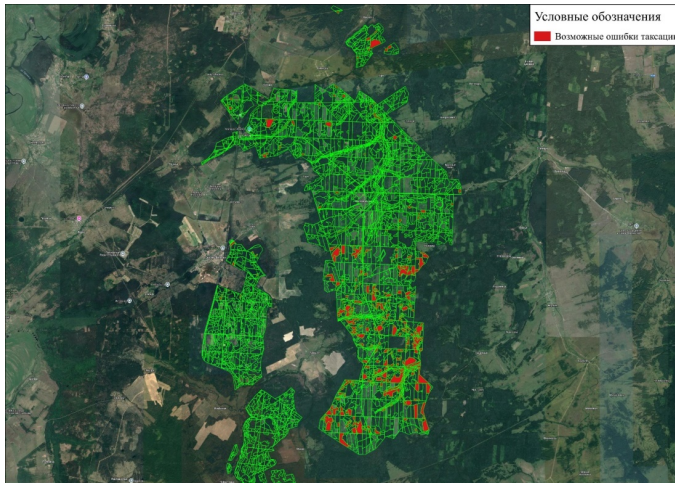


Рис. 5. Ошибки определения преобладающей породы насаждений, выявленные по результатам работы модели

Fig. 5. Errors in determining the predominant species of plantings identified by the results of the model

Таблица 1

Результативность определения ошибок лесной таксации

Effectiveness of determining errors in forest taxation

Число наблюдений	Ошибка > 30%			Ошибка > 50%		Выделы с подтвержденными ошибками	
	Возраст	Запас	Порода	Возраст	Запас	Возраст	Запас
33	10	20	11	8	7	5	16

Выводы. Представленная технология определения ошибок лесной таксации позволяет выявить участки с предполагаемой ошибкой по запасу насаждений, возрасту, породе. Процент выявления приближается к 70%, что является хорошим результатом при первичной апробации технологии. Погрешность определения таксационных характеристик насаждения связана с использованием данных съемки за различные даты и, как следствие, возможным влиянием атмосферы на спектрально-отражательные характеристики насаждений. Существенна также общая погрешность представленных

для анализа материалов таксации. Анализ показал, что в данных таксации идет занижение запаса насаждений по сравнению с фактическими измерениями. Такая тенденция, возможно, связана с таксацией насаждения методами реласкопических площадок, при котором может занижаться запас высокопродуктивных приспевающих, спелых и перестойных насаждений. Полученные результаты позволили выявить недостатки технологии, которые в дальнейших исследованиях будут учитываться в части разработки алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковой съемки и алгоритмов анализа таксационных характеристик насаждений в зависимости от их особенностей роста в различных лесорастительных условиях. При проведении дальнейших исследований планируется совершенствовать алгоритм обработки данных таксации и спутниковой съемки с использованием сверхточных сетей глубокого обучения на основе библиотеки *Keras*.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лузян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

Барталев С.А., Лузян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.С., Бурцев М.А., Бриль А.А., Егоров В.А., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Оксюкевич А.Ю., Прошин А.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Уваров И.А. Возможности создания региональных систем комплексного дистанционного мониторинга лесов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: матер. IV Междунар. науч. конф. Красноярск: СФУ, 2017. С. 32–35.

Данюлис Е.П., Жирин В.М., Сухих В.И., Эльман Р.И. Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве. М.: Агропромиздат, 1989. 223 с.

Дмитриев И.Д., Мурахтанов Е.С., Сухих В.И. Лесная авиация и аэрофотосъемка. М.: Агропромиздат, 1989. 366 с.

Жарко В.О., Барталев С.А., Егоров В.А. Использование спутниковых данных PROBA-V для оценки запасов стволовой древесины на территории Приморского края // Тезисы докладов 14-й всероссийской конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. С. 368.

Жирин В.М., Барталев С.А., Еришов Д.В. Спектрометрическая оценка состояния древесных растений при мониторинге лесов // Математическое моделирование и мониторинг лесных экосистем. М., 1995. С. 14.

История лесоустройства. URL: <https://dzen.ru/a/ZG8PqNXOWQODWgGY> (дата обращения: 31.03.2024).

Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. 2006. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-browser%3A%2F%2F4DT1uXEPRrJRXIUfoewruCY7TirJztViH0wC2NBOX3egcGKBrGp4VHIZ_dpVsyS3Zwdy_ebbYOJpkeyOZRXYu9pBhTnNGvBZ27a4cmrigNgqPCJpQLfcDoN1igLpHBCRLL_bkVIEOsIxpRe_fvQ%3D%3D%3Fsign%3Dye7hhDetAEMiQVqby9iddp2n5emF15uNZAbelj86i3k%3D&name=file766.doc&nosw=1 (дата обращения: 21.09.2024).

Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М.: Аспект-Пресс, 2004. 184 с.

