

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 630\*587(043.3)

**ОЖИЧ**  
**Ольга Светославовна**

**ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ  
ЧИСТЫХ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ НА ЦИФРОВЫХ  
АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук  
по специальности 06.03.02 – лесоведение, лесоводство,  
лесоустройство и лесная таксация

Минск 2017

Работа выполнена на кафедре лесоустройства учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Научный руководитель

**Толкач Игорь Владимирович**,  
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства УО «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

**Багинский Владимир Феликсович**,  
доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор кафедры лесоводственных дисциплин УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

**Ильючик Михаил Александрович**,  
кандидат сельскохозяйственных наук, начальник отдела дистанционного зондирования и мониторинга лесов РУП «Белгослес»

Оппонирующая организация

ГНУ «Институт леса НАН Беларуси»

Защита состоится «12» мая 2017 г. в 11<sup>00</sup> на заседании Совета по защите диссертаций К 02.08.01 при УО «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; тел.: (8-017) 327-74-52; факс: (8-017) 327-62-17; e-mail: kovalevsky@belstu.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «11» апреля 2017 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций

кандидат сельскохозяйственных наук



С. В. Ковалевский

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность диссертационного исследования обусловлена созданными в отрасли лесного хозяйства Республики Беларусь предпосылками для более широкого внедрения автоматизированных систем лесотаксационного дешифрирования в технологии лесоустройства и производства лесоустроительных планово-картографических материалов.

Применение современных компьютерных технологий, цифровых фотограмметрических станций (ЦФС) и геоинформационных систем (ГИС) открывает новые возможности для повышения объективности и точности дешифрирования, а в конечном итоге качества материалов лесоинвентаризации в целом. В соответствии с лесоустроительной инструкцией метод рационального сочетания наземной таксации и камерального дешифрирования с использованием актуализированных данных прежнего лесоустройства может применяться в III и IV зонах радиоактивного загрязнения, однако при наличии методик, обеспечивающих необходимую точность таксации, можно рассматривать вопрос о целесообразности его применения и для других насаждений.

Необходимо отметить, что функционирование автоматизированных систем невозможно без тщательного изучения закономерностей строения и взаимосвязей между таксационными показателями древостоя и его полога, разработки регрессионных моделей и таблиц, отражающих эти взаимосвязи. Данные вопросы, а также разработка методов оценки дешифровочных показателей древостоев на цифровых снимках с ЦФС, ГИС-технологий остаются открытыми и требуют проведения детальных исследований. Еще большую актуальность эти вопросы приобретают в связи с применением лазерной локации, позволяющей строить трехмерные модели полога древостоя, оценивать размеры крон и высоту деревьев, а при наличии регрессионных моделей и другие таксационные показатели древостоя.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами.** Диссертационная работа выполнялась в 2011–2016 гг. и явилась составной частью научно-исследовательских тем кафедры лесоустройства:

ГБ 4–11 «Совершенствование системы лесоинвентаризации на основе использования современных методов таксации и лесотаксационного оборудования, информационных технологий, материалов дистанционного зондирования лесов, систем спутниковой навигации, имитационного моделирования и методов оптимизации лесохозяйственных процессов» (2011–2015 гг.);

ГБ 13–039 «Разработка автоматизированных методов оценки таксационно-дешифровочных показателей древостоев на цифровых аэро- и космических

снимках высокого разрешения с использованием ГИС-технологий» (2013 г., № гос. регистрации 20130420);

ГБ 16–201 «Разработать автоматизированную систему лесотаксационного дешифрирования основных лесообразующих пород Беларуси на основе аэро- и космических снимков сверхвысокого разрешения, выборочной таксации насаждений, поведельной и картографической баз данных лесных ресурсов и ГИС-технологий» (2016 г., № гос. регистрации 20163774).

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационной работы – разработка методов оценки дешифровочных и таксационных показателей древостоев на цифровых аэро- и космических снимках с использованием специализированных программных продуктов и ГИС-технологий, изучение закономерностей изменчивости и взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями в чистых сосновых древостоях I<sup>a</sup>–II классов бонитета, разработка лесотаксационных (справочных) таблиц для измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета.

Для достижения цели предусмотрено решение следующих задач:

– разработать методику измерительного дешифрирования полога чистых сосновых древостоев на цифровых аэро- и космических снимках сверхвысокого разрешения с использованием ГИС и ЦФС;

– изучить закономерности строения полога древостоя, взаимосвязи между таксационными и дешифровочными показателями в чистых сосновых древостоях I<sup>a</sup>–II классов бонитета, разработать регрессионные уравнения и таблицы, отражающие данные взаимосвязи;

– разработать алгоритм и автоматизированную систему для определения таксационных показателей чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета на основе данных измерительного дешифрирования их полога по цифровым аэро- и космическим снимкам сверхвысокого разрешения.

*Объектами исследования* послужили чистые сосновые древостои I<sup>a</sup>–II классов бонитета, III–VI классов возраста лесного фонда Республики Беларусь.

*Предмет исследования* – дешифровочные признаки чистых сосновых древостоев, закономерности строения их полога, взаимосвязи между таксационными и дешифровочными показателями.

**Научная новизна.** Автором разработаны методы измерительного дешифрирования древостоев на цифровых снимках, исследованы взаимосвязи между таксационными и дешифровочными показателями древостоя и его полога, и на их основе созданы лесотаксационные (справочные) материалы для использования при измерительном дешифрировании чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета в Республике Беларусь. Впервые создана автоматизированная система измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета на цифровых аэро- и космических снимках, позволяющая

на основе измерений показателей полога древостоя (диаметра крон, сомкнутости полога, расстояния между деревьями, высоты) получить его основные таксационные показатели (средние диаметр и высоту, относительную полноту, запас).

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Методика измерительного дешифрирования древостоев на цифровых снимках с использованием цифровой фотограмметрической станции и геоинформационных систем для определения основных таксационно-дешифровочных показателей (густоты, сомкнутости полога, средней высоты, среднего диаметра крон).

2. Регрессионные уравнения взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями древостоя и его полога, обеспечивающие определение основных таксационных показателей чистых сосновых древостоях I<sup>a</sup>–II классов бонитета с точностью до  $\pm 10\%$  для среднего диаметра,  $\pm 10\%$  – средней высоты,  $\pm 0,1$  – относительной полноты и  $\pm 15\%$  – запаса древостоя.

3. Лесотаксационные (справочные) материалы: таблицы минимального количества измерений крон деревьев и полога древостоя для оценки их дешифровочных показателей при уровнях точности 90 и 95%; таблицы для определения основных таксационных показателей чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета по данным измерений дешифровочных показателей полога древостоя и крон деревьев на снимках.

4. Автоматизированная система измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета на цифровых аэро- и космических снимках, позволяющая на основе измерений показателей полога древостоя (диаметров крон, высот деревьев, сомкнутости полога, густоты древостоя, расстояний между деревьями) получить его основные таксационные показатели (средний диаметр, среднюю высоту, относительную полноту, запас).

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Диссертация является завершенной квалификационной научной работой, выполненной соискателем самостоятельно. Научным руководителем оказана помощь в постановке цели и задач, разработке программы исследований. Автором самостоятельно разработана методика, выполнены сбор и анализ экспериментального материала, статистическая обработка данных, разработана методика измерительного дешифрирования, изучены закономерности изменчивости и взаимосвязи между таксационными и дешифровочными показателями в чистых сосновых древостоях I<sup>a</sup>–II классов бонитета, разработаны лесотаксационные (справочные) таблицы для измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета, написана рукопись диссертации, сформулированы положения, выносимые на защиту, и выводы. Проведена опытно-производственная проверка результатов исследований и предложены рекомендации по их практическому применению. Автором было заложено 77 таксационно-дешифровочных выде-

лов и пробных площадей в шести лесхозах республики. Также использовались данные таксации древостоев на пробных площадях, заложенных сотрудниками кафедры лесоустройства и студентами БГТУ, материалы выделной базы данных РУП «Белгослес». Долевое участие соискателя в совместно опубликованных работах составляет: /1–3, 6, 8, 12, 15, 18/ – 40–60%, /9, 19/ – 70–90%. Научные публикации /4, 5, 7, 10, 11, 13, 14, 16, 17/ подготовлены лично соискателем при консультации научного руководителя.

