



Българска академия на науките

Институт за космически изследвания и
технологии

Петър Кирилов Димитров

Оценяване и картографиране на показатели на
структурата на иглолистни гори чрез спътникови
многоканални изображения

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на образователна и
научна степен „Доктор”

София • 2012



Българска академия на науките
Институт за космически изследвания и
технологии

Петър Кирилов Димитров

Оценяване и картографиране на показатели на
структурата на иглолистни гори чрез спътникови
многоканални изображения

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на образователна и
научна степен „Доктор”

Научна специалност 01.04.12 "Дистанционни
изследвания на Земята и планетите"

Научен ръководител:
Проф. д-р Евгения Руменина

София • 2012

Дисертационният труд е разработен в рамките на задочна докторантура в Секция „Дистанционни изследвания и ГИС” към Институт за космически изследвания и технологии (ИКИТ) на Българска академия на науките (БАН). Той е обсъден на заседание на разширен Научен семинар на секция „Дистанционни изследвания и ГИС” на ИКИТ - БАН, проведено на 05.07.2012 г., и е насочен за защита пред специализирано жури в състав:

1. Проф. дн. Гаро Мардиросян – ИКИТ-БАН
2. Проф. дн. Христо Цаков – ИГ-БАН
3. Проф. д-р Евгения Руменина – ИКИТ-БАН
4. Доц. д-р Никола Тодоров – СУ „Св. Климент Охридски”
5. Доц. д-р Владимир Вълчев – ИБЕИ-БАН

Дисертационният труд е в обем от 103 страници, включващи 25 таблици, 28 фигури, библиография от 123 заглавия, от които 27 на кирилица и 96 на латиница, както и 3 приложения (таблици с резултати от корелационния анализ, графики с резултати от анализа на остатъците и примерни карти на разпределението на показателите на структурата на горите).

Работата има следната структура: Въведение – 5 стр., Състояние на проблема – 16 стр., Район на изследване, използвани данни и методи – 23 стр., Резултати и обсъждане – 39 стр., Заключение и перспективи – 4 стр., Приноси и списък на публикациите свързани с дисертацията – 1 стр., Литература – 5 стр., Приложения – 10 стр.

Материалите по защитата са публикувани в интернет на страницата на ИКИТ - БАН (<http://www.space.bas.bg>) и са на разположение на интересуващите се в канцеларията на института - ст. 413, ет. IV бл.1, ул. Акад. Г. Бончев.

1 Въведение

Горските ландшафти представляват изключително сложни системи чието познаване и разбиране днес е по-важно от всякога. Един от основните въпроси е свързан с анализа на измененията на техните характеристиките в пространството предизвикани от различията в природните условия и динамичните процеси протичащи в тях. Териториалните различия се засилват още повече под влияние на стопанската дейност на хората, която е съществен фактор влияещ на състава, строежа и възобновяването на горите. Всичко това налага нуждата от актуална географски представена информация за различни количествени и качествени характеристики на горите, като възраст, състав и др., която да бъде използвана както за тяхното управление, така и за научни изследвания. Сред тези характеристики особено важна е структурата на гората – комплексно понятие включващо признаци като размер, гъстота и пространствена подредба на изграждащите я растения (включително изсъхналите дървета).

Особеностите на структурата са от съществено значение за изпълнението на различните функции на гората. Тези функции обезпечават разнообразните аспекти на ползата от горите, включително недървесни горски продукти, рекреация и туризъм, съхраняване на почвата, осигуряване на вода, поддържане на биоразнообразието и фиксиране на въглерод. Поради това, информация за структурата на горите е необходима не само за нуждите на горското стопанство, но и за планирането на политиката в областта на околната среда (Tomppo *et al.*, 2010).

Осигуряването на необходимите данни за структурата на горите е задача на тяхната инвентаризация. Въпреки че тя е най-изчерпателният и надежден източник на информация за горите в страната данните от нея не винаги са достатъчни или подходящи за дадено приложение или проект. Освен това тяхното получаване е скъпо и трудоемко, поради което таксацията се извършва през голям период от време. Някои от проблемите с наличните в момента данни за горите в България са свързани с обновяването и актуалността им, не добрата точност на картографските материали и това, че не винаги са достъпни в цифров вид, което затруднява използването им за пространствени анализи.

Едва ли може да се предложи бърз и лесен подход за преодоляването на тези затруднения и за подобряване на наличната информация за горите. При всички случаи е от полза да разполагаме с източник на данни, способен да осигури географски привързана информация върху обширни територии в кратки срокове. Данните от дистанционните изследвания (ДИ) на Земята от Космоса притежават тези три характеристики. Те имат безспорни предимства по отношение на геопропространствената точност и възможността лесно да се интегрират в ГИС и да се анализират заедно с информация от други източници. В същото време по отношение на тематичната точност на получаваната от тях информация се наблюдават

значителни вариации в зависимост от конкретното приложение, метода на анализ и тип на данните. Извличането на полезна информация за структурата на гората от изображенията получени чрез ДИ е сериозно предизвикателство и представлява активно развиваща се област на съвременните приложни дистанционни изследвания. Предстои още много работа преди ДИ да станат обичаен инструмент за картографиране на структурата на горите. Междувременно експериментирането с нови подходи и типове данни продължава да показва обнадеждаващи резултати. Настоящата дисертация е посветена именно на изследването на тези възможности, като адаптира част от досегашния опит и методи за извличане на информация за структурата на горите чрез многоканални спътникови изображения и ги прилага към представителни иглолистни гори в България.

1.1 Обект и предмет на изследване

Обект на изследване в дисертацията са иглолистните гори в избран тестови участък от северния макросклон на Рила планина. Интересът към този тип гори е продиктуван от значителното им площно разпространение, особено в планинските части на южна България, тяхното интензивно стопанско използване и голямо екологично значение. Избраният район е представителен за по-голямата част от иглолистните гори в страната по отношение на природните условия, видовия състав и начина на стопанисване. Предмет на изследване е тяхната структура и по-специално комплекс от дендрометрични показатели, които могат да се използват за нейното характеризирание и връзката на тези показатели със спектралните отражателни характеристики регистрирани чрез спътникови сензори.

1.2 Цел и задачи на изследване

Основна цел на настоящото изследване е да се оцени и картографира структурата на представителни иглолистни гори в Рила планина чрез многоканални спътникови изображения с пространствена разделителна способност от 0,6 до 20 m. За постигане на тази цел са формулирани за изпълнение следните задачи:

- да се извършат дендрометрични измервания в мрежа от пробни площадки с цел събиране на наземни данни за структурата на иглолистните гори в избран тестови участък;
- да се установят взаимовръзките на показателите характеризиращи структурата на гората със спектралната информация от спътникови сензори с различна пространствена разделителна способност – SPOT4/5, ASTER и QuickBird;
- да се оцени влиянието на топографската корекция на изображенията върху наблюдаваните взаимовръзки;

- да се установят възможностите за използване на текстурната информация в изображение с висока пространствена разделителна способност (QuickBird) за характеризирание на структурата на гората;
- да се разработят регресионни модели за оценяване на показатели на структурата на горите;
- да се картографират иглолистните гори според техните структурни показатели с помощта на оптимален набор от спътникови данни.

2 Състояние на проблема

2.1 Анализ на понятието за структура на гората

Под структура (от лат. *structura* – строеж) в най-общ смисъл се разбира строеж и вътрешна форма на организация на една система. Въпреки широкото си използване терминът структура на гората не е еднозначно дефиниран, което личи от разнородните показатели и критерии, които различни автори използват за нейното описание.

Като наука занимаваща се с растителните съобщества фитоценологията има основна роля за разбирането на понятието структура на гората. По отношение на растителните съобщества в литературата се срещат три основни направления в трактовката на понятието структура: структурата като синоним на строеж, като синоним на състав, и като съвкупност от функционални връзки. (Корчагин, 1976) В настоящото изследване под структура се разбира единствено строежът на гората, тоест характеристиките и разположението на изграждащите я елементи в пространството (в хоризонтално и вертикално направление).

За разлика от теорията на фитоценологията, която разделя съобществата на еднородни групи от растения, в много от лесовъдските и екологичните изследвания се акцентира върху отделните дървета или техни части (най-вече короната) като основни структурни елементи на гората. В повечето случаи анализът на структурата на гората се свежда от една страна до оценка на обилието и размерите на изграждащите я елементи и от друга до характера на тяхното пространствено разпределение. В настоящото изследване се разглежда първият аспект и се изследват възможностите за оценка на няколко дендрометрични показателя, които са информативни по отношение на строежа на иглолистните гори. Използваните в настоящата работа показатели са разделени на две групи: показатели за обилието на дървесните растения (гъстота, кръгова площ, проективно покритие, обем, биомаса) и показатели за размерите (диаметър и височина) и разнообразието в размерите на дърветата.