Лесоустройство казенных лесов на Урале. URL: <https://www.permarchive.ru/index.php?page=lesoustroystvo-kazennyh-lesov-na-urale> (дата обращения: 31.03.2024).

Лузян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю. Возможности и опыт использования спутникового сервиса Вега при организации регионального дистанционного мониторинга // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : матер. Междунар. науч. конф. Красноярск: СФУ, 2014. С. 3–6.

Малышева Н.В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. М.: МГУЛ, 2012. 154 с.

Приказ Минприроды России № 510 от 05.08.2022 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции».

Приказ Рослесхоза № 102 от 26.02.2024 «Об утверждении Регламента организации и проведения лесоустроительных совещаний, коллективных (индивидуальных) тренировок, контроля качества проведения лесоустройства и качества подготовки лесоустроительной документации, а также утверждения лесоустроительной документации в отношении мероприятий по таксации лесов, проектированию мероприятий по сохранению лесов, проектированию лесничеств и признании утратившим силу приказа Федерального агентства лесного хозяйства № 815 от 18.07.2023».

Сидоренков В.М., Косицын В.Н., Калнин В.В., Кушнырь О.В., Рыбкин А.С. Современные тенденции развития лесотаксационного дешифрирования по данным спутниковой съемки // Лесохозяйственная информация. 2019. № 3. С. 48–60.

Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.

Толпин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Лузян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В. Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.

Черных В.В. Лесное законодательство при правлении Павла I и учреждение лесного департамента // Сибирский юридический вестник. 2018. №1 (80). С. 23–32.

References

Bartalev S.A., Egorov V.A., Jarko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Satellite mapping of the vegetation cover of Russia. M.: IKI RAS, 2016. 208 p. (In Russ.)

Bartalev S.A., Lupyan E.A., Balashov I.V., Bartalev S.S., Burtsev M.A., Bril A.A., Egorov V.A., Kashnitskaya A.V., Mazurov A.A., Oksyukevich A.Yu., Proshin A.A., Senko K.S., Stitsenko F.V., Uvarov I.A. The possibilities of creating regional integrated remote forest monitoring systems. *Regional problems of remote sensing of the Earth* : mater. of the IV International Scientific Conference. Krasnoyarsk: NFU, 2017, pp. 32–35. (In Russ.)

The concept of the development of the Russian space system for remote sensing of the Earth for the period up to 2025. 2006. (accessed September 21, 2024).

Danuylis E.P., Jirin V.M., Sukhikh B.I., Elman R.I. Remote sensing in forestry. M., 1989. 223 p. (In Russ.)

Forest management of state-owned forests in the Urals. URL: <https://www.permarchive.ru/index.php?page=lesoustroystvo-kazennyh-lesov-na-urale> (accessed March 31, 2024).

Dmitriev I.D., Murakhtanov E.S., Sukhikh B.I. Forest aviation and aerial photography. M., 1989. 366 p. (In Russ.)

History of forest management. URL: <https://dzen.ru/a/ZG8PqNXOWQODWgGY> (application march 31, 2024). (In Russ.)

Jarko V.O., Bartalev S.A., Egorov V.A. The use of PROBA-V satellite data to assess the stocks of stem wood in the Primorsky Territory. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space* : All-Russian open conference. M.: IKI RAS, 2016, p. 368. (In Russ.)

Jirin V.M., Bartalev S.A., Ershov D.V. Spectrometric assessment of the condition of woody plants during forest monitoring. *Mathematical modeling and monitoring of forest ecosystems*, 1995. 14 p. (In Russ.)

Labutina I.A. Decoding aerospace images. M., 2004. 184 p. (In Russ.)

Lupyan E.A., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Krashenninnikova Yu.S., Oksyukevich A.Yu. The possibilities and experience of using the Vega satellite service in the organization of regional remote monitoring. *Regional problems of remote sensing of the Earth* : mater. of the international scientific conference. Krasnoyarsk: NFU, 2014, pp. 3–6. (In Russ.)

Malisheva N.V. Automated decoding of aerospace images of forest plantations. M.: MSUF, 2012. 154 p. (In Russ.)

The order of the Ministry of Natural Resources of Russia № 510 от 05.08.2022 «On the approval of the Forest Management instruction». (In Russ.)

The order of the Federal Forestry Agency № 102 от 26.02.2024 «On approval of the Regulations for the organization and conduct of forest management meetings, collective (individual) trainings, quality control of forest management and the quality of preparation of forest management documentation, as well as approval of forest

management documentation in relation to forest taxation measures, design of forest conservation measures, design of forestry and invalidation of the order of the Federal Forestry Agency № 815 от 18.07.2023». (In Russ.)

Sidorenkov V.M., Kositsin V.N., Kalnin V.V., Kushnir O.V., Ribkin A.S. Current trends in the development of forest taxational decryption based on satellite imagery. *Forestry information*, 2019, no. 3, pp. 48–60. (In Russ.)