**Апробация результатов диссертации.** Основные методические положения и результаты исследования докладывались и получили положительную оценку на 61-й и 62-й научно-технических конференциях студентов и аспирантов БГТУ (Минск, 2010, 2011), на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов БГТУ (Минск, 2012–2015), на IV международной научно-практической молодежной конференции «Научные стремления – 2013» (Минск, 2013), на XII Международной научно-технической конференции «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития» (Брянск, 2013), на IV–V Международном обучающем семинаре для студентов и аспирантов специальности «Лесное хозяйство» на тему «Динамика, состояние и мониторинг лесных экосистем на особо охраняемых природных территориях» (Браслав, 2014, 2015), на Международном научно-практическом семинаре «Современные технологии в деятельности ООПТ: ГИС, ДЗЗ» (Нарочь, 2015).

**Опубликование результатов диссертации.** По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 9 статей в научных изданиях, включенных в Перечень ВАК Республики Беларусь, объемом 3,4 авторского листа, и 10 публикаций в прочих изданиях объемом 1,3 авторского листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный текст диссертации составляет 94 страниц, в том числе 29 рисунков на 10 страницах, 41 таблица на 12 страницах и 10 приложений на 37 страницах. В приложениях представлены таксационные характеристики древостоев на таксационно-дешифровочных выделах (ТДВ) и пробных площадях (ТДПП), данные картирования деревьев на ТДПП, данные измерительного дешифрирования, экономический расчет, статистические данные. Библиографический список включает 249 наименований на 21 странице, в том числе 29 наименований на иностранных языках.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Аналитический обзор литературы

Долгое время, как за рубежом, так и в Республике Беларусь материалы аэрофотосъемки оставались основными при картировании лесного фонда, так как обладали высокой разрешающей способностью и возможностью стереоскопического изучения полога древостоя. Развитие компьютерных, информационных и космических технологий послужило толчком для качественных изменений в отрасли ДЗЗ. Появились съемочные системы ДЗЗ нового поколения с пространственным разрешением менее 0,5 м. По качеству современные космические снимки близки к аэрофотоснимкам, при этом простота получения, быстрая передача на Землю, возможность представления изображения в цифровом виде, удобном для обработки на компьютере, выводят этот вид съемки на одно из ведущих мест.

За последнее десятилетие при инвентаризации лесов Республики Беларусь начали использовать цифровые космические снимки сверхвысокого разрешения (GeoEye, QuickBird, WorldView-2 и др.), а с 2015 г. и снимки, полученные с воздушного цифрового сканера ADS-100, позволяющего проводить съемку лесов в четырех спектральных диапазонах (R, G, B, NIR) с высокой детализацией и точной привязкой к системе координат.

Данные предпосылки потребовали смены традиционных методов обработки материалов аэро- и космической съемки (при помощи простых оптических приборов и визуального анализа) на цифровые компьютерные технологии, что повлекло за собой интенсивное развитие автоматизированных методов дешифрирования. Разработкой методов дешифрирования и использованием аэро- и космических снимков для мониторинга лесов Беларуси занимались такие ученые, как О. А. Атрощенко (2000–2005), М. А. Ильючик (2001–2015), А. П. Кулагин (2001–2004), А. А. Пушкин (2002–2015), И. В. Толкач (2003–2015), Н. И. Торчик (2001–2004), С. С. Цай (2010–2015) и др.

Многие ученые (А. С. Агеенко (1971), В. И. Архипов (2005), В. Ф. Багинский (1974, 1993), И. Д. Дмитриев (1974–1977, 1981), С. В. Белов (1975), В. И. Березин (2005), И. Д. Дмитриев (1976), Д. М. Киреев (1977), А. В. Любимов (2001), В. И. Сухих (2001, 2005), Т. Б. Товянская (1967), И. А. Трунов (1962, 1963), Н. Г. Харин (1965, 1975), А. Aldred (1975), G. Laiigley Philip (1976), F. Rustagikriskia (2002) и др.) в своих исследованиях пришли к выводу, что между таксационными показателями древостоя и его полога существуют тесные взаимосвязи. Для основных лесообразующих древесных пород Республики Беларусь были изучены закономерности строения и роста древостоев (О. А. Атрощенко (2000), В. Е. Ермаков (2007), В. Ф. Багинский (2000–2015), Л. Н. Толкачев (2007), И. В. Толкач (1997), Н. П. Демид (2003) и др.),

разработаны регрессионные модели связи между различными таксационными показателями древостоев, составлены таблицы хода роста. Однако такие модели нельзя применять для дешифрирования, так как показатели полога (сомкнутость, средний диаметр крон, густота, состав), которые определяются при натурной таксации и на снимках, различаются между собой.

Комплексное исследование по выявлению взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями для лесных насаждений Республики Беларусь не проводилось и лишь отдельные работы в данном направлении были выполнены В. Ф. Багинским (1974, 1993). В связи с этим актуальной задачей является изучение закономерностей строения и изменчивости дешифровочных показателей полога чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета, разработка регрессионных уравнений и таблиц взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями, разработка методов оценки дешифровочных показателей древостоев на цифровых снимках с использованием ЦФС и ГИС-технологий.

### **Программа, методика и объекты исследования**

Для изучения морфологической структуры полога древостоев, динамики основных таксационных и дешифровочных показателей и взаимосвязей между ними в чистых сосновых древостоях I<sup>a</sup>–II классов бонитета III–VI классов возраста закладывались ТДПП и ТДВ. Участки выбирались в лесхозах, где недавно прошло лесоустройство и имелись материалы аэро- и космической съемки сверхвысокого разрешения не более 3-летней давности.

Таксация древостоев на пробных площадях проводилась общепринятыми методами в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки». Дополнительно на каждой ТДПП осуществлялось картирование деревьев. На ТДПП и ТДВ определялись основные показатели, характеризующие строение полога древостоя: форма, размеры и густота крон деревьев, сомкнутость полога древостоя, размещение деревьев в пологе, среднее расстояние между деревьями и кронами.

При сплошном перечеде деревья подразделялись по степени участия в пологе на свободностоящие, частично закрытые и закрытые. К видимым деревьям на снимках отнесены деревья свободностоящие и частично закрытые.

Таксация древостоев на ТДВ выполнялась выборочным методом на круговых пробных площадках (КПП) постоянного радиуса, заложенных по систематической выборке. Их количество определялось по ТКП 377-2012 (02080) «Правила проведения лесоустройства лесного фонда» в соответствии с необходимым объемом выборки в зависимости от площади выдела и относительной полноты древостоя и составляло 3–5 шт., радиусы КПП принимались от 9,8 до 13,8 м исходя из среднего диаметра и относительной полноты древостоя.

Камеральная обработка экспериментального материала заключалась в вычислении средних таксационных показателей древостоя и его полога (средних высоты и диаметра, суммы площадей сечений, относительной полноты, густоты, сомкнутости полога, среднего диаметра кроны, запаса) общепринятыми в лесной таксации методами.

Измерение дешифровочных показателей полога древостоев на цифровых снимках на ТДПП и ТДВ проводилось по разработанной автором методике с использованием ЦФС (Photomod Lite 5.0) и ГИС (Quantum GIS, SAGA GIS), которые имеют встроенные средства масштабирования, измерений линий, площадей и позволяют автоматизировать процесс измерений.