2.2 Изследвания на структурата на горите чрез дистанционни методи

Опити за оценяване на структурата на горите чрез дистанционни данни са правени в различни биомии и типове гори – в бореалните и

тропичните гори, в естествени гори и култури, в иглолистни, широколистни и смесени типове гора (Franklin *et al.*, 2003b; Muukkonen, Heiskanen, 2005; Anaya *et al.*, 2009; de Wasseige, Defourny, 2002; Kayitakire *et al.*, 2006; Lefsky *et al.*, 2001; Cho *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2004). Дистанционните методи на изследване предлагат голямо разнообразие от апаратни системи работещи в различни спектрални диапазони (Мардиросян, 2003) и предоставящи специфични типове данни, които са от полза за оценката на структурата на горите. Несъмнено най-голямо значение за дистанционите изследвания на структурата на горите през последните десетилетия имат данните от оптичните многоканални сензори. През този период е натрупан огромен обем от публикации показващи наличието на връзка между структурата на горите и техните отражателни характеристики във видимия и част от инфрачервения диапазон на спектъра (Gerylo *et al.*, 2000; Muukkonen, Heiskanen, 2005; Mäkelä, Pekkarinen, 2004). Тези взаимовръзки са изследвани както с помощта на емпирични данни, така и чрез теоретични модели и са използвани с различен успех за оценяване на различни дендрометрични показатели. Най-широко приложение имат спътниците със средна пространствена разделителна способност (ПРС), между които особено място заемат Landsat и SPOT (Lefsky, Cohen, 2003). Автоматичната обработка на изображения с висока ПРС разкрива нови възможности за характеризиране на структурата на горите. С появата на спътници като IKONOS и QuickBird изображенията с висока ПРС придобиват все по-голямо значение за изследването на структурата на горите.

2.3 Методи за оценка на структурата на горите чрез многоканални спътникови изображения

В литературата преобладават два подхода при изследването на показателите на структурата на горите чрез дистанционни данни. При първия подход стойностите на показателя са групирани в класове и целта е да се определи принадлежността към даден клас (тоест извършва се класификация), а при втория съответния показател се оценява като непрекъсната променлива. Класификацията може да служи за оценка на структурата във вид на рангова или интервална скала (Franklin *et al.*, 2003a). Повечето структурни характеристики на горската растителност, обаче по природа представляват непрекъснати променливи (Joshi *et al.*, 2006). Поради това значително по-полезни са методи като регресионния анализ, невронните мрежи, k-NN, геостатистиката и физическите модели на отражението, позволяващи да се оценяват непрекъснати променливи.

Всеки от тези методи има свои предимства и недостатъци. Въпреки някои проблеми съпътстващи регресионния анализ до момента той намира най-широко приложение и отговаря в най-голяма степен на целите и условията в настоящото изследване.

2.4 Типове информация съдържаща се в оптичните многоканални изображения и връзката им със структурата на гората

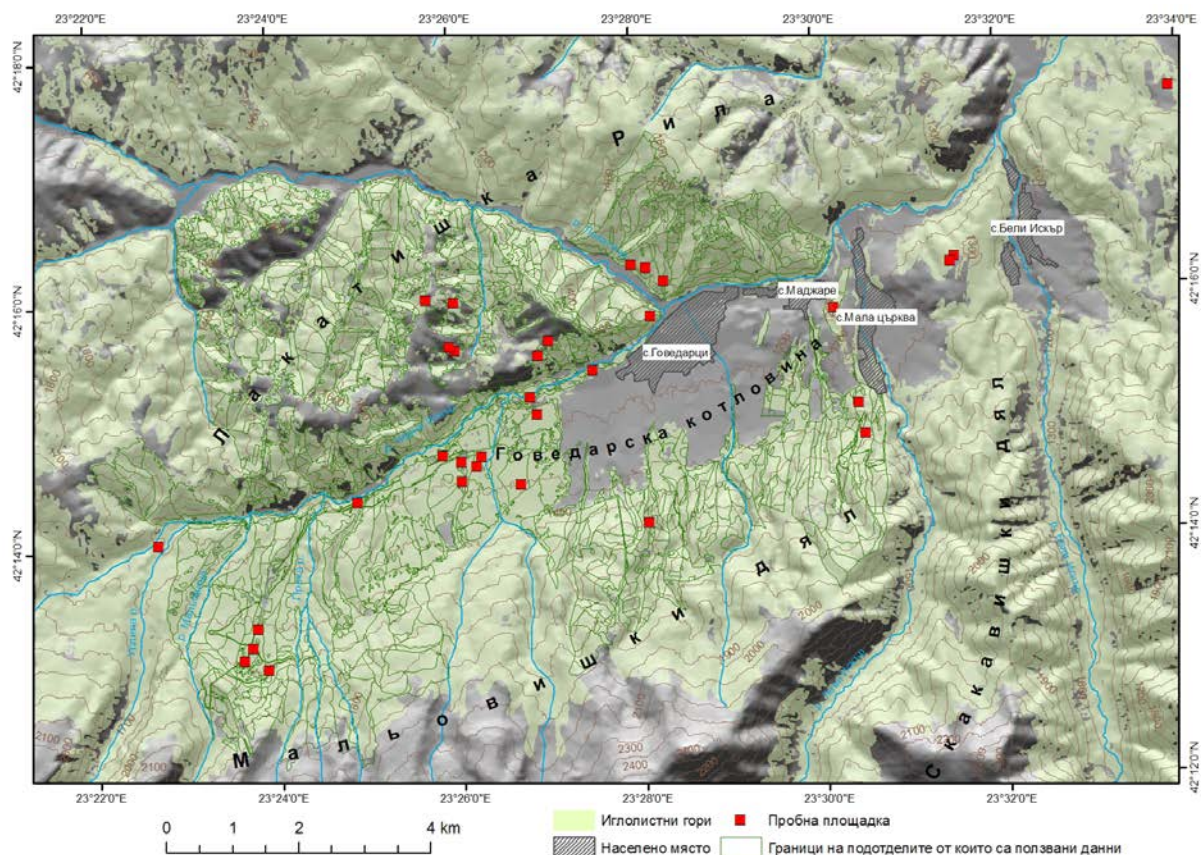
В зависимост от своя тип данните от оптичните многоканални изображения могат да съдържат три основни типа информация, които са от полза за характеризирането и оценяването на структурата на гората. Това са информацията за отражението в различни спектрални зони, пространствената информация и информацията за ъгловото разпределение на отражението. В различните изображения може да преобладава един или друг тип информация. Например в многоканалните изображения със средна ПРС водеща е спектралната информация, докато в тези с висока ПРС към нея се добавя и пространствената информация; за ъгловото разпределение на отражението може да се съди когато имаме серия от изображения заснети под различен ъгъл.

Тъй като размера на пиксела в изображенията със средна ПРС е по-голям от средния размер на дървесните корони в него попадат няколко отделни дървета и пространството между тях. По този начин яркостта на даден пиксел се формира от отражението от растителността и почвата, което допълнително се модифицира от сенките които дървесните корони хвърлят върху почвата или една на друга (Li, Strahler, 1985). Така, количествените взаимоотношения между дървесните корони, почвата и сенките в рамките на пиксела влияят на общото отражение. В изображенията с висока ПРС короните, почвата и сенките не се интегрират в една обща яркостна стойност, а са представени като самостоятелни „обекти“ в изображението. По този начин пространствената информация се съдържа в текстурата на изображението, тоест пространствената изменчивост на тона или цвета. Горската растителност е антиогледална отразяваща повърхност, тоест отразява максимално в посока към източника на излъчването. Сред факторите влияещи върху ъглово разпределение на отразената от горите радиация са гъстотата и формата на дървесните корони (Li, Strahler, 1992).

3 Район на изследване, използвани данни и методи

3.1 Район на изследване

За целите на изследването е избран тестови участък в Рила планина с площ 196 km² (представен на Фигура 2 от дисертацията). Преобладаващата част от него е заета от фитоценозите на белия бор (*Pinus sylvestris* L.), смърча (*Picea abies* (L.) Karst.), елата (*Abies alba* Mill.) и бялата мура (*Pinus peuce* Griseb.). Територията е избрана поради разнообразието в характеристиките на иглолистните гори – разнороден видов състав, наличие на гори с естествен и изкуствен произход и с различна стопанска усвоеност, включително такива, които са част от Национален парк “Рила”. Поради това тя може да се смята за представителна за иглолистните гори в планината.



Фигура 2. Карта на изследвания район на която са показани подотделите и пробните площадка от които е получена наземната информация използвана в изследването.

3.2 Събиране и предварителна обработка на данните

3.2.1 Наземни данни

Наземните данни са получени чрез дендрометрични измервания в мрежа от 32 пробни площадки с вариращ размер осъществени през 2009, 2010 и 2011 г., както и от лесоустройствения проект на ДГС Самоков (Фигура 2). Пробните площадки са заложи така, че да се обхване колкото се може по-пълно разнообразието в строежа и възрастта на горите в района. Във всяка площадка са измерени обиколките на стъблата на дърветата, отбелязан е също така видът на всяко дърво, а в повечето площадки са измерени и височините им с помощта на висотомер. За определяне на проективното покритие са направени вертикални снимки на склопа с помощта на цифров фотоапарат. Координатите на всяка площадка са определени с помощта на ръчен GPS приемник. Събраните в площадките данни са използвани за да се определи гъстотата на дърветата ($\# \text{ha}^{-1}$), кръговата площ ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), обемът на стъблената дървесина ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), надземната биомаса (t ha^{-1}), проективното покритие на короните (%) и група от показатели характеризирани разпределението на дърветата по диаметър и височина (среден и доминиращ диаметър - $D_{\text{ср.}}$ и $D_{\text{дом.}}$; средна и доминираща височина - $H_{\text{ср.}}$ и $H_{\text{дом.}}$; стандартно отклонение на диаметрите и височините - $D_{\text{с.о.}}$ и $H_{\text{с.о.}}$; обхват на диаметрите и височините - $D_{\text{обхв.}}$ и $H_{\text{обхв.}}$). Лесоустройствените данни се състоят от таксационни описания на 794 подотдела съставени преобладаващо от иглолистни видове за които има

данни за запаса (обема) и с размери над 1 ha. Въз основа на данните за обема е изчислена надземната биомаса на подотделите използвайки видово-специфични трансформиращи коефициенти (Замолодчиков и др., 2005).