Sukhikh V.I. Aerospace methods in forestry and landscape construction: Textbook. Yoshkar-Ola: MarSTU, 2005. 392 p. (In Russ.)

Tolpin V.A., Balashov I.V., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Proshin A.A., Uvarov I.A., Flitman E.V. Creation of interfaces for working with data from modern remote monitoring systems (GEOSMIS). *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2011, vol. 8, no. 3, pp. 93–108. (In Russ.)

Chernyh V.V. Forest legislation under the reign of Paul I and the establishment of the Forest department. *Siberian Legal Bulletin*, 2018, no. 1 (80), pp. 23–32. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 15.04.2024

Капиталинин Д.Ю., Сидоренков В.М., Ачиколова Ю.С., Астапов Д.О., Рябцев О.В., Щекалев Р.В. Оценка качества таксации по результатам лесотаксационного дешифрирования данных спутниковой съемки Sentinel-2 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 62–77. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.62-77

В статье рассматривается технология оценки качества материалов таксации леса на основе анализа связей таксационных показателей насаждений с их спектрально-отражательными характеристиками. При проведении исследований используются данные спутниковой съемки Sentinel-2 в видимом и инфракрасном диапазоне спектра с пространственным разрешением 10 м.

Ключевые слова: лесная таксация, лесоустройство, спутниковая съемка, дешифрирование.

Kapitalinin D.Yu., Sidorenkov V.M., Achikolova Yu.S., Astapov D.O., Ryabtsev O.V., Shchekalev R.V. Assessment of the quality of taxation based on the results of forest taxation decryption of Sentinel-2 satellite imagery data. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 62–77 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.62-77

The article considers the technology of assessing the quality of forest taxation materials based on the analysis of the relationship between the taxation indicators of plantations and their spectral-reflective characteristics. The research uses Sentinel-2 satellite imagery data in the visible and infrared spectral ranges with a spatial resolution of 10 m.

Key words: forest taxation, forest management, satellite imagery, decryption.

КАПИТАЛИНИН Дмитрий Юрьевич – начальник Департамента лесного хозяйства по Центральному Федеральному округу. ORCID: 0009-0001-5489-9192.

141202, Институтская ул., д.15, г. Пушкино, Московская обл., Россия.
E-mail: kapitalinin.d@yandex.ru

KAPITALININ Dmitry Yu. – Head of the Forestry Department for the Central Federal District. ORCID: 0009-0001-5489-9192.

141202, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russia. E-mail: kapitalinin.d@yandex.ru

СИДОРЕНКОВ Виктор Михайлович – заместитель директора по научной и инновационной деятельности Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-код: 6071-2570.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия.
E-mail: lesvn@yandex.ru

SIDORENKOV Viktor M. – PhD (Agriculture), Deputy director for research and innovation of the All-Russian scientific research institute of forestry and forestry mechanization. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-code: 6071-2570.

141202, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russia. E-mail: lesvn@yandex.ru

АЧИКОЛОВА Юлия Сергеевна – ведущий инженер лаборатории лесоустройства и лесной таксации Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-7937-5061. SPIN-код: 2270-4644.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия.
E-mail: pipintook@yandex.ru

ASHIKOLOVA Yuliya S. – Leading engineer of the Laboratory of forest management and forest taxation of the All-Russian scientific research institute of forestry and forestry mechanization. ORCID: 0000-0002-7937-5061. SPIN-code: 2270-4644.

141202, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russia. E-mail: pipintook@yandex.ru

АСТАПОВ Даниил Олегович – заведующий лабораторией лесоустройства и лесной таксации Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-код: 6489-9193.

141202, Институтская ул., д.15, г. Пушкино, Московская обл., Россия.
E-mail: astdann09@yandex.ru

ASTAPOV Daniil O. – head of the Laboratory of forest management and forest taxation of the All-Russian scientific research institute of forestry and forestry mechanization. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-code: 6489-9193.

141202, Institutskaya str. 15. Pushkino. Moscow region. Russia. E-mail: astdann09@yandex.ru

РЯБЦЕВ Олег Викторович – заведующий отделом инновационных технологий, внедрения и лесного проектирования Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-код: 6803-9857.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия. E-mail: sektorles@yandex.ru

RYABTSEV Oleg V. – PhD (Agriculture), Head of Department of innovative technologies, implementation and forest design of the All-Russian scientific research institute of forestry and forestry mechanization. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-code: 6803-9857.

141202, Institutskaya str. 15. Pushkino. Moscow region. Russia. E-mail: sektorles@yandex.ru

ЩЕКАЛЕВ Роман Викторович – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0001-7657-1705. SPIN-код: 5826-3852.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: schekalevr@yandex.ru

SHCHEKALEV Roman V. – DSc (Agriculture), Professor of Forestry Department of St. Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-7657-1705. SPIN-code: 5826-3852.

194021, Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: schekalevr@yandex.ru