

УДК 630*587

И. В. Толкач, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ);
О. С. Бахур, аспирант (БГТУ)

ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ПО ЦИФРОВЫМ СНИМКАМ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В статье приводится краткий анализ измерительного дешифрирования цифровых снимков с использованием геоинформационных систем, дан краткий обзор основных методов дешифрирования цифровых космических снимков. Описана методика выполнения работ по определению дешифровочных показателей древостоя и приведены результаты анализа взаимосвязей между данными, полученными при наземной таксации и измерительном дешифрировании цифровых снимков. Выявлено, что существуют тесные связи между таксационными и дешифровочными показателями полога древостоя.

This article provides a brief analysis of forest mensuration deciphering digital images by using GIS technologies. The short review of the basic methods of deciphering of digital satellite images is done. The technique of performance of works to determine deciphering characteristics of stands is described and results of analysis of correlation between data had been done from ground-based inventory and measurement interpretation of digital images. It was revealed that there were close interrelations between mensuration and deciphering characteristics of forest stand.

Введение. В настоящее время в отрасли лесного хозяйства интенсивно развиваются и внедряются современные методы и технологии обработки информации и геоинформационные системы. Современные цифровые технологии обработки изображений открывают новые возможности в измерительном дешифрировании материалов дистанционного зондирования.

На цифровых космических снимках сверхвысокого пространственного разрешения на изображении полога древостоя достаточно хорошо выделяются кроны отдельных деревьев, что позволяет выполнить оценку состава и густоты древостоя, размеров крон, сомкнутости полога, а на их основе с использованием регрессионных моделей взаимосвязей дешифровочных и таксационных показателей, закономерностей строения и роста – запаса древостоя [1].

При составлении таксационной характеристики насаждений методами измерительного дешифрирования аэро- и космических снимков можно получить лишь часть показателей древостоя, характеризующих его полог. Поэтому возникает вопрос об использовании связи между размерами крон, видимыми на снимках, и другими таксационными признаками, невидимыми на них [2].

В связи с этим появляется необходимость разработки моделей взаимосвязей между дешифровочными показателями, которые можно измерить непосредственно на цифровых снимках с использованием геоинформационных систем, и таксационными показателями древостоя, измеренными при натурной таксации.

Основная часть. Вопросы, связанные с аэрокосмическими исследованиями и дистанционной оценкой характеристик лесных насаждений, мо-

нитингом лесных земель, рассмотрены во многих работах отечественных и зарубежных исследователей: С. А. Барталева, И. М. Данилина, Е. П. Данюлиса, И. Д. Дмитриева, Б. В. Виноградова, В. М. Жирина, А. С. Исаева, Е. Н. Калашникова, В. В. Козодерова, Г. Г. Самойловича, В. И. Сухих, Н. Г. Харина, F. Lambin, J. Landsberg, D. J. King, M. L. Nordberg, J. A. Tullis и др. Работы перечисленных исследователей указывают на возможность использования методов дистанционного зондирования Земли для оценки таксационных показателей лесных насаждений и картографирования лесных земель, а также на перспективы дальнейших исследований в различных направлениях.

Использованием лесотаксационного дешифрирования в лесном хозяйстве и выявлением закономерностей и взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями древостоев занимались многие ученые, такие как В. Ф. Багинский, А. В. Любимов, Н. Г. Харин, Д. М. Киреев, А. Е. Колосова, Т. Б. Товянскас, А. М. Березин, Т. И. Берестова, Е. С. Демидов, П. В. Ефимов, А. Я Жуков, Ю. А. Прокудин, В. И. Сухих, И. А. Трунов и др.

Современные методы дешифрирования цифровых снимков обеспечивают достаточно надежное измерение изобразившихся на них морфологических показателей отдельных деревьев и полога древостоя – наибольших поперечников крон, длин крон, количества деревьев, раздельно изобразившихся на единице площади, сомкнутости полога.

Основные таксационные показатели – средние диаметры элементов леса, относительные полноты, запасы на 1 га, товарность древостоев, возраст – непосредственно по снимкам не

определяются. Они могут быть вычислены в соответствии с ранее установленными соотношениями таксационных T (диаметр ствола, полнота, запас, возраст) и дешифровочных D_T (диаметр кроны, высота, длина кроны, количество деревьев, сомкнутость полога) показателей [3].