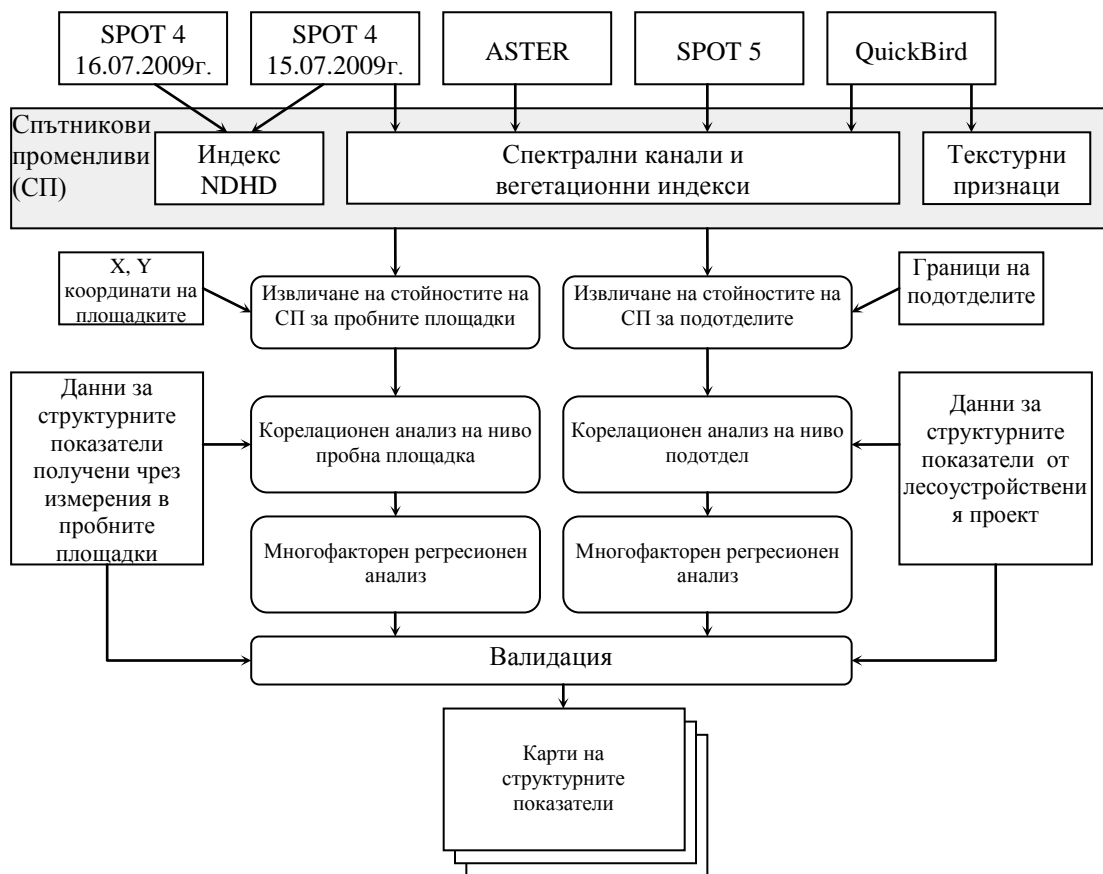
3.2.2 Спътникови изображения

В настоящото изследване са използвани пет спътникови изображения от многоканални сензори със средна и висока ПРС: две изображения от SPOT4 HRVIR (от 15 и 16.07.2009 г.) и по едно изображение от Terra ASTER (01.10.2008 г.), SPOT5 HRG (14.07.2008 г.) и QuickBird (16.08.2007 г.). Изображенията са орторектифицирани с помощта на цифров модел на релефа (ЦМР) и наземни опорни точки измерени с GPS. Стойностите на пикселите са конвертирани в яркости, L_{λ} ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), а след това в спектрални коефициенти на отражение при горната граница на атмосферата (СКО). Освен това яркостните стойности на изображенията със средна ПРС (тоест без QuickBird) са топографски коригирани по метода SCS+C (Soenen *et al.*, 2005) и получените топографски коригирани яркости (ТКЯ) са анализирани успоредно със СКО с цел сравнение на влиянието на топографската корекция.

3.3 Методи на анализ на наземните и спътниковите данни

В настоящото изследване е приложен емпирико-статистическият подход за разкриване и моделиране на взаимовръзката на измерените на терена структурни показатели на иглолистни гори и различни спътникови променливи (СП) извлечени от изображения. Методиката на извършения анализ е схематично представен на Фигура 8. Използваните СП са три групи: (1) стойностите на ТКЯ/СКО в отделните спектрални канали на изображенията от четирите спътникови сензора и вегетационни индекси получени от тях; (2) текстурни признаци изчислени по изображението от QuickBird и (3) ъгловият индекс NDHD (Normalized Difference between Hotspot and Darkspot) изчислен чрез двете изображения от SPOT4.

В настоящото изследване са използвани следните вегетационни индекси: 1) нормализиран разликов вегетационен индекс (NDVI); 2) коригиран нормализиран разликов вегетационен индекс (NDVIC); 3) отношение на близкия инфрачервен към червения канал (SR); 4) редуцирано отношение на близкия инфрачервен към червения канал (RSR); 5) нормализиран разликов инфрачервен индекс (NDII); 6) отношение на близкия инфрачервен към късовълновия инфрачервен канал (SI). От многоканалното и панхроматичното QuickBird изображение са извлечени четири текстурни признака: *дисперсия* (V), *хомогенност* (H), *контраст* (C) и *различие* (D) използвайки GLCM филтъра в програмния продукт ENVI. Разликата в отражението регистрирано в двете изображения от SPOT4 при рязличен ъгъл на наблюдение е оценена чрез ъгловия индекс NDHD (Chen *et al.*, 2003).



Фигура 8. Схема на използваните в изследването наземни и спътникови данни и техния анализ.

Стойностите на СП за всяка пробна площадка и подотдел са извлечени от изображенията, след което са изчислени корелациите им (r) с наземно измерените дендрометрични показатели. Всички СП, които са значимо корелирани с дендрометричните показатели са разглеждани като потенциални предиктори в последващия линеен регресионен анализ. При необходимост е използвана логаритмична трансформация на променливите за да се доведе зависимостта до приблизително линейна форма. За всеки дендрометричен показател са съставени три модела. В първия като независима променлива е използван спектралният канал или вегетационен индекс, който е най-силно корелиран със съответния дендрометричен показател. В другите два модела се добавя втора независима променлива – в единия случай това е текстурен признак, а в другия индексът NDHD. Критерият при избора на втората независима променлива е тя да води до най-голямо нарастване на нормирания R^2 спрямо първия модел и да не е силно корелирана (над 0,80) с първата независима променлива. Целта е да се види дали добавянето на текстуерна или ъглова информация в модела дава по-добър резултат от използването само на спектрална информация. Оптималните регресионни уравнения са приложени към спътниковите изображения за съставяне на карти на пространственото разпределение на изследваните показатели на горите в тестовия участък.

4 Резултати и обсъждане

4.1 Характеризиране на взаимовръзките на структурните и спътниковите променливи на ниво пробна площадка

4.1.1 Взаимовръзка със спектралните канали и вегетационни индекси

От спектралните канали и индекси от SPOT4 близкият инфрачервен канал (XS3) показва най-висока корелация с повечето структурни показатели. Неговите корелационни коефициенти са от -0,42 (-0,41) за кръговата площ до -0,80 (-0,82) за доминиращата височина¹. Единствено за проективното покритие каналът XS3 е изпреварен от индексите NDVI, SR, NDII и SI, за които корелационните коефициенти са между 0,58 и 0,60. Най-ниски са корелациите с късовълновия инфрачервен канал (SWIR), чиито корелационни коефициенти със средния диаметър, кръговата площ и проективното покритие не са статистически значими. Това е причината и за по-слабото представяне на индексите в които се използва близкият инфрачервен канал – NDII и SI. Коририраните варианти на NDVI и SR – NDVI_c и RSR на практика не показват връзка със структурните показатели. Отделните показатели на структурата на гората не са еднакво силно свързани със спътниковите спектрални данни и индекси от SPOT4. Корелацията е силна (над |0,70|) за обема, биомасата и доминиращия диаметър, както и за три от четирите показателя свързани с височината на дървостоя – $H_{\text{дом.}}$, $H_{\text{ср.}}$ и $H_{\text{обхв.}}$. Най-ниски са корелациите с кръговата площ и гъстотата. Разликите между корелационните коефициенти за двете изображения с различно ниво на предварителна обработка са малки, но в повечето случаи се получават по-високи коефициенти със стойностите на СКО.