Минимальное количество измерений полога древостоя, обеспечивающее заданную точность исследований, выполнялось в соответствии с таблицей 1, разработанной на этапе планирования эксперимента.

Таблица 1. – Минимальное количество измерений для оценки основных таксационно-дешифровочных показателей при разных уровнях точности

Относительная полнота древостоя	Ошибка, %	Количество измерений для оценки показателей			
		густота, число площадок 20×20 м, шт.	сомкнутость, общая длина линий, м	диаметр крон, шт.	среднее расстояние между деревьями, шт.
0,4–0,6	5	125	3720	160	187
	10	31	940	40	47
0,7–0,8	5	17	1120	71	118
	10	4	290	18	30
0,9–1,0	5	13	280	41	116
	10	3	80	10	29

В качестве объектов исследования были выбраны чистые сосновые древостои I<sup>a</sup>–II классов бонитета, кисличного, мшистого, орлякового и черничного типов леса в возрасте от 50 до 120 лет. ТДПП и ТДВ были заложены на территории Барановичского, Быховского, Ивацевичского, Ляховичского, Смоленичского и Негорельского учебно-опытного лесхозов.

Сплошная перечислительная таксация древостоев выполнялась на 10 ТДПП, где измерены таксационные показатели стволов и кроны у 2676 деревьев. На 67 ТДВ выполнена выборочная таксация древостоев, заложено 189 круговых площадок с обмером диаметров стволов у 25–30 деревьев и детальным обмером кроны у 5–6 учетных деревьев на каждой площадке (всего 1238 деревьев). Для определения сомкнутости полога общая длина линий составила 15 235 м.

Измерительное дешифрирование полога древостоев в пределах ТДПП и ТДВ выполнялось на синтезированных мультиспектральных космических снимках Ikonos (RGB), Quickbird (GBR), WorldView (GBR). Общая сумма изме-

ренных на снимках длин линий для оценки сомкнутости полога древостоя составила 16 541,8 м, измерено 1587 расстояний между деревьями. Для определения густоты выполнен подсчет числа деревьев на 656 площадках, для установления среднего диаметра крон измерено 1604 диаметров крон деревьев.

Для повышения эффективности и автоматизации процесса обработки в Microsoft Access была создана единая база данных, включающая материалы натурной таксации и измерений на снимках. Дополнительно использовали для математической и статистической обработки экспериментальных данных программы Statgraphics, Microsoft Excel.

### **Измерительное дешифрирование чистых сосновых древостоев на цифровых снимках**

*Закономерности строения полога чистых сосновых древостоев.* Полог древостоя имеет особое значение для измерительного дешифрирования древостоев на аэро- и космических снимках, поскольку таксационные показатели определяются косвенным путем на основе регрессионных связей с показателями крон деревьев и полога древостоя в целом, при проведении натурной таксации возникает необходимость в описании его морфологической структуры. К морфологическим показателям кроны дерева относятся: диаметр, протяженность (абсолютная и относительная), высота до наибольшей ширины, форма.

Определяющее значение при дешифрировании чистых сосновых древостоев на цифровых снимках имеет верхняя часть кроны, так как только она изображена на снимках. По данным натурной таксации на ТДПП и ТДВ было выявлено, что в чистых сосновых древостоях с увеличением возраста процент видимых на снимке деревьев увеличивается от 78 до 95%.

Форма проекции крон отдельных деревьев неодинакова, но в целом для древостоя характерна, как правило, одна или несколько типичных, преобладающих форм и несколько сопутствующих. Наиболее полную классификацию форм крон дал Г. Г. Самойлович, которая автором и использовалась в работе.

Типичной формой горизонтальной проекции крон в чистых сосновых древостоях является эллипсовидная (от 35 до 41% в зависимости от класса возраста), но с возрастом соотношение типов форм крон сравнивается.

Преобладающей формой вертикальной проекции крон деревьев в исследуемых чистых сосновых древостоях являются параболоидная (яйцевидная) – от 47 до 59%, а сопутствующей – шаровидная (сфероидальная), которая составляет от 16 до 29%.

Распределение деревьев в чистых сосновых древостоях по густоте крон показывает, что преобладают деревья с кронами средней густоты (от 79 до 83% в зависимости от класса бонитета и класса возраста). С увеличением возраста наблюдается уменьшение количества деревьев с редкой кроной (от 9 до 1%),

при этом процент деревьев с густой кроной увеличивается (от 12 до 16%).

С возрастом в сосновых древостоях уменьшается процент протяженности крон: от 50–60% в молодняках до 20% в спелом возрасте. Анализ данных показывает, что среднее значение абсолютной протяженности кроны с возрастом увеличивается и составляет от 6,58 до 7,71 м.

Значение среднего диаметра крон в чистых сосновых древостоях с возрастом увеличивается (от 3,26 до 5,01 м), при этом коэффициент вариации изменяется от 11,18 до 21,63% (таблица 2).

Таблица 2. – Статистические показатели распределения диаметров крон в чистых сосновых древостоях

Показатели	Класс возраста			
	III	IV	V	VI
Значение, м:				
минимальное	2,57	2,08	2,85	3,94
максимальное	3,74	5,37	6,04	6,12
среднее	3,26	3,63	4,44	5,01
Стандартное отклонение, м	0,36	0,78	0,82	0,83
Коэффициент вариации, %	11,18	21,61	18,49	16,49
Асимметрия	–0,59499	–0,01943	–0,02486	–0,26174
Экссесс	–0,25428	–0,15523	0,07380	–1,46041

*Исследование взаимосвязей между дешифровочными и таксационными показателями древостоя.* Исследование взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями древостоев проводилось методами регрессионного анализа с использованием пакета прикладных программ Statgraphics. Анализ связей между таксационными показателями древостоя и его полога был выполнен вначале отдельно для древостоев I<sup>a</sup>, I и II классов бонитета, но так как значимых различий выявлено не было, дальнейшая обработка данных проводилась в одной совокупности. В результате были разработаны регрессионные уравнения взаимосвязей между таксационными показателями древостоя (средним диаметром, средней высотой, относительной полнотой, суммой площадей сечений, запасом и возрастом) и дешифровочными показателями его полога (средним диаметром крон, средним расстоянием между деревьями, густотой и сомкнутостью полога).

Для оценки регрессионных уравнений применялись критерий Фишера ( $F$ ), коэффициент детерминации ( $R^2$ ), относительная ошибка зависимой переменной ( $S_y$ ). Все отобранные в качестве моделей регрессионные уравнения имеют независимые переменные, значимые по  $t$ -критерию Стьюдента.

Средний диаметр имеет важное практическое значение для характеристики древостоя, определения его товарной и сортиментной структуры. Многие исследователи, работавшие в данном направлении, отмечали тесную связь

между средним диаметром ( $D$ ) и диаметром крон ( $D_k$ ), которая чаще всего носит линейный характер. Проведенный нами регрессионный анализ подтвердил линейную зависимость между этими показателями:

$$D \text{ (см)} = 5,03558 \text{ (см)} + 5,87508 \text{ (см/м)} \cdot D_k \text{ (м)}, \quad (1)$$

$$R^2 = 83,9\%; F = 338,10; S_y = 2,5 \text{ см},$$

где  $D$  – средний диаметр древостоя, см;

$D_k$  – средний диаметр крон, м.

Похожая зависимость существует между средним диаметром древостоя и средним дешифровочным диаметром крон, полученным по данным измерений на снимках:

$$D \text{ (см)} = 4,26059 \text{ (см)} + 6,83445 \text{ (см/м)} \cdot D_{к.д} \text{ (м)}, \quad (2)$$

$$R^2 = 85,0\%; F = 307,12; S_y = 2,4 \text{ см},$$

где  $D_{к.д}^*$  – средний дешифровочный диаметр крон, м.