Первоначально в пределах элементов леса изучаются простые связи таксационных и дешифровочных показателей: диаметра и высоты дерева; диаметра и высоты наибольшего диаметра кроны; диаметра и длины кроны; диаметра ствола и диаметра кроны; высоты и длины кроны, а затем – множественные регрессионные зависимости, учитывающие влияние 2–3 и более переменных [4].

Существуют различные множественные регрессионные взаимосвязи между диаметром на высоте груди, высотой и полнотой: $d_m = f(h, P)$ или диаметром на высоте груди, высотой, диаметром кроны, сомкнутостью и классом бонитета: $d_m = f(h, D_k, C_n, \text{класс бонитета})$, которые моделируются с помощью различных корреляционных уравнений или выражаются в виде графиков, номограмм, таблиц, в том числе хода роста, дополненных дешифровочными показателями (высотой, диаметром кроны, сомкнутостью полога, протяженностью кроны, высотой до наибольшего диаметра кроны, высотой до окончания кроны) [5].

Используя геоинформационные системы, специалисты получают мощные средства масштабирования и цветовой коррекции цифровых снимков, а также совмещают процессы дешифрирования и векторизации границ, что упрощает технологию производства лесных карт и позволяет автоматизировать процесс измерений. С помощью средств ГИС можно в автоматизированном режиме выполнять измерение таких показателей, как густота, состав, диаметр кроны деревьев, сомкнутость полога, средняя высота древостоя [1].

Для правильного понимания характера изображения кроны деревьев на цифровых снимках существенное значение имеет изучение строения и форм верхних частей кроны, расположенных выше наибольшего их диаметра. При дешифрировании состава насаждений для распознавания пород следует учитывать еще наличие связи между высотой до наибольшей ширины кроны ($h_{Dк}$) и высотой деревьев (h) [2].

Взаимосвязи таксационных и дешифровочных показателей для отдельных насаждений практически малоприменимы и имеют в значительной степени теоретическое значение. Для применения на практике их необходимо группировать в пределах некоторых совокупностей, классификационные признаки которых могут быть достоверно опознаны на снимках.

Используя различные методы измерительного дешифрирования цифровых снимков,

можно получить такие показатели, как сомкнутость полога древостоя, густота древостоя, расстояние между деревьями и диаметр кроны. По измеренным на цифровых снимках дешифровочным показателям и корреляционным уравнениям можно определять средний диаметр древостоя на высоте груди, полноту древостоя, сумму площадей сечений, средний диаметр, среднюю высоту древостоя и запас.

При определении густоты и состава насаждений в ГИС можно использовать аналогичные методы, основанные на подсчете числа видимых в пологе кроны древесных пород на единицу площади. Для этой цели выбирают площадной объект с известной площадью или линейные объекты, формирующие сетку квадратов. Густоту древостоя можно определить также по среднему расстоянию между деревьями.

Сомкнутость полога древостоя можно определить с использованием точечного или линейного методов. В ГИС формируется точечный слой с систематическим размещением точек. Затем производится подсчет точек, попадающих на кроны, края кроны, и общего количества точек на выделе. Отношение суммы точек, попавших на кроны, и половины, попавших на края кроны, к общему количеству точек на выделе дает сомкнутость полога.

Измерение расстояний между деревьями, диаметров кроны в ГИС выполняется стандартными средствами измерения длин линий. Для вычисления площади проекции кроны отдельного дерева создается полигональный объект и вычисляется его площадь.

В качестве объектов исследования выбраны чистые сосновые древостои I и Ia классов бонитета. Таксационная характеристика древостоев в таксационно-дешифровочных выделах устанавливалась по данным выборочной измерительно-перечислительной таксации закладкой круговых пробных площадок (КПП) постоянного радиуса. Количество круговых площадок постоянного радиуса, необходимое для определения таксационных показателей, зависело от полноты и площади выдела.

Применялась систематическая выборка при таксации древостоев на КПП постоянного радиуса. В пределах КПП выполнялся сплошной пересчет деревьев с измерением диаметров в двух направлениях (север – юг, запад – восток) с точностью до 0,1 см металлической мерной вилкой с делением 1 мм. При сплошном пересчете по участию кроны в формировании полога деревья делились на свободные, частично закрытые и закрытые.