Подобно на SPOT4 близкият инфрачервен канал (B3) на сензора ASTER е най-силно свързан с преобладаващата част (десет) от структурните показатели. За тези показатели стойностите на коефициента на корелация с канал B3 са от -0,60 (-0,63) за $H_{\text{с.о.}}$ ($D_{\text{обхв.}}$) до -0,83 (-0,80) за доминиращата височина. Кръговата площ не е значимо корелирана с нито един от каналите и индексите от ASTER. Показателите характеризиращи средния и доминиращия диаметър и височина на дървостоя са силно корелирани със спътниковите данни от ASTER (r над |0,70|). Умерена корелация показват обемът, биомасата и показателите характеризиращи разнообразието на диаметрите и височините на дърветата (от -0,60 до -0,69). Стойностите на корелационните коефициенти с топографски коририраните и некоририраните спътникови данни са близки помежду си. Ако се разгледа само близкият инфрачервен канал се вижда, че за почти всички дендрометрични показатели по-високи корелации се получават с ТКЯ.

¹ В този и следващите раздели когато корелационните коефициенти са представени по двойки първият се отнася за топографски коририраното изображение, а вторият, в скобите, за некоририраното изображение.

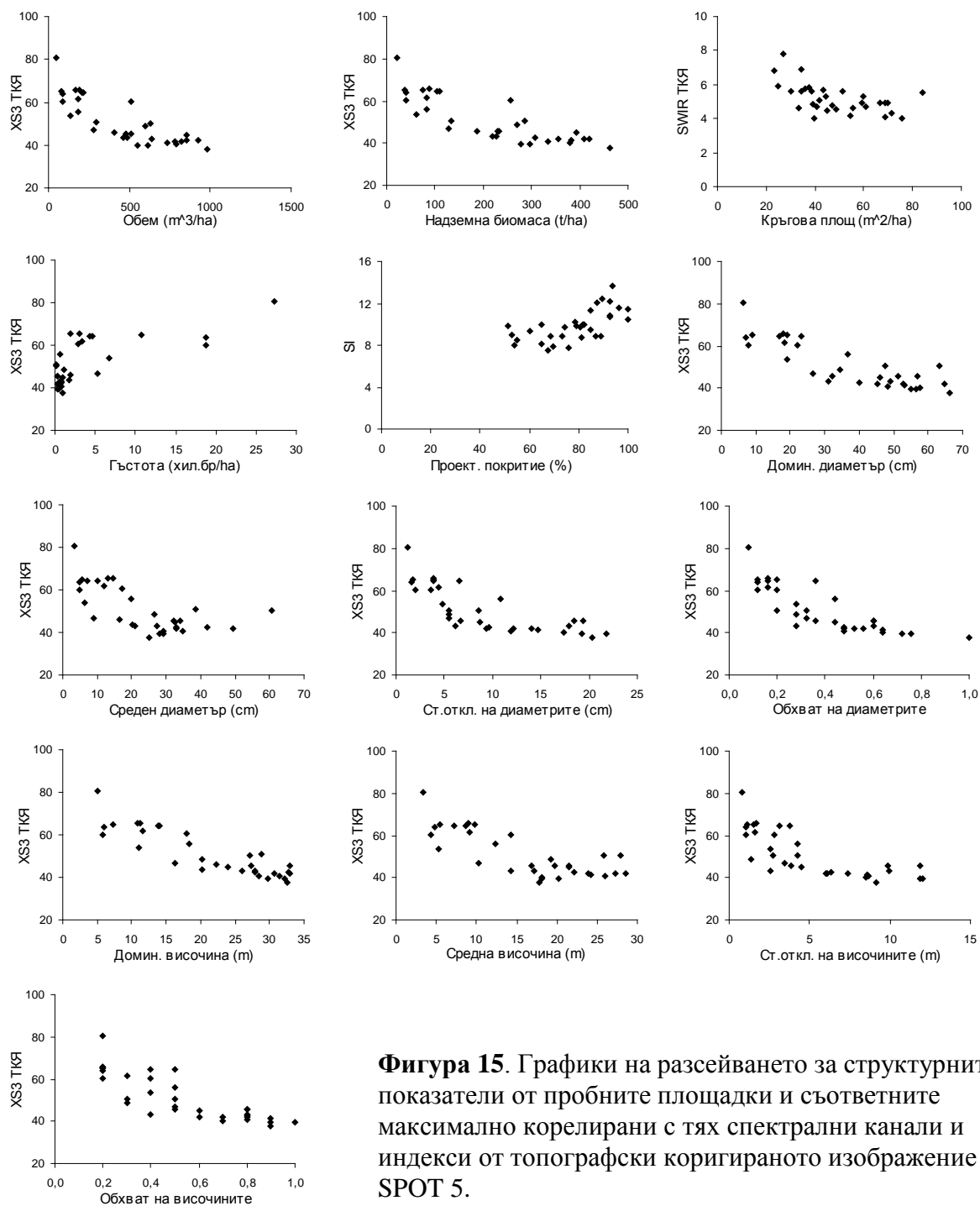
С изключение на проективното покритие всички останали структурни показатели имат най-висока корелация с данните на близкия инфрачервен канал (XS3) на SPOT5. Корелационните коефициенти са от -0,55 (-0,53) за кръговата площ до -0,88 (-0,90) за доминиращата височина. Както при SPOT4 проективното покритие е по-силно корелирано със спектралните индекси SI, NDII, SR и NDVI, за които корелациите са от -0,60 до -0,65. За девет от структурните показатели максималният корелационен коефициент със спътниковите променливи от SPOT5 е над |0,70|. Умерени или слаби са корелациите с кръговата площ, гъстотата, проективното покритие и средния диаметър. Въпреки че разликите на корелационните коефициенти получени с топографски коригираните и некоригираните спътникови данни не са големи се забелязва една обща тенденция за намаляване на силата на връзка когато са използвани стойностите на ТКЯ.

Тенденцията за най-силна корелираност на структурните показатели със спектралната информация от близкия инфрачервен канал се запазва и при изображението от QuickBird. Осем от показателите са най-силно корелирани именно с канал B4, като коефициентите варират от -0,74 за стандартното отклонение на диаметрите до -0,89 за доминиращата височина. За средните диаметър и височина, както и за проективното покритие по-добри корелации се получават с индекса NDVI. Гъстотата и кръговата площ са слабо корелирани и то само с някои от спектралните канали и индекси. Кръговата площ показва много ниска, макар и значима корелация с червения (B3) канал (-0,40). Сред показателите които най-силно са свързани със спътниковите данни отново са доминиращите диаметър и височина.

Резултати за корелациите на структурните показатели с данните от четирите спътникови сензора показват, че близкият инфрачервен канал съдържа най-много информация за структурата на разгледаните типове иглолистни гори. Девет от показателите са най-силно корелирани с близкия инфрачервен канал и при четирите сензора, а при други три показателя (гъстота, кръгова площ и среден диаметър) близкият инфрачервен канал е водещ поне при два от сензорите. От всички спектрални индекси NDVI и SR са най-силно свързани със структурните показатели, но въпреки това корелациите с тях са малко по-ниски от тези с близкия инфрачервен канал. Изключение прави само проективното покритие, което при три от спътниковите сензори е максимално корелирано с NDVI.

Независимо от използвания спътников сензор най-силно корелирани със спектралните данни са доминиращата височина и доминиращият диаметър, а най-слабо кръговата площ и гъстотата. Обемът, биомасата и проективното покритие, както и показателите характеризиращи разнообразието на размерите на дърветата заемат междинно положение. Като пример за изясняване на характера на зависимостите между спътниковите и наземните данни, на Фигура 15 в дисертацията са

представени графично взаимовръзките на отделните структурни показатели и спектралната информация от SPOT5.

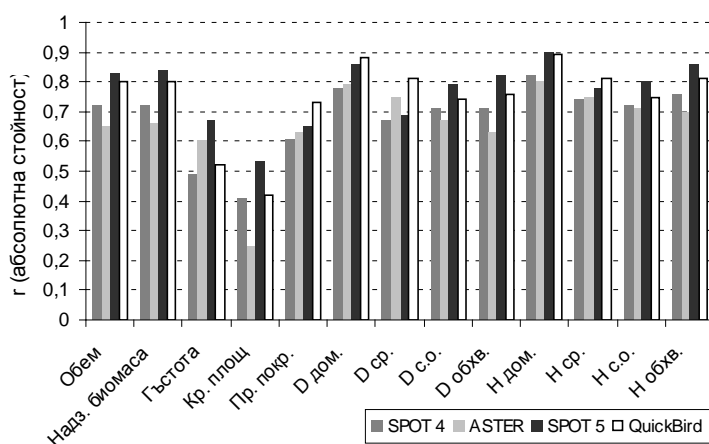


Фигура 15. Графики на разсейването за структурните показатели от пробните площадки и съответните максимално корелирани с тях спектрални канали и индекси от топографски коригираното изображение на SPOT 5.