Было выполнено исследование взаимосвязи между средним диаметром и таксационно-дешифровочными показателями древостоя такими как: средними высотой и диаметром крон, возрастом, бонитетом, густотой, сомкнутостью полога, суммой площадей сечений и др. Последовательно исключая не значимые по  $t$ -критерию Стьюдента переменные, получили следующее уравнение множественной регрессии:

$$D \text{ (см)} = -7,90137 \text{ (см)} + 0,710902 \text{ (см/м)} \cdot H_d \text{ (м)} + 2,66283 \text{ (см/м)} \times \quad (3)$$

$$\times D_{к.д} \text{ (м)} + 1,83418 \text{ (см/м)} \cdot l_d \text{ (м)},$$

$$R^2 = 93,3\%; F = 287,23; S_y = 1,5 \text{ см},$$

где  $H_d$  – средняя дешифровочная высота древостоя, м;

$l_d$  – среднее дешифровочное расстояние между деревьями, м.

Средняя высота древостоя не может быть измерена непосредственно на космических снимках, однако ее можно измерить на аэроснимках в стереорежиме, вычислить по регрессионным уравнениям или получить актуализируя данные таксации прошлых лет. При исследовании взаимосвязи между средней высотой древостоя и показателями полога древостоя лучшие результаты имеет следующее уравнение множественной регрессии:

---

\* Общепринятых обозначений дешифровочных показателей нет. Как правило, большинство авторов используют обозначения, аналогичные таксационным показателям. Для их разделения показатели, дешифрируемые на снимках, имеют подстрочный индекс «д», т. е. дешифрируемая сомкнутость полога древостоя будет обозначаться как  $Sp_d$ , средняя высота –  $H_d$ , средний диаметр крон –  $D_{к.д}$  и т. д.

$$H \text{ (м)} = -3,14109 \text{ (м)} \cdot B + 26,2365 \text{ (м)} \cdot Sp_d - 17,4628 \text{ (м)} \cdot Sp_d^2 + 0,394737 \text{ (м/лет)} \cdot A \text{ (лет)} - 0,00142455 \text{ (м/лет}^2\text{)} \cdot A^2 \text{ (лет)}, \quad (4)$$

$$R^2 = 99,5\%; F = 11243,23; S_y = 0,70 \text{ м},$$

где  $H$  – средняя высота древостоя, м;

$B$  – индекс класс бонитета;

$Sp_d$  – дешифровочная сомкнутость полога древостоя;

$A$  – возраст древостоя, лет.

Сумма площадей сечений – основной показатель, применяемый для определения запаса древостоя. Исследования зависимости суммы площадей сечений от высоты, густоты, диаметров и протяженности крон, сомкнутости полога и возраста показали, что лучшим образом эту взаимосвязь описывает следующее регрессионное уравнение:

$$G \text{ (м}^2\text{/га)} = -15,9982 \text{ (м}^2\text{/га)} + 28,2059 \text{ (м}^2\text{/га)} \cdot Sp_d + 0,824369 \text{ (м/га)} \times H_d \text{ (м)} + 0,0109054 \text{ (м}^2\text{/шт.)} \cdot N_d \text{ (шт./га)}, \quad (5)$$

$$R^2 = 70,2\%; F = 49,33; S_y = 2,1 \text{ м}^2\text{/га},$$

где  $G$  – сумма площадей сечений, м<sup>2</sup>/га;

$N_d$  – дешифровочная густота древостоя, шт./га.

Уравнение, характеризующее связь между относительной полнотой исследуемых сосновых древостоев и дешифровочной сомкнутостью полога:

$$P = -0,573936 + 1,57183 \cdot Sp_d^{0,5}, \quad (6)$$

$$R^2 = 69,7\%; F = 121,69; S_y = 0,059,$$

где  $P$  – относительная полнота древостоя.

Наиболее сложно и с самыми большими погрешностями определяется возраст древостоя. Он дешифрируется на основе анализа различных признаков: формы и размера крон, средней высоты, просматриваемости полога в глубину, расстояния между деревьями. Признаки дешифрирования возраста сосновых древостоев, разработанные Г. Г. Самойловичем, позволяют по снимкам определить в лучшем случае класс возраста. Однако возраст можно установить актуализируя данные таксации прошлых лет.

Определение возраста на основе уравнений множественной регрессии преимуществ по сравнению с аналитическим методом не имеет. Полученное нами уравнение множественной регрессии с использованием ряда таксационно-дешифровочных показателей для определения среднего возраста древостоя имеет вид:

$$A \text{ (лет)} = 60,0528 \text{ (лет)} + 10,1645 \text{ (лет/м)} \cdot D_{к.д} \text{ (м)} - 0,0389754 \text{ (лет} \cdot \text{га/шт.)} \cdot N_d \text{ (шт./га)}, \quad (7)$$

$$R^2 = 67,2 \% ; F = 65,61 ; S_y = 11 \text{ лет.}$$

По разработанным регрессионным уравнениям связи между таксационными и дешифровочными показателями древостоя в пределах действия уравнения были составлены таблицы для определения средней высоты, среднего диаметра, полноты и запаса древостоя (фрагмент таблицы для определения средней высоты представлен в таблице 3).

Таблица 3. – Средняя высота древостоя (м) в зависимости от класса бонитета, возраста и дешифровочной сомкнутости полога

Возраст, лет	Дешифровочная сомкнутость полога							
	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
I класс бонитета								
60	21,7	21,9	22,1	22,1	22,1	22,0	21,7	21,4
65	22,8	23,0	23,2	23,2	23,2	23,0	22,8	22,5
70	23,8	24,0	24,2	24,2	24,2	24,1	23,8	23,5

*Определение запаса древостоя.* Наиболее важным с хозяйственной точки зрения таксационным показателем является запас, поэтому одна из основных задач лесоинвентаризации – оценка запаса древостоя. Измерить запас на снимке нельзя, но его можно определить косвенным путем, на основе других дешифровочных показателей.

Для оценки запаса древостоя по данным измерительного дешифрирования его полога использовались четыре метода:

- 1) по уравнениям множественной регрессии;
- 2) на основе стандартной таблицы сумм площадей сечений и запасов нормальных насаждений при полноте 1,0 ( $M = P \cdot M_n$ );
- 3) по объему среднего дерева ( $M = N \cdot v_{cp}$ );
- 4) с использованием формулы  $M = G \cdot H \cdot F$ .

Результаты вычислений запаса разными методами сравнивались с запасом, полученным по данным натурной таксации на ТДПП и ТДВ. Среднеквадратическая ошибка вычислений запаса варьирует от  $\pm 10,4$  до  $\pm 18,3\%$  (таблица 4).

Таблица 4. – Сравнительный анализ точности использованных методов вычисления запаса

Методы вычисления запаса	Среднеквадратическая ошибка	
	м <sup>3</sup> /га	%
По уравнению множественной регрессии (8)	$\pm 38,1$	$\pm 10,4$
На основе стандартной таблицы сумм площадей сечений и запасов насаждений	$\pm 39,7$	$\pm 11,3$
По объему среднего дерева	$\pm 61,4$	$\pm 18,3$
С использованием формулы $M = G \cdot H \cdot F$	$\pm 39,4$	$\pm 11,7$

Сравнительный анализ точности использованных способов показал, что наиболее высокую точность определения запаса позволяет получить способ с использованием уравнения множественной регрессии (8).

$$M \text{ (м}^3\text{/га)} = -313,972 \text{ (м}^3\text{/га)} + 385,525 \text{ (м}^3\text{/га)} \cdot Sp_d + 14,7747 \text{ (м}^2\text{/га)} \cdot H_d \text{ (м)}, \quad (8)$$

$$R^2 = 65,7\%; F = 63,09; S_y = 38,3 \text{ м}^3\text{/га},$$

где  $M$  – запас древостоя, м<sup>3</sup>/га.