У ближайших к центру пяти учетных деревьев измерялась их высота, высота до наибольшего диаметра кроны и высота окончания

кроны. Диаметр кроны измерялся в двух взаимно перпендикулярных направлениях, также описывалась густота и форма кроны (по классификации Г. Г. Самойловича).

Для обработки данных, полученных при измерительной таксации насаждений, использовались математико-статистические методы.

По полученным данным в программе Statgraphics при помощи анализа параметров множественной регрессии составлялись модели взаимосвязи между дешифровочными и таксационными показателями для I и Ia классов бонитета. Анализ между таксационными показателями древостоя и его полога был выполнен вначале отдельно для I и Ia классов бонитета. Различия между полученными уравнениями оказались не значимыми, поэтому на последующих этапах данные были объединены в единую совокупность. Коэффициенты уравнений значимы по *t*-критерию Стьюдента, о чем свидетельствует информация в табл. 1–5.

Уравнение, характеризующее связь между полнотой (*P*) древостоя, сомкнутостью ($C_{п}$) полога и средним расстоянием между деревьями ($L_{дер}$) в сосновых насаждениях, имеет вид

$$P = -1,27677 + 3,03996 C_{п} - 0,047351 L_{дер}. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации (R^2) составляет 83,57%; средняя квадратическая ошибка уравнения (S_y) – 0,042, *F*-критерий Фишера (*F*) – 663,81. Пределы действия уравнения по сомкнутости $0,50 < C_{п} < 0,95$.

Таблица 1

Значения *t*-критерия Стьюдента независимых переменных для расчета полноты древостоя

Параметры	Constant	$C_{п}$	$L_{дер}$
<i>t</i> -критерий Стьюдента	-12,4895	25,0612	-13,8546

Было выполнено исследование взаимосвязи между средним диаметром древостоя и его таксационными показателями, такими как средняя высота древостоя, возраст, средний диаметр кроны, густота, сомкнутость, сумма площадей сечения и др. Последовательным исключением не значимых переменных по *t*-критерию Стьюдента было получено следующее уравнение множественной регрессии:

$$D_{ср} = -6,52007 D_{кр\ ср} + 0,923253 D_{кр\ ср}^2 + 5,29728 L_{дер} + 27,3359 C_{п}^2, \quad (2)$$

где $D_{ср}$ – средний диаметр древостоя, см; $D_{кр\ ср}$ – средний диаметр кроны полога древостоя, м; $L_{дер}$ – среднее расстояние между деревьями, м; $C_{п}$ – сомкнутость полога насаждения древостоя.

Коэффициент детерминации (R^2) составляет 97,8%; средняя квадратическая ошибка уравнения (S_y) – 0,762, *F*-критерий Фишера (*F*) – 3127,05.

Таблица 2

Значения *t*-критерия Стьюдента независимых переменных для расчета среднего диаметра древостоя

Параметры	$D_{кр\ ср}$	$D_{кр\ ср}^2$	$L_{дер}$	$C_{п}^2$
<i>t</i> -критерий Стьюдента	-18,086	17,846	46,522	24,432

При исследовании взаимосвязи между средней высотой древостоя и показателями его полога лучшие результаты дала следующая функция:

$$H_{ср} = 51,849 - 0,3424 D_{кр\ ср}^2 - 0,0502 N_{дер} + 0,00003 N_{дер}^2, \quad (3)$$

где $H_{ср}$ – средняя высота древостоя, м; $D_{кр\ ср}$ – средний диаметр кроны полога древостоя, м; $N_{дер}$ – густота древостоя, шт.

Таблица 3

Значения *t*-критерия Стьюдента независимых переменных для расчета средней высоты древостоя

Параметры	Constant	$D_{кр\ ср}^2$	$N_{дер}$	$N_{дер}^2$
<i>t</i> -критерий Стьюдента	31,915	-10,191	-15,024	11,964

Коэффициент детерминации (R^2) составляет 73,66%; средняя квадратическая ошибка уравнения (S_y) – 1,11; *F*-критерий Фишера (*F*) – 242,31.

Данная функция показывает, что средняя высота древостоя зависит от среднего диаметра кроны и густоты древостоя.