Обща закономерност за всички показатели (без гъстотата и проективното покритие) е отрицателната им връзка със стойностите на яркостта/отражението в отделните спектрални канали и със стойностите на вегетационните индекси. Обяснението на тези зависимости е свързано с естествените процеси на развитие на структурата на гората. С нарастването на възрастта ѝ прозорците в склопа се увеличават за сметка на разреждането на дървостоя (Spies, 1998). Подлеса или по-ниските дървесни етажи заемат тези прозорци остават в сянката на съседните по-високи

дървета. Увеличаването на площта която не е ограна директно от Слънцето води до общото намаляване на отражението от склопа (Gerylo *et al.*, 2000). В общия случай зависимостите имат криволинейна формата и единствено доминиращата височина показва близка до линейната зависимост с яркостните стойности на близкия инфрачервен канал (XS3). Криволинейната форма на зависимостите е в резултат на намаляването на чувствителността на спътниковите данни към промените настъпващи в структурата на гората с нарастването на повечето от свързаните с нея показатели. Гъстотата и проективното покритие за разлика от останалите показатели са положително корелирани със спътниковите данни. С нарастването на гъстотата на дърветата склопът става по-плътен и отражението от него се увеличава във всички спектрални канали. Причината е, че колкото по-плътен е склопът, толкова по-голяма е площта на огрятите от Слънцето части от короните, което увеличава отражението независимо от спектралния диапазон. В настоящото изследване преобладават горите с голямо проективно покритие (70-80%). Младите естествено или изкуствено възобновени гори в района са с максимално проективно покритие. Отражението от тях е високо по същите причини като посочените по-горе за дървостойките с голяма гъстота. Старите гори имат по-ниско проективно покритие и изглеждат по-тъмни върху спътниковите изображения тъй като взаимното засенчване на короните в тях е значително.

Корелационните коефициенти получени с различните сензори следват обща тенденция, но се различават по абсолютна стойност. На Фигура 16 четирите спътникови сензора са сравнени на базата на максималния корелационен коефициент, който е получен за всеки от структурните показатели. Като цяло сензорите с по-ниска пространствена разделителна способност – SPOT4 HRVIR и ASTER имат и по-ниски корелационни коефициенти.



Фигура 16. Абсолютна стойност на максималния корелационен коефициент на Пирсън (r) за всяка двойка сензор-структурен показател. Показаните коефициенти са за спътниковите данни без топографска корекция.

4.1.2 Взаимовръзка с текстурните признаци на изображение от QuickBird

Проективното покритие и показателите характеризиращи размерите на дърветата са най-силно корелирани с текстурния признак *хомогенност* изчислен по канал В3 (r от $-0,63$ до $-0,78$). Обемът и биомасата са най-

силно свързани с *хомогенността* изчислена по канал В2 (r съответно -0,54 и -0,55). Гъстотата също има максимална корелация с *хомогенността*, но изчислена по канал В4 ($r=0,79$). Текстуричните признаци на панхроматичното изображение с малки изключения не показват статистически значима корелация със структурните показатели. Най-силно корелирани с текстуричните признаци са гъстотата, $D_{\text{дом.}}$ и $H_{\text{дом.}}$, за които корелационните коефициенти са над $|0,70|$. Не добра корелация съществува с обема и биомасата, съответно -0,54 и -0,55. Корелацията на кръговата площ с текстуричните признаци не е статистически значима ($p>0,05$).

4.1.3 Взаимовръзка с ъгловия индекс NDHD

Индексът NDHD е сравнително слабо корелиран със структурните показатели, като максималната абсолютна стойност на корелационния коефициент е от 0,31(0,31) за проективното покритие до 0,67(0,66) за обхвата на диаметрите. Въпреки че са ниски, корелационните коефициенти са статистически значими ($p<0,05$) за повечето показатели, като изключение са единствено проективното покритие, кръговата площ и гъстотата. По-силна е корелацията на структурните показатели с индекса NDHD, когато той е изчислен чрез зеления (XS1) или близкия инфрачервен канал (XS3) на SPOT4. Не се наблюдава разлика в силата на корелацията получена използвайки топографски коригираните и некоригираните изображения. По-високите стойности на индекса са индикация за по-голяма разлика в отражението от склопа при различен ъгъл на наблюдение. Резултатите показват, че тази разлика е по-значителна в горите с по-висока биомаса и обем, както и в тези с по-голяма вариабилност и по-голям максимален размер на дърветата.

4.2 Характеризиране на взаимовръзките на структурните и спътниковите променливи на ниво подотдел

Изследваните показатели на ниво подотдел са среден диаметър, средна височина, обем и надземна биомаса. Въпреки че не представлява структурен показател възрастта е важен фактор за формирането на структурата на гората и поради това е разгледан в настоящия раздел. Възрастта, средната височина и средният диаметър, както и повечето СП на ниво подотдел имат разпределение отклоняващо се от нормалното, поради което за корелационния анализ е използван коефициентът на Спирмън (r_s).

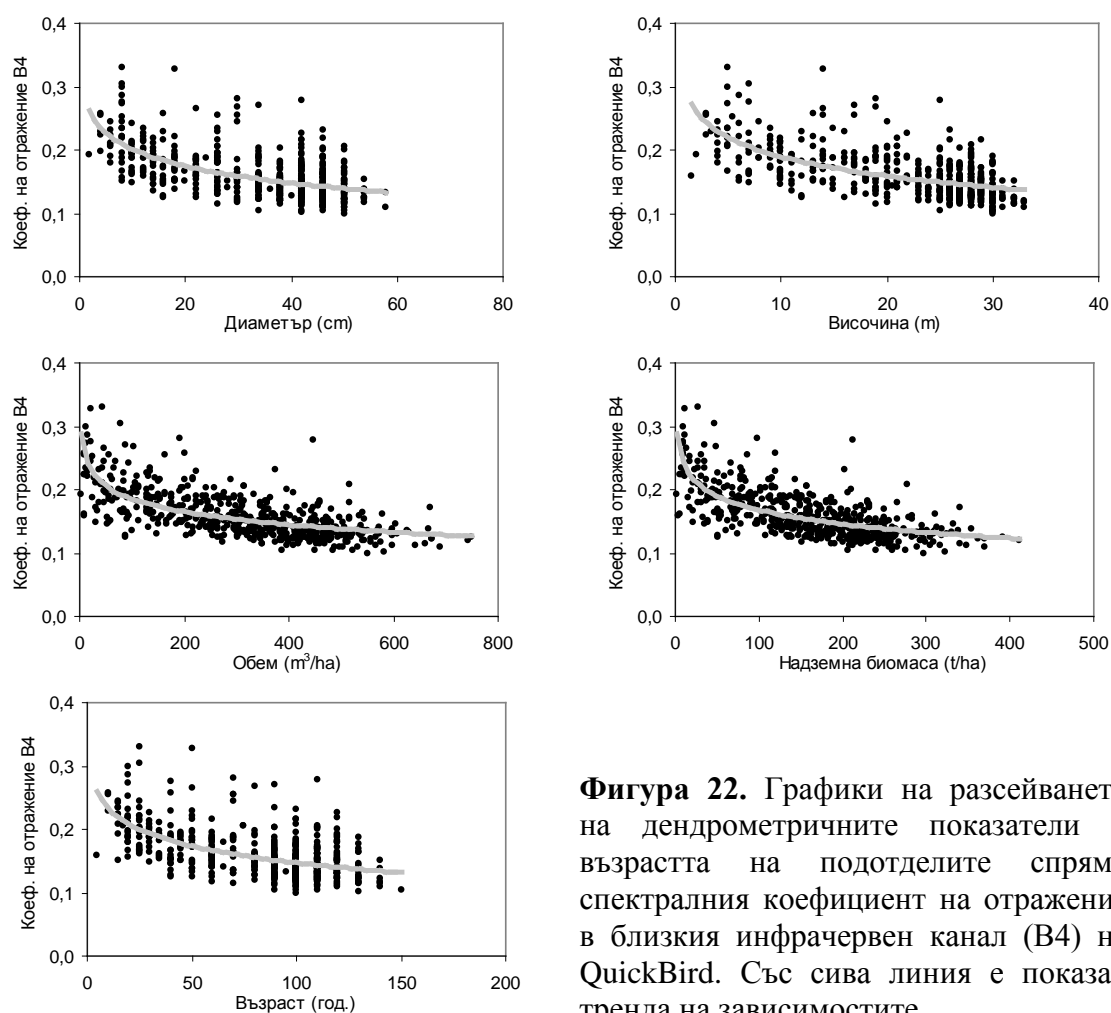
4.2.1 Взаимовръзка със спектралните канали и вегетационни индекси

И при четирите спътникови сензора най-висока корелация със структурните показатели и с възрастта имат съответните близки инфрачервени канали. Коефициентът на корелация r_s между СКО в каналите от близката инфрачервена зона и петте показателя на подотделите варира от -0,43 до -0,59 при SPOT4, от -0,49 до -0,61 при ASTER, от -0,51 до -0,67 при SPOT5 и от -0,53 до -0,70 при QuickBird ($p<0,001$). Корелационните коефициенти са малко по-ниски с яркостните

стойности на топографски коригираните изображения. Значимостта на тази разлика е тествана чрез данните от SPOT5, като резултатите показват, че различията в r получен чрез топографски коригираното и некоригираното изображение не са статистически значими при 95% ниво на доверие.