Несколько более низкую точность имеют способы оценки на основе стандартной таблицы сумм площадей сечений и запасов нормальных насаждений при полноте 1,0 и с помощью формулы  $M = G \cdot H \cdot F$ . Ошибка оценки запаса по объему среднего дерева почти в 2 раза выше ( $\pm 18,3\%$ ).

### Автоматизированная система измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев на цифровых аэро- и космических снимках

Для автоматизации процесса дешифрирования и оценки таксационных показателей была разработана автоматизированная система измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета на цифровых снимках, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

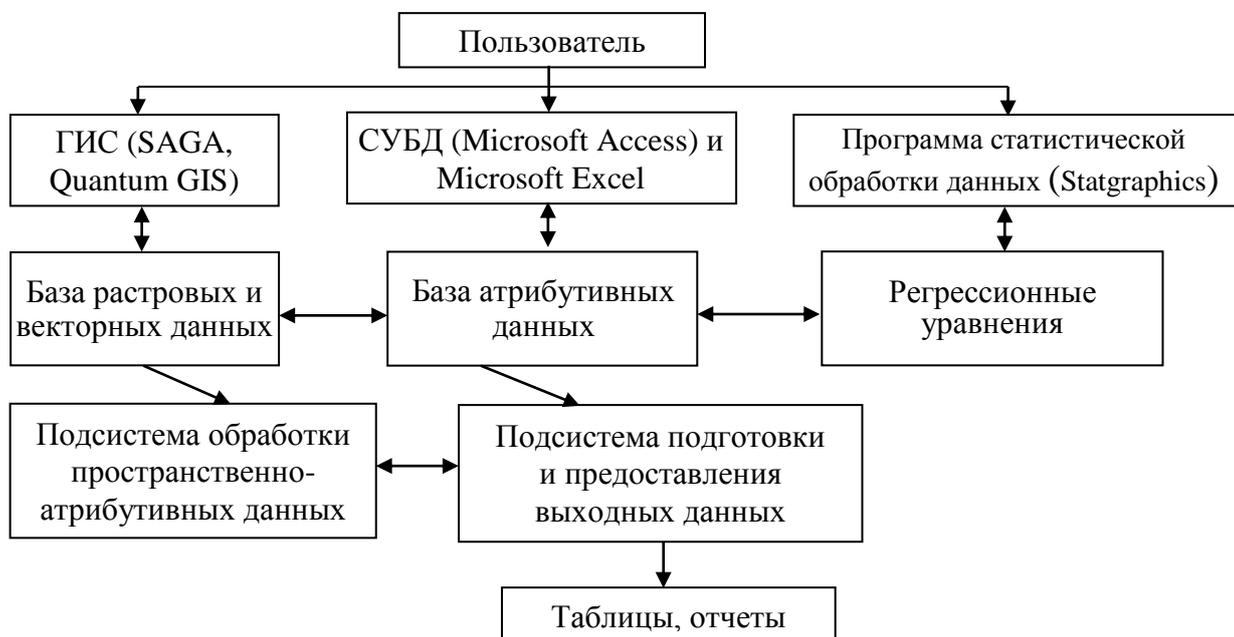
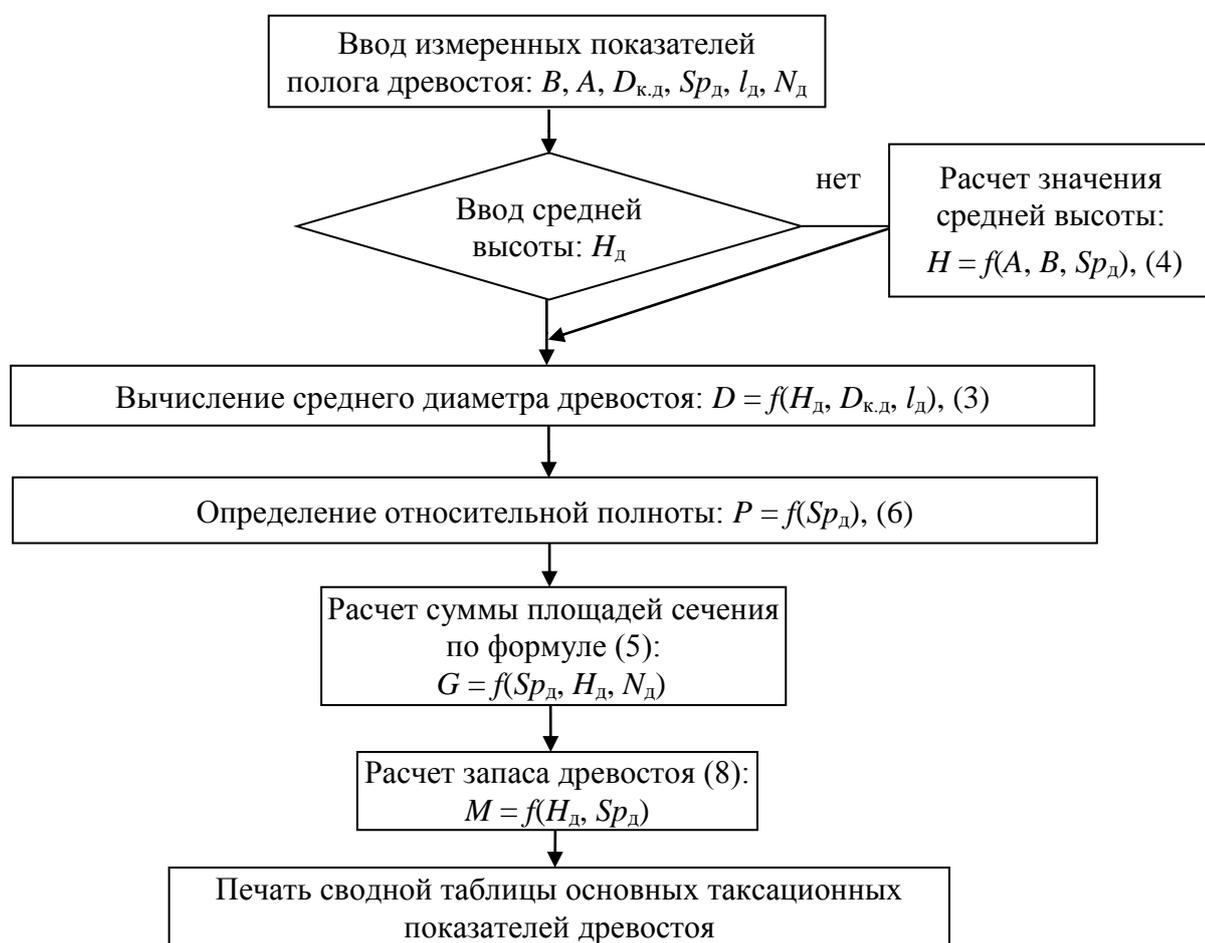


Рисунок 1. – Структурная схема автоматизированной системы измерительного дешифрирования

Для определения таксационных показателей древостоев использовались разработанные нами регрессионные уравнения связи с дешифровочными показателями их полога (уравнения (1)–(8)). Основными компонентами системы яв-

ляются свободно распространяемые ГИС SAGA GIS и Quantum GIS, а также СУБД (система управления базами данных) Microsoft Access и электронная таблица Microsoft Excel, позволяющие автоматизировать все операции – от измерений на снимках до получения таксационных показателей древостоя.