Регрессионное уравнение связи между суммой площадей сечения, средним диаметром древостоя и полнотой приведено в формуле (4):

$$G = -4,7481 + 0,16281 D_{ср}^2 + 40,2027 P, \quad (4)$$

где G – сумма площадей сечений, см²; $D_{ср}$ – средний диаметр насаждения, см; P – относительная полнота древостоя.

Таблица 4

Значения *t*-критерия Стьюдента независимых переменных для расчета суммы площадей сечений

Параметры	Constant	$D_{ср}^2$	P
<i>t</i> -критерий Стьюдента	-6,6273	14,073	73,527

Коэффициент детерминации (R^2) составляет 95,74%; средняя квадратическая ошибка уравнения (S_y) – 0,809, *F*-критерий Фишера (*F*) – 2931,92.

Анализ результатов исследования взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями древостоя показал, что существует тесная связь между полнотой насаждения, сомкнутостью полога и средним расстоянием между деревьями, на это указывает высокий коэффициент детерминации (R^2), который составляет 83,57%. При исследовании множественных регрессий тесная связь наблюдается между средним диаметром древостоя, средним диаметром крон полога, средним расстоянием между деревьями и сомкнутостью полога насаждения, что подтверждает высокий коэффициент детерминации (97,80%). Также существует связь между средней высотой древостоя, средним диаметром крон полога и густотой древостоя (коэффициент детерминации составляет 73,66%).

Проведенные исследования показывают, что для определения запаса древостоя необходимо знать такие дешифровочные показатели, как среднее расстояние между деревьями, средний диаметр крон и сомкнутость полога. Регрессионное уравнение данной зависимости приведено в формуле (5):

$$M = -497,96 + 56,29 L_{\text{дер}} - 3,91 D_{\text{кр ср}}^2 + 1231,17 C_{\text{п}}^2 \quad (5)$$

где M – запас древостоя, m^3 ; $D_{\text{кр ср}}$ – средний диаметр крон полога древостоя, м; $C_{\text{п}}$ – сомкнутость полога древостоя.

Таблица 5

Значения t -критерия Стьюдента независимых переменных для расчета запаса древостоя

Параметры	Constant	$L_{\text{дер}}$	$D_{\text{кр ср}}^2$	$C_{\text{п}}^2$
t -критерий Стьюдента	-11,395	10,272	-4,572	19,972

Коэффициент детерминации (R^2) составляет 65,11%; средняя квадратическая ошибка уравнения (S_y) – 34,44, F -критерий Фишера (F) – 161,75.

Заключение. Результаты исследований подтверждают выводы других авторов о существовании тесных взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями древостоя.

Анализ результатов исследования взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями древостоя позволяет сделать вывод, что существует тесная связь между полнотой насаждения, сомкнутостью полога и средним расстоянием между деревьями, на это указывает высокий коэффициент детерминации (R^2), который составляет 83,57%. При исследовании множественных регрессий тесная связь наблюдается между средним диаметром древостоя, средним диаметром крон полога, средним расстоянием между деревьями и сомкнутостью полога насаждения, что подтверждает высокий коэффициент детерминации (97,80%). Также существует связь между средней высотой древостоя, средним диаметром крон полога и густотой древостоя (коэффициент детерминации составляет 73,66%). Было выполнено исследование взаимосвязи между суммой площадей сечения, средним диаметром древостоя и полнотой, которое показывает тесную связь между этими показателями (коэффициент детерминации – 95,74%). В дальнейшем необходимо выполнить регрессионный анализ для оценки взаимосвязей между запасом и таксационно-дешифровочными показателями древостоев.

Литература

1. Толкач И. В., Бахур О. С. Методы оценки основных таксационно-дешифровочных показателей на цифровых снимках с использованием ГИС-технологий // Сб. науч. трудов ИЛ НАН Беларуси. Гомель: ИЛ НАН Беларуси. 2012. Вып. 72. С. 354–362.
2. Самойлович Г. Г. Применение аэрофотосъемки и авиации в лесном хозяйстве. 2-е изд. М.: Лесная пром-сть, 1964. 486 с.
3. Дмитриев И. Д., Мурахтанов Е. С., Сухих В. И. Лесная авиация и аэрофотосъемка. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1989. 366 с.
4. Лобанов А. Н., Буров М. И., Краснопевцев Б. В. Фотограмметрия: учеб. для вузов. М.: Недра, 1984. 309 с.
5. Сухих В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.

Поступила 20.02.2014