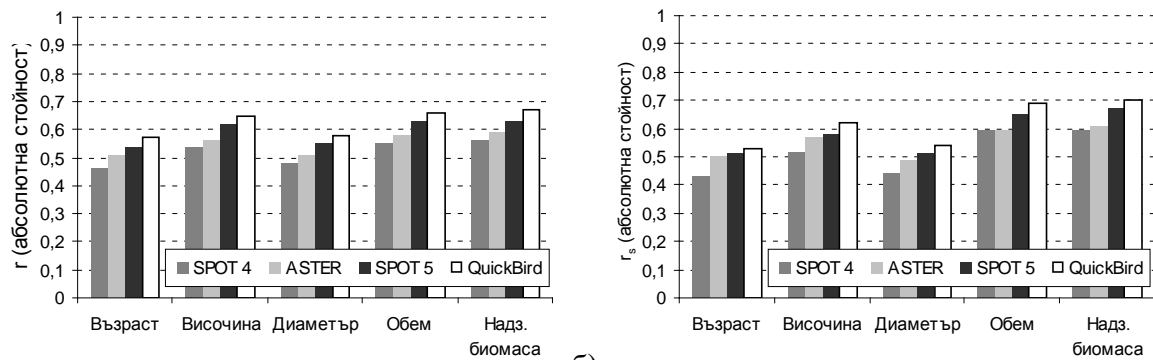
Корелациите с обема, надземната биомаса и средната височина са високи отколкото със средния диаметър и възрастта. Като цяло обаче наблюдаваните корелационни зависимости на ниво подотдел са доста по-слаби от тези получени при пробните площадки.

Както при пробните площадки височината, диаметърът, обемът и надземната биомаса са отрицателно свързани със стойностите на спектралните канали и вегетационните индекси. Отрицателно свързана с тях е и възрастта. Връзките между петте показателя и близкия инфрачервен канал на QuickBird, с който те имат най-висока корелация са показани графично на Фигура 22 в дисертацията.



Фигура 22. Графики на разсейването на дендрометричните показатели и възрастта на подотделите спрямо спектралния коефициент на отражение в близкия инфрачервен канал (B4) на QuickBird. Със сива линия е показан тренда на зависимостите.

Спътниковите сензори се подреждат в следната последователност според нарастването на корелацията на данните от близкия инфрачервен канал с изследваните характеристики на подотделите: SPOT4, ASTER, SPOT5 и QuickBird, което е илюстрирано на Фигура 23 в дисертацията. Тази подредба съответства на нарастването на тяхната ПРС.



а) **Фигура 23.** Сравнение на спътниковите сензори според силата на връзката между данните от техните близки инфрачервени канали (без топографска корекция) и показателите на структурата от подотделите на базата на корелационния коефициент на Пирсън (а) и Спирмън (б).

4.2.2 Взаимовръзка с текстурните признаци на изображение от QuickBird

Взаимовръзките на текстурните признаци на многоканалното и панхроматичното изображение от QuickBird със структурните показатели на подотделите се различават значително от тези които се наблюдават при пробните площадки. Петте показателя на подотделите са по-силно корелирани с текстурните признаци на панхроматичното изображение отколкото с тези на многоканалното изображение. Това не съответства на резултатите получени от пробните площадки, при които текстурните признаци на панхроматичното изображение в повечето случаи не са значимо корелирани със структурните показатели. Трябва да се отбележи също така, че докато при пробните площадки обемът, биомасата, $D_{\text{дом}}$ и $H_{\text{дом}}$ са положително корелирани с дисперсията, контраста и различието, при подотделите връзката между тези променливи в случаите когато е статистически значима е отрицателна по знак. Вероятно причината за разликата в знака на зависимостите и в относителното представяне на многоканалното и панхроматичното изображение е свързана с различната територия от която се осредняват стойностите на текстурните признаци при анализа на ниво пробна площадка и на ниво подотдел. Максималните по стойност корелации ($r=0,46\div 0,50$ при $p<0,001$; $r_s=0,50\div 0,56$) се наблюдават с хомогенността на панхроматичното изображение.

4.2.3 Взаимовръзка с ъгловия индекс NDHD

Корелацията на индекса NDHD с обема, биомасата, диаметъра и височината на подотделите е по-слаба отколкото със същите показатели от пробните площадки. Стойностите на корелационния коефициент на Спирмън (r_s) са от 0,34(0,38) за възрастта, до 0,48(0,54) за биомасата. Зависимостите са положителни както при пробните площадки, но максималните корелации са с NDHD изчислен по червения (XS2) и късовълновия инфрачервен канал (SWIR), а не по зеления канал (XS1), както е при пробните площадки. Корелационните коефициенти са малко по-високи за спътниковите данни без топографска корекция.

4.3 Оценяване на структурните показатели чрез спътниковите данни

Като основа за оценяването на структурните показатели в това изследване е възприета спектралната информация съдържаща се в спътниковите изображения и на нейна база са разработени еднофакторни регресионни модели. Текстурните признаци и индексът NDHD са използвани като допълнителни предиктори в многофакторните регресионни модели, за да се провери дали допринасят за по-точното оценяване на структурните показатели. Корелационният анализ показва, че проективното покритие, $D_{\text{дом.}}$, $D_{\text{ср.}}$ и $H_{\text{дом.}}$ измерени в пробните площадки са максимално корелирани с близкия инфрачервен канал или NDVI от QuickBird. За всички останали показатели максималната корелация е с близкия инфрачервен канал от SPOT5. Тъй като настоящото изследване е насочено към комплексното оценяване на структурата на гората чрез колкото се може повече показатели от значение е най-вече общото представяне на отделните сензори. От практическа гледна точка използването на изображения от различни сензори за оценяването на различните показатели би било по-малко удачно. Поради това се наложи за разработването на регресионните модели по данните от пробните площадки да бъде избран единият от тях, а именно SPOT5.

По данните от подотделите са съставени регресионни модели само за обема и надземната биомаса, тъй като единствено с тях се наблюдават относително добри зависимости. Максимално корелираната с обема и биомасата на подотделите спектрална променлива е близкият инфрачервен канал на QuickBird, следвана от близкия инфрачервен канал на SPOT5. Разликите между корелационните коефициенти за тези два сензора са малки и не са статистически значими. С цел да има сравнимост с моделите за обема и надземната биомаса разработени по данните от пробните площадки при подотделите също са използвани данните от SPOT5.

В Таблица 21 са представени еднофакторните и многофакторните регресионни модели съставени по данните от пробните площадки. Показани са само тези многофакторни модели, които имат по-висок нормиран R^2 в сравнение със съответния еднофакторен модел и чиито регресионни коефициенти (b) са значими при ниво 0,05. Еднофакторните регресионни модели на тринадесетте структурни показателя се различават значително по стойностите на нормирания R^2 . Най-голяма способност да бъдат оценявани чрез спектралните данни от SPOT5 имат $H_{\text{обхв.}}$, $D_{\text{с.о.}}$, $D_{\text{дом.}}$, биомасата, обемът, $D_{\text{обхв.}}$ и $H_{\text{дом.}}$, за които R^2 е между 0,72 и 0,79. Най-малка способност да бъдат оценявани чрез спектралните данни от SPOT5 имат кръговата площ ($R^2=0,36$) и проективното покритие ($R^2=0,40$), а $D_{\text{ср.}}$, гъстотата, $H_{\text{ср.}}$ и $H_{\text{с.о.}}$ имат междинно положение с R^2 между 0,59 и 0,68. Всички регресионни уравнения са значими ($F=18,6\div 118,1$; $p<0,001$). Отделните регресионни коефициенти също са статистически значими с изключение на отреза (b_0) на модела за проективното покритие ($p=0,183$). Относителната средноквадратична грешка (RMSEr) на еднофакторните

моделите оценена чрез кръстосана валидация е между 14,3% и 64,2%. Средно аритметичната стойност на остатъците (Bias) не се различава значимо от нула ($p=0,55\div 0,98$), което показва, че оценките направени чрез моделите са статистически неизкривени.

Добавянето на текстурна променлива като втори предиктор в моделите води до подобряването им при почти всички структурни показатели, ако се съди по нарастването на нормирания R^2 . Изключение са само обемът, биомасата и кръговата площ. Добавянето на индекса NDHD като втори предиктор води до повишаване на нормирания R^2 единствено при модела за $D_{\text{обхв.}}$. Всички многофакторни уравнения също са значими, което се показва от статистически значимите стойности на F . Регресионните коефициенти при всички модели са значими при ниво 0,05, а в повечето случаи и при ниво 0,001. RMSEr на моделите със спектрална и текстурна променлива е между 12,8% и 51,9%. Средният размер на остатъците при всички модели е близък до нула.

В Таблица 22 са представени еднофакторните регресионни модели съставени по данните от лесоустройствените подотдели. Многофакторните модели с участието на индекса NDHD имат по-висока средноквадратична и относителна грешка, а тези с участието на текстурна променлива водят до незначително подобрение (под 1 %) в сравнение с еднофакторните модели. Моделите са валидирани чрез данните от 30% от подотделите избрани на случаен принцип, като резултатите са представени в Таблица 23.