Предварительная обработка снимков и измерительное дешифрирование выполняется в Quantum GIS, SAGA GIS. СУБД Microsoft Access используется для хранения и группировки данных с их последующей обработкой, вычисления средних значений показателей полога древостоя по результатам измерений, подготовки отчетов. В Microsoft Excel выполняются расчеты основных таксационных показателей чистых сосновых древостоя I<sup>a</sup>–II классов бонитета по регрессионным уравнениям. Алгоритм расчета основных таксационных показателей древостоя представлен на рисунке 2.



**Рисунок 2.** – Алгоритм расчета основных таксационных показателей древостоя

Исходными данными для расчета основных таксационных показателей древостоя являются средний диаметр крон, расстояние между деревьями, сомкнутость полога и густота древостоя.

По цифровым снимкам нельзя достоверно определить такие таксационные показатели, как тип леса, тип условий местопроизрастания, бонитет и воз-

раст, поэтому дополнительно используются имеющиеся материалы лесоустройства (данные таксации прошлых лет, почвенные карты и т. п.).

*Оценка точности дешифрирования таксационных показателей чистых сосновых древостоев.* Для оценки точности определения основных таксационных показателей, полученных на основе измерительного дешифрирования полого древостоев по снимкам, был выполнен их сравнительный анализ с данными натурной таксации на 8 ТДВ, заложенных в Негорельском учебно-опытном лесхозе и не использованных в исследовании.

Как показали результаты анализа, ошибка оценки относительной полноты древостоев на контрольных ТДВ составляет  $\pm 0,04$  или  $\pm 5,1\%$ , что не превышает действующих нормативов в соответствии с ТКП 377-2012 (02080) «Правила проведения лесоустройства лесного фонда».

Средние диаметры древостоев, вычисленные на контрольных ТДВ и на космическом снимке, имеют близкие значения. Отклонение варьирует от  $-8,0$  до  $+2,9\%$ , а среднеквадратическое отклонение составляет  $\pm 4,9\%$  и не выходит за пределы допустимого ( $\pm 10\%$ ).

Определение средних высот древостоев выполнялось с помощью регрессионного уравнения связи (4). По данным измерений на снимке ошибка вычисления высоты составляет от  $-4,9$  до  $+7,6\%$ , среднеквадратическое отклонение –  $\pm 3,8\%$  (при допустимой ошибке  $\pm 7\%$ ).

Запас, вычисленный по измеренным на снимке показателям, зависит как от точности их определения, так и от процента видимых крон. Максимальное отклонение составляет  $+13,3\%$ , среднеквадратическое отклонение –  $\pm 7,0\%$ , что не превышает допустимую ошибку ( $\pm 15\%$  – в спелых и перестойных насаждениях, включенных в расчет рубок главного пользования, а также на участках, назначенных для проведения проходных рубок и обновления и переформирования и  $\pm 20\%$  – для всех остальных насаждений).

Оценка точности определения основных таксационных показателей чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета, полученных на основе измерительного дешифрирования полого древостоев по снимкам, показывает, что допустимые ошибки их определения находятся на уровне глазомерно-измерительной таксации и соответствуют требованиям точности таксации лесов, регламентированных нормами предельно допустимых ошибок при определении таксационных показателей и заданным уровнем достоверности, приведенным в ТКП 377-2012 (02080) «Правила проведения лесоустройства лесного фонда».

*Экономическая эффективность.* Экономическая эффективность использования разработанного метода была рассчитана по данным инвентаризации лесного фонда Негорельского учебно-опытного лесхоза (лесоустройство 2013 г.). Она основана на сопоставлении затрат на лесоинвентаризационные ра-

боты по технологии, применяемой при лесоустройстве в настоящее время, и затрат при использовании разработанного дешифровочного метода. Для расчета экономической эффективности были использованы нормы выработки и расценки для инженерно-технических работников и рабочих на лесоустроительные и другие виды работ, выполняемые РУП «Белгослес» (от 30.10.2012).

Расчетный экономический эффект применения разработанного метода измерительного дешифрирования при таксации чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета III класса возраста заключается в сокращении объемов полевых работ, сокращении на 14,1% трудозатрат, уменьшении на 11,9% затрат на оплату труда. Для среднего лесхоза Республики Беларусь расчетный экономический эффект по сокращению трудозатрат составит 12,3%, на оплату труда – 10,0%.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработаны методы измерительного дешифрирования полога чистых сосновых древостоев на цифровых снимках с использованием ЦФС и ГИС для определения дешифровочных показателей древостоя (густоты, сомкнутости полога, средней высоты, среднего диаметра крон). Рекомендуется применять для оценки густоты древостоя площадной метод, сомкнутости полога – линейный метод, при измерениях высот использовать ЦФС (метод мнимой марки) /1–3, 10–12, 14/.

2. Разработана методика отвода ТДПП, картирования и вычисления координат деревьев с использованием ультразвукового дальномера и двух отражателей, которая ускоряет процесс и повышает эффективность сбора полевого материала /3/.

3. Разработаны таблицы для оценки необходимого количества измерений на снимках в зависимости от относительной полноты древостоя, которое обеспечивает запланированную точность получения результатов измерений /5/.

4. По данным натурной таксации на ТДПП и ТДВ было выявлено, что в чистых сосновых древостоях с увеличением возраста процент видимых на снимке деревьев увеличивается от 78 до 95%. Типичной формой горизонтальной проекции крон в чистых сосновых древостоях I<sup>a</sup>–II классов бонитета является эллипсовидная, менее представлены: округлая, односторонне сжатая и неправильная, но с возрастом доля их участия выравнивается. Преобладающей формой вертикальной проекции крон деревьев является параболоидная (яйцевидная), а сопутствующей – шаровидная (сфероидальная). Распределение деревьев в чистых сосновых древостоях по густоте крон показывает, что преобладают деревья с кронами средней густоты. С увеличением возраста наблюдается

уменьшение числа деревьев с редкой кроной (от 9 до 1%) и некоторое увеличение с густой (от 12 до 16%) /7, 17/.

5. Разработаны регрессионные уравнения связи между таксационными показателями древостоя и его полога на местности (диаметр крон, густота, сомкнутость) с таковыми на снимках. Коэффициент детерминации регрессионных уравнений составляет: для сомкнутости полога – 86,2%, для густоты – 98,2%, для среднего диаметра крон – 84,5% /4, 5, 13/.

6. Существует достаточно тесная связь между относительной полнотой древостоя и дешифровочной сомкнутостью полога (коэффициент детерминации 69,7%), суммой площадей сечений, дешифровочной сомкнутостью полога, средней высотой и дешифровочной густотой (коэффициент детерминации регрессии составляет 70,2%, среднеквадратическая ошибка –  $\pm 8,5\%$ ).

Выявлена устойчивая взаимосвязь между средним диаметром древостоя, средней высотой, дешифровочным средним расстоянием между деревьями и средним диаметром крон (коэффициент детерминации регрессионного уравнения составляет 93,3%, среднеквадратическая ошибка –  $\pm 7,1\%$ ).

Для оценки средней высоты древостоя лучшие результаты показало регрессионное уравнение связи с возрастом древостоя, классом бонитета и дешифровочной сомкнутостью полога (коэффициент детерминации регрессионного уравнения составляет 99,5%, среднеквадратическая ошибка –  $\pm 7,9\%$ ).

Наилучший результат при оценке запаса чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета показало регрессионное уравнение связи со средней высотой и относительной полнотой древостоя (среднеквадратическая ошибка составила  $\pm 10,4\%$ ) /5, 6, 13, 15, 16/.

7. Разработана автоматизированная система измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета на цифровых аэро- и космических снимках /8, 9, 18, 19/.

8. Оценка точности определения основных таксационных показателей древостоя, полученных на основе измерительного дешифрирования полого древостоев по снимкам показала, что средняя ошибка вычисления относительной полноты составляет  $\pm 5,1\%$ , среднего диаметра –  $\pm 4,9\%$ , высоты –  $\pm 3,8\%$ , запаса –  $\pm 7,0\%$  /6, 11, 15/.