Най-точен модел за оценка на **обема** на дървесината чрез данните от пробните площадки е съставен с помощта на близкия инфрачервен канал (XS3) на SPOT5. Средноквадратичната грешка на модела е $152,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, а относителната грешка е 33,0% (Таблица 21). Моделът разработен чрез данните от подотделите има по-ниска средноквадратична грешка в сравнение с модела от пробните площадки – $136,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, но относителната му грешка е по-висока – 45,4% (Таблица 23). От графичното сравнение на оценените и действителните стойности на обема (Фигури 24 и 25) се вижда, че по-добро съответствие се постига с модела от пробните площадки. Освен това за модела от подотделите е по-характерно недооценяването на високите стойности и надценяването на ниските стойности на обема. Получените резултати са сходни с тези докладвани от други автори използвали регресионния метод или kNN (Таблица 24). Например Muukkonen и Heiskanen (2005) получават модел който предвижда обема с по-ниска абсолютна грешка – $88,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, но с приблизително същата относителна грешка (44,8%) в сравнение с модела от подотделите в настоящото изследване.

Подобно на моделите за обема при тези за **надземната биомаса** също

Таблица 21. Регресионни модели за тринадесетте дендрометрични показатели съставени по данни от пробните площадки.

№	Нормиран R ²	SEE	MSE	F	F sig.	b	b sig.	Толеранс	VIF	RMSE	RMSE _r	Bias	Bias _r	Bias sig.
1	log(Обем)= b ₀ +b ₁ *XS3	0,761	0,177	0,031240	99,9	0,000	b ₀ =4,045477 b ₁ =-0,029305	0,000 0,000		152,4	33,0	9,9	2,1	0,719
2	log(Биомаса)= b ₀ +b ₁ *XS3	0,752	0,183	0,033357	95,1	0,000	b ₀ =3,725978 b ₁ =-0,029541	0,000 0,000		70,2	32,4	4,6	2,1	0,717
3	log(Кръгова площ)= b ₀ +b ₁ *SWIR	0,362	0,117	0,013646	18,6	0,000	b ₀ =2,209182 b ₁ =-0,105081	0,000 0,000		13,9	28,6	0,8	1,7	0,739
4	Гъстота= b ₀ +b ₁ *XS3	0,620	798,9	638192,2	41,78	0,000	b ₀ =-4094,1347 b ₁ =111,3966	0,000 0,000		849,1	64,2	11,4	0,9	0,947
5	Гъстота=b ₀ +b ₁ *XS3+ b ₂ *H _{B3}	0,771	619,7	384022,4	43,16	0,000	b ₀ =-5082,5115 b ₁ =83,4559 b ₂ =4839,5128	0,000 0,000 0,000	0,794 1,259 0,794 1,259	686,4	51,9	-0,5	-0,04	0,997
6	Пр.покритие= b ₀ +b ₁ *SI	0,397	10,989	120,76251	21,4	0,000	b ₀ =17,987350 b ₁ =6,110964	0,183 0,000		11,2	14,3	-0,04	-0,1	0,984
7	Пр.покритие= b ₀ +b ₁ *SI + b ₂ *V _{B4}	0,544	9,330	87,058359	18,9	0,000	b ₀ =31,155219 b ₁ =5,578682 b ₂ =-0,112857	0,014 0,000 0,004	0,988 1,012 0,988 1,012	10,0	12,8	-0,1	-0,1	0,964
8	log(D дом.)= b ₀ +b ₁ *XS3	0,750	0,149	0,022289	94,1	0,000	b ₀ =2,714455 b ₁ =-0,024015	0,000 0,000		10,0	27,0	0,4	1,0	0,841
9	log(D дом.)=b ₀ +b ₁ *XS3+ b ₂ *log(V _{B4})	0,905	0,085	0,007246	143,3	0,000	b ₀ =1,904876 b ₁ =-0,019862 b ₂ =0,341753	0,000 0,000 0,000	0,897 1,114 0,897 1,114	7,4	19,4	0,01	0,0	0,992
10	H дом= b ₀ +b ₁ *log(XS3)	0,791	4,272	18,253399	118,1	0,000	b ₀ =182,992318 b ₁ =-95,088953	0,000 0,000		4,4	20,4	0,02	0,1	0,980
11	H дом=b ₀ +b ₁ *log(XS3)+ b ₂ *log(V _{B4})	0,886	3,032	9,196179	117,9	0,000	b ₀ =152,473774 b ₁ =-85,784730 b ₂ =8,342871	0,000 0,000 0,000	0,895 1,117 0,895 1,117	3,1	14,2	0,02	0,1	0,977

Означения в моделите: XS3, SWIR и SI са близкият инфрачервен канал, късовълновият инфрачервен канал и структурният индекс от SPOT5. Текстурните признаци са означени с главни латински букви – V (дисперсия), H (хомогенност), C (контраст) и D (различие) и долен индекс за спектралния канал на QuickBird от който са получени. NDHD_{SWIR} - ъглов индекс изчислен по късовълновия инфрачервен канал на SPOT4. SEE – стандартна грешка на оценката. MSE – среден квадрат на остатъците. При моделите с логаритмувана зависима променлива SEE, MSE и b са в трансформирани единици. RMSE и Bias са в оригиналните мерни единици (виж Таблица 5).

Таблица 21. Продължение

№	Нормира н R ²	SEE	MSE	F	F sig. b	b sig.	Толеранс	VIF	RMSE	RMSE _r	Bias	Bias _r	Bias sig.	
12	log(D ср.)= b ₀ +b ₁ *XS3	0,594	0,210	0,044162	46,4	0,000	b ₀ =2,476057 b ₁ =-0,023727	0,000	11,2	48,3	0,8	3,4	0,695	
13	log(D ср.)= b ₀ +b ₁ *XS3+ b ₂ *log(V _{B2})	0,691	0,170	0,028936	34, 6	0,000	b ₀ =2,109607 b ₁ =-0,018749 b ₂ =0,343004	0,000 0,000 0,000	0,900 1,111 0,900 1,111	9,2	38,8	0,7	2,7	0,702
14	log(H ср.)= b ₀ +b ₁ *XS3	0,668	0,154	0,023556	62,9	0,000	b ₀ =2,170631 b ₁ =-0,020194	0,000 0,000	5,3	32,9	0,3	1,7	0,774	
15	log(H ср.)= b ₀ +b ₁ *XS3+ b ₂ *log(V _{B2})	0,695	0,136	0,018397	35,1	0,000	b ₀ =1,952580 b ₁ =-0,017276 b ₂ =0,209550	0,000 0,000 0,003	0,900 1,111 0,900 1,111	4,9	29,8	0,2	1,4	0,793
16	log(D обхв.)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)	0,789	0,130	0,016793	116,6	0,000	b ₀ =4,389571 b ₁ =-2,866405	0,000 0,000	0,11	27,5	0,01	2,1	0,671	
17	log(D обхв.)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)+ b ₂ *log(D _{B4})	0,857	0,099	0,009847	91,2	0,000	b ₀ =3,051118 b ₁ =-2,362589 b ₂ =0,506922	0,000 0,000 0,000	0,836 1,196 0,836 1,196	0,10	24,7	0,01	1,7	0,716
18	log(D обхв.)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)+ b ₂ *NDHD _{SWIR}	0,812	0,122	0,014898	68,2	0,000	b ₀ =5,343901 b ₁ =-3,308169 b ₂ =-1,192308	0,000 0,000 0,036	0,607 1,648 0,607 1,648	0,12	30,3	0,01	2,1	0,704
19	log(H обхв.)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)	0,724	0,123	0,015232	82,4	0,000	b ₀ =3,574996 b ₁ =-2,293835	0,000 0,000	0,13	24,2	0,01	1,7	0,690	
20	log(H обхв.)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)+ b ₂ *log(C _{B4})	0,808	0,100	0,010018	64,1	0,000	b ₀ =2,701423 b ₁ =-2,054044 b ₂ =0,219362	0,000 0,000 0,000	0,874 1,144 0,874 1,144	0,12	21,2	0,01	1,0	0,788
21	log(D с.о.)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)	0,736	0,180	0,032235	87,5	0,000	b ₀ =6,702503 b ₁ =-3,439812	0,000 0,000	3,66	38,8	0,29	3,1	0,660	
22	log(D с.о.)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)+ b ₂ *log(D _{B4})	0,848	0,126	0,015989	84,8	0,000	b ₀ =4,626567 b ₁ =-2,643714 b ₂ =0,761500	0,000 0,000 0,000	0,836 1,196 0,836 1,196	2,92	30,2	0,23	2,3	0,675
23	log(H с.о.)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)	0,683	0,201	0,040538	67,9	0,000	b ₀ =6,359614 b ₁ =-3,397979	0,000 0,000	2,2	42,9	0,24	4,6	0,551	
24	log(H с.о.)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)+ b ₂ *log(C _{B4})	0,811	0,148	0,021800	65,4	0,000	b ₀ =4,341016 b ₁ =-2,732775 b ₂ =0,421491	0,000 0,000 0,000	0,874 1,144 0,874 1,144	1,8	34,8	0,18	3,4	0,593

Таблица 22. Регресионни модели за оценяване на обем и биомаса чрез близкия инфрачервен канал (XS3) на SPOT5 съставени по данни от лесоустройствените подотдели.