9. Экономическая оценка использования разработанного метода измерительного дешифрирования, рассчитанная по данным инвентаризации лесного фонда Негорельского учебно-опытного лесхоза (лесоустройство 2013 г.), показала, что экономический эффект его применения при таксации чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета III класса возраста выражается в сокращении объемов полевых работ, сокращении на 14,1% трудозатрат, уменьшении на 11,9% затрат на оплату труда. Для среднего лесхоза Республики Беларусь расчетный экономический эффект по сокращению трудозатрат составит 12,3%,

на оплату труда – 10,0% (акт опытно-производственной проверки от 28.12.2016).

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанные лесотаксационные (справочные) таблицы рекомендуются для практического применения при проведении лесоинвентаризации методом рационального сочетания наземной таксации с камеральным аналитико-измерительным дешифрированием чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета, в особенности в зонах радиоактивного загрязнения.

Автоматизированная система измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета на цифровых аэро- и космических снимках может быть использована в качестве прототипа для создания аналогичных систем для других пород, классов возраста и бонитета. Работоспособность системы подтверждается результатами опытно-производственной проверки на основе измерительного дешифрирования полога древостоев на восьми ТДВ, заложенных на территории Негорельского учебно-опытного лесхоза (акт опытно-производственной проверки от 28.12.2016).

Результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры лесоустройства БГТУ, в частности используется для курсового и дипломного проектирования на кафедре лесоустройства, в лекциях и лабораторных занятиях по дисциплине «Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве» (справка о внедрении от 11.11.2013).

Методы оценки таксационно-дешифровочных показателей древостоев на цифровых аэро- и космических снимках и лесотаксационные (справочные) таблицы для измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета с применением ГИС-технологий могут быть использованы в отделе дистанционного зондирования и мониторинга лесов РУП «Белгослес» для контурного и лесотаксационного дешифрирования (справка о возможном внедрении от 09.09.2015).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в научных изданиях, включенных в Перечень ВАК

1. Толкач, И. В. Контурное дешифрирование границ выделов с использованием цифровых космических снимков высокого разрешения и ГИС-технологий / И. В. Толкач, **О. С. Бахур** // Труды БГТУ. – 2011. № 1 (139): Лесное хоз-во. – С. 58–61.
2. Толкач, И. В. Измерение основных таксационно-дешифровочных показателей древостоя с использованием цифровой фотограмметрической станции (ЦФС) Photomod Lite 5.0 / И. В. Толкач, **О. С. Бахур** // Труды БГТУ. – 2012. № 1 (148): Лесное хоз-во. – С. 66–68.
3. Толкач, И. В. Методы оценки основных таксационно-дешифровочных показателей на цифровых снимках с использованием ГИС технологий / И. В. Толкач, **О. С. Бахур** // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель, 2012. – Вып. 72. – С. 354–362.
4. **Бахур, О. С.** Взаимосвязи между таксационными и дешифровочными показателями в сосновых древостоях I и Ia классов бонитета / О. С. Бахур // Труды БГТУ. – 2013. № 1 (157): Лесное хоз-во. – С. 13–15.
5. **Бахур, О. С.** Таблицы и модели взаимосвязи между основными таксационными и дешифровочными показателями в чистых сосновых древостоях / О. С. Бахур // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель, 2013. – Вып. 73. – С. 297–306.
6. Толкач, И. В. Измерительное дешифрирование и оценка таксационных показателей сосновых древостоев по цифровым снимкам сверхвысокого разрешения / И. В. Толкач, **О. С. Бахур** // Труды БГТУ. – 2014. № 1 (165): Лесное хоз-во. – С. 48–51.
7. **Бахур, О. С.** Закономерности строения полога сосновых древостоев / О. С. Бахур // Труды БГТУ. – 2014. № 1 (165): Лесное хоз-во. – С. 11–14.
8. Толкач, И. В. Система обработки данных измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев Ia–II классов бонитета / И. В. Толкач, **О. С. Бахур** // Труды БГТУ. – 2015. № 1 (174): Лесное хоз-во. – С. 8–11.
9. **Бахур, О. С.** Методика обработки данных измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев / О. С. Бахур, И. В. Толкач // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель, 2015. – Вып. 75. – С. 322–330.

### Публикации в других научных изданиях

10. **Бахур, О. С.** Контурное дешифрирование выделов с использованием цифровых анаглифических стереоснимков // 61-я науч.-техн. конф. студентов и магистрантов: сб. науч. работ, Минск, 21–25 апр. 2010 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: О. А. Атрощенко [и др.]. – Минск, 2010. – С. 97–99.
11. **Бахур, О. С.** Дешифрирование цифровых аэро- и космоснимков с использованием ГИС-технологий // 62-я науч.-техн. конф. студентов и магистрантов: сб. науч. работ, Минск, 18–22 апр. 2011 г. / Белорус. гос. технол. ун-т;

редкол.: О. А. Атрощенко [и др.]. – Минск, 2011. – С. 96–98.

12. Толкач, И. В. Измерение основных таксационно-дешифровочных показателей древостоя с использованием цифровой фотограмметрической станции (ЦФС) Photomod Lite 5.0 [Электронный ресурс] / И. В. Толкач, **О. С. Бахур** // Тез. докл. 76-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 13–20 февр. 2012 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: О. А. Атрощенко [и др.]. – Минск, 2012. – С. 15.

13. **Бахур, О. С.** Взаимосвязи между таксационными и дешифровочными показателями в сосновых древостоях I и Ia классов бонитета [Электронный ресурс] / О. С. Бахур // Тез. докл. 77-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов. 4–9 февр. 2013 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: О. А. Атрощенко [и др.]. – Минск, 2013 – С. 5.

14. **Бахур, О. С.** Методы оценки основных показателей древостоев на цифровых космических снимках с использованием ГИС-технологий / О. С. Бахур // ГИС-технологии в науке о земле: материалы конкурса ГИС-проектов студентов и аспирантов ВУЗов Респ. Беларусь, Минск, 20 нояб. 2013 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: Д. М. Курилович (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 48–52.

15. Толкач, И. В. Оценка основных таксационно-дешифровочных показателей на цифровых снимках с использованием Quantum Gis / И. В. Толкач, **О. С. Бахур** // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр., Брянск, 1–30 нояб. 2013 г. / Брянск. гос. инженер.-технол. ун-т, редкол.: Е. А. Памфилов [и др.]. – Брянск, 2013. – Вып. 37. – С. 22–26.

16. **Бахур, О. С.** Анализ взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями в чистых сосновых древостоях // Научные стремления – 2013: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. молодеж. конф. Минск, 3–6 дек. 2013 г. / ООО «Лаборатория интеллекта» и центр молодежных инноваций, редкол.: В. В. Казбанов (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Энциклопедист, 2013. – С. 11–15.

17. **Бахур, О. С.** Закономерности строения полога сосновых древостоев / О. С. Бахур // Тез. докл. 78-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 3–13 февр. 2014 г. [Электронный ресурс] / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: О. А. Атрощенко [и др.]. – Минск, 2014 – С. 5.

18. Толкач, И. В. Измерительное дешифрирование и оценка таксационных показателей сосновых древостоев по цифровым снимкам сверхвысокого разрешения / И. В. Толкач, **О. С. Бахур** // Тез. докл. 78-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 3–13 февр. 2014 г. [Электронный ресурс] / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: О. А. Атрощенко [и др.]. – Минск, 2014 – С. 13.

19. **Бахур, О. С.** Система обработки данных измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета / О. С. Бахур, И. В. Толкач // Тез. докл. 79-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 2–6 февр. 2015 г. [Электронный ресурс] / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2015 – С. 5.

## РЕЗЮМЕ

**Ожич Ольга Светославовна**

### **Измерительное дешифрирование чистых сосновых древостоев на цифровых аэро- и космических снимках**

**Ключевые слова:** измерительное дешифрирование, регрессионные уравнения взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями, закономерности строения полога древостоя.

**Цель работы** – разработка методов оценки дешифровочных и таксационных показателей древостоев на цифровых аэро- и космических снимках с использованием специализированных программных продуктов и ГИС-технологий, изучение закономерностей изменчивости и взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями в чистых сосновых древостоях I<sup>a</sup>–II классов бонитета, разработка лесотаксационных (справочных) таблиц для измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета.

**Методы исследования.** Теоретические и экспериментальные исследования проведены с использованием современных методов лесной биометрии, лесоустройства и лесной таксации.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработана методика измерительного дешифрирования древостоев на цифровых снимках, регрессионные уравнения взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями древостоя и его полога, обеспечивающие определение основных таксационных показателей с точностью до 20%, и лесотаксационные (справочные) материалы: таблицы, позволяющие определить необходимое количество измерений полога древостоя для оценки дешифровочных показателей при различных уровнях точности; таблицы взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями в чистых сосновых древостоях I<sup>a</sup>–II классов бонитета для практического их применения при измерительном дешифрировании. Создана автоматизированная система измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев I<sup>a</sup>–II классов бонитета на цифровых аэро- и космических снимках, позволяющая на основе измерения показателей полога древостоя (диаметра крон, сомкнутости полога, расстояния между деревьями, высоты) получить основные таксационные показатели (средние диаметр и высоту, относительную полноту, запас).

**Степень использования.** Результаты исследования используются в учебном процессе кафедры лесоустройства БГТУ для курсового и дипломного проектирования, в лекциях и лабораторных занятиях по дисциплине «Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве», в отделе дистанционного зондирования и мониторинга лесов РУП «Белгослес».

**Область применения.** Лесоустройство и лесоустроительное проектирование.

## РЭЗІЮМЭ

**Ожыч Вольга Святаславаўна**

### **Вымяральнае дэшыфраванне чыстых сасновых дрэвастояў на лічбавых аэра- і касмічных здымках**

**Ключавыя словы:** вымяральнае дэшыфраванне, рэгрэсійныя ўраўненні ўзаемасувязяў паміж таксацыйнымі і дэшыфравальнымі паказчыкамі, заканамернасці будовы палага дрэвастоя.

**Мэта даследавання** – распрацоўка метадаў адзнакі дэшыфравальных і таксацыйных паказчыкаў дрэвастояў на лічбавых аэра- і касмічных здымках з выкарыстаннем спецыялізаваных праграмных прадуктаў і ГІС-тэхналогій, вывучэнне заканамернасцяў зменлівасці і ўзаемасувязяў паміж таксацыйнымі і дэшыфравальнымі паказчыкамі ў чыстых сасновых дрэвастоях I<sup>a</sup>–II класаў банітэта, распрацоўка лесатаксацыйных (даведачных) табліц для вымяральнага дэшыфравання чыстых сасновых дрэвастоеў I<sup>a</sup>–II класаў банітэта.

**Метады даследавання.** Тэарэтычныя і эксперыментальныя даследаванні праведзены з выкарыстаннем сучасных метадаў лясной біяметрыі, лесаўпарадкавання і лясной таксацыі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацавана метадыка вымяральнага дэшыфравання дрэвастояў на лічбавых здымках, рэгрэсійная ўраўненні ўзаемасувязяў паміж таксацыйнымі і дэшыфравальнымі паказчыкамі дрэвастоя і яго палага, якія забяспечваюць вызначэнне асноўных таксацыйных паказчыкаў з дакладнасцю да 20% і лесатаксацыйныя (даведачныя) матэрыялы: табліцы, якія дазваляюць вызначыць неабходную колькасць вымярэнняў палага дрэвастоя для адзнакі дэшыфравальных паказчыкаў пры розных узроўнях дакладнасці; табліцы ўзаемасувязяў паміж таксацыйнымі і дэшыфравальнымі паказчыкамі ў чыстых сасновых дрэвастоях I<sup>a</sup>–II класаў банітэта для практычнага іх выкарыстання пры вымяральным дэшыфраванні. Створана аўтаматызаваная сістэма вымяральнага дэшыфравання чыстых сасновых дрэвастояў I<sup>a</sup>–II класаў банітэта на лічбавых аэра- і касмічных здымках, якая дазваляе на аснове вымярэння паказчыкаў палага дрэвастоя (дыяметра крон, сомкнутасці палага, адлегласці паміж дрэвамі, вышыні) атрымаць асноўныя таксацыйныя паказчыкі (сярэдня дыяметр і вышыня, адносную паўнату, запас).

**Ступень выкарыстання.** Вынікі даследавання выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе кафедры лесаўпарадкавання БДТУ падчас курсавога і дыпломнага праектавання, у лекцыях і лабараторных занятках па дысцыпліне «Аэракасічныя метады ў лясной гаспадарцы», ў адзеле дыстанцыйнага зандавання і маніторынгу лясоў РУП «Белдзяржлес».

**Вобласць выкарыстання.** Лесаўпарадкаванне і лесаўпарадкавальнае праектаванне.

## SUMMARY

**Ozhych Volha Svetoslavovna**

### **Measurement interpretation of pure pine forest stands on digital aerial and satellite images of ultrahigh resolution**

**Key words:** measuring interpretation, regression equations of the relationships between taxation and deciphering indexes, regularities of the structure of the canopy of the stand.

**The purpose of the research** is to develop methods to evaluate and interpretive forest indices stands for digital aerial and satellite images by using specialized software and GIS technology, the study of regularities of variability and relationships between taxation and deciphering indexes in pure pine stands in the I<sup>a</sup>–II site class, development of normative (reference) tables for measuring interpretation of pure pine stands in the I<sup>a</sup>–I site class.

**Research methods.** Theoretical and experimental studies were made by using the modern methods of forest biometry, forest inventory and management planning as well as forest mensuration.

**Scientific novelty and importance.** Methods for measuring interpretation of the stands on the digital images are developed. Regression equations of the relationships between taxation and deciphering indexes of stand and its canopy, providing identification of the main taxation indexes, up to 20% and forest inventory (reference) materials: tables allowing to determine the required number of measurements of the canopy of the stand for the evaluation of deciphering indexes at different levels of accuracy; tables of relationships between taxation and deciphering indexes in pure pine stands of I<sup>a</sup>–II site class for their practical application in measuring interpretation are developed. An automated system for measuring interpretation of pure pine stands in I<sup>a</sup>–II site class on digital aerial and satellite imagery that allows on the basis of deciphering indexes of the canopy of the stand (the diameter of the crown, the canopy cover, the distance between the trees, the height) to get the main taxation indexes (the average diameter and height, the fullness of the stand, the growing stock) are created.

**Degree of application:** The results are used: in the educational process of the department of forest management BSTU for the course and diploma projects, the lectures and the laboratory classes on the subject «Aerospace methods in forestry», in the department of remote sensing and forest monitoring in RUE «Belgosles».

**Application area.** Forest inventory and forest management planning.



Научное издание

**Ожич** Ольга Светославовна

**ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ  
ЧИСТЫХ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ НА ЦИФРОВЫХ  
АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук  
по специальности 06.03.02 – лесоведение, лесоводство,  
лесоустройство и лесная таксация

Ответственный за выпуск О. С. Ожич

Подписано в печать 10.04.2017. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд.л. 1,0.  
Тираж 60 экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:  
УО «Белорусский государственный технологический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/227 от 20.03.2014.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.