№	Нормиран R ²	SEE	MSE	F	F sig.	b	b sig.	
25	log(Обем)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)	0,423	0,280	0,078498	406,4	0,000	b ₀ =8,798665 b ₁ =-3,836723	0,000 0,000
26	log(Биомаса)= b ₀ +b ₁ *log(XS3)	0,428	0,260	0,067530	415,0	0,000	b ₀ =8,127474 b ₁ =-3,596443	0,000 0,000

не се наблюдава подобрене с добавянето на текстурна информация и индекса NDHD. Запазва се и тенденцията средно квадратичната грешка да е по-ниска при подотделите – 69,0 t ha⁻¹ срещу 70,2 t ha⁻¹, а относителната грешка да е по-ниска при пробните площадки – 32,4% срещу 43,5% (Таблицы 21 и 23). За сравнение Muukkonen и Heiskanen (2005) получават абсолютна грешка на надземната дървесна биомаса от 48,2 t ha⁻¹ и относителната грешка от 39,5%. Отново моделът от пробните площадки дава оценки, които съответстват по-добре на реално измерената надземна биомаса (Фигури 24 и 25).

Късовълновият инфрачервен канал (SWIR) на SPOT5 обясняват едва 36% от измененията в стойностите на **кръговата площ**. Подобна слаба връзка (R²=0,35) установяват и Kayitakire *et al.* (2006), но използвайки текстурна информация от спътника IKONOS. Използвайки данни от SPOT Нууррă *et al.* (2000) успяват да оценят кръговата площ с грешка от 7,6 m² ha⁻¹ (42%), която е сравнима с тази в настоящото изследване - 13,9 m² ha⁻¹ (29%). Като цяло разработеният модел не е надежден, което се вижда от лошото съответствие на оценените и действителните стойности на кръговата площ (Фигура 24).

Моделите за **гъстотата** са разработени въз основа на данните само от 26 пробни площадки, като са премахнати тези с гъстота над 5000 бр./ha., тъй като техните стойности силно се отклоняват от преобладаващата част от данните и не позволяват съставянето на надежден линеен модел. Премахването на площадките с най-висока гъстота води до понижаване на средноквадратичната и относителната грешка, които с използването на текстурна променлива са съответно 686 бр./ha и 52%. Въпреки това моделаът остава твърде неточен за да има практическо приложение. Използвайки само текстурния признак *контраст* изчислен чрез изображение IKONOS (PPC 1 m) Kayitakire *et al.* (2006) постигат значително по-добър резултат (RMSE=276 бр./ha и относителна грешка 29%). В изследвания район на Рила планина преобладават естествените, често сложни по строеж гори, което може да обясни по-лошите резултати в настоящото изследване.

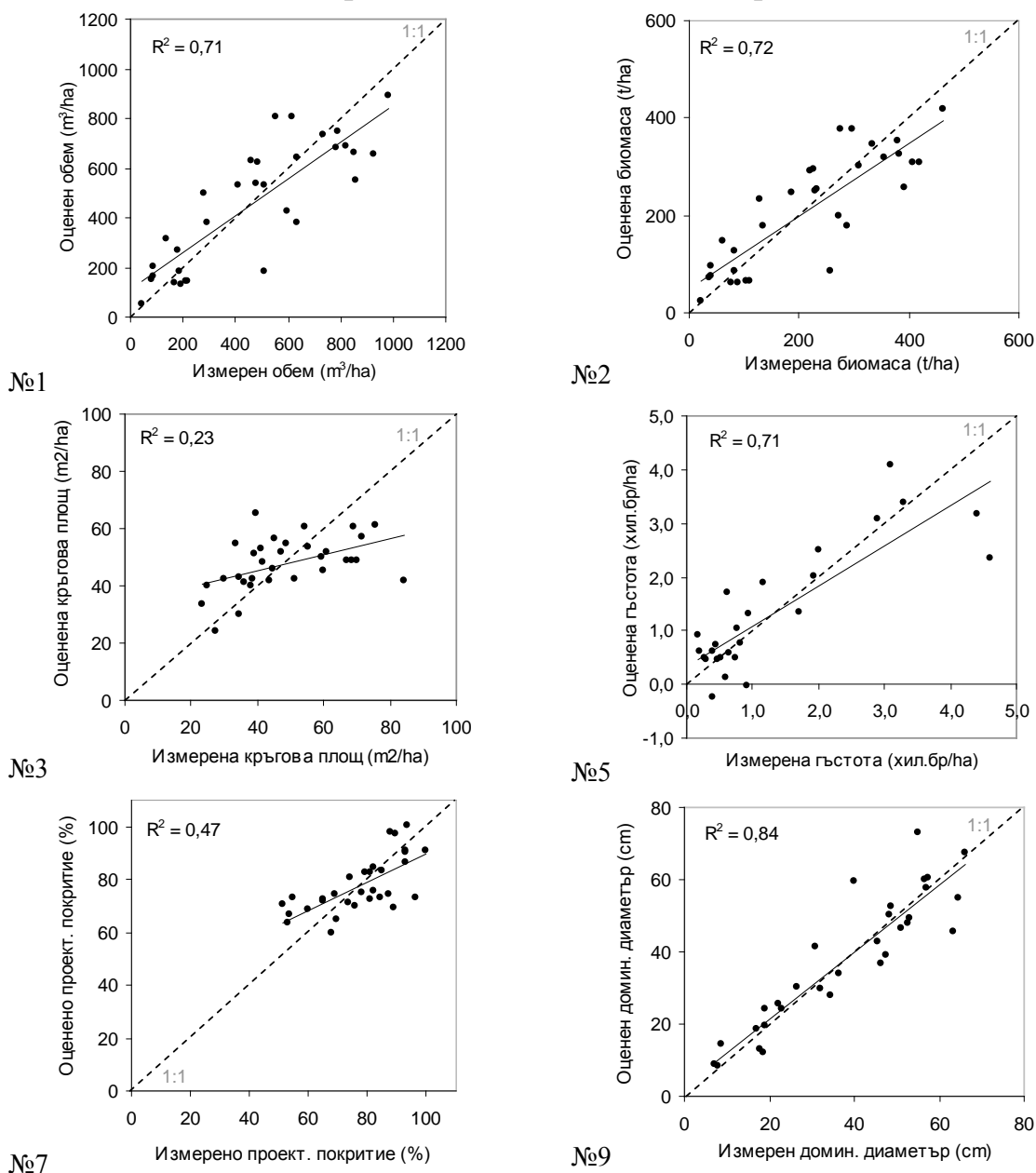
Текстурният признак *дисперсия* изчислен по близкия инфрачервен канал (B4) на QuickBird значително подобрява модала за оценка на **проективното покритие**. Средната квадратична грешка на

Таблица 23. Резултати от валидацията на регресионните модели за обем и биомаса съставени по данните от лесоустройствените подотдели.

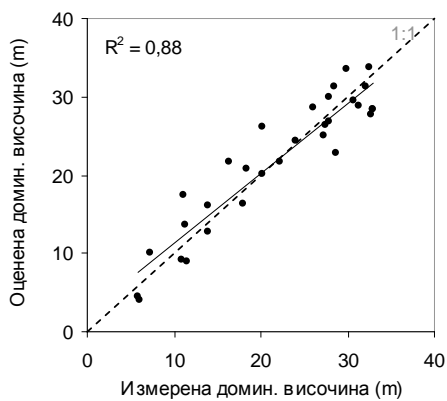
	RMSE	RMSE _r	Bias	Bias _r	Bias sig.
Обем (№25)	136,5	45,4	2,2	0,7	0,809
Биомаса(№26)	69,0	43,5	1,9	1,2	0,672

многофакторния модел е 10,0% (процент проективно покритие). За сравнение Hall *et al.* (2006) моделират проективното покритие с RMSE от 12%, а Cohen *et al.* (2003) с грешка 10,4%. От Фигура 24 се вижда, че многофакторният модел дава завишени оценки за площадките с проективно покритие под 60% и като цяло съответствието с наземните данни не е добро. Тъй като регресионните модели не позволяват екстраполация извън обхвата на емпиричните данни чрез които са съставени, уравнението предложено тук е приложимо само при горски територии с проективно покритие над 50%.

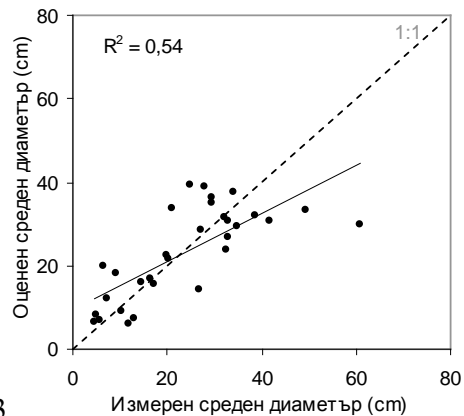
Доминиращият диаметър и **доминиращата височина** са два от показателите при които включването на текстурната информация от QuickBird има най-силен ефект по отношение на подобряването на моделите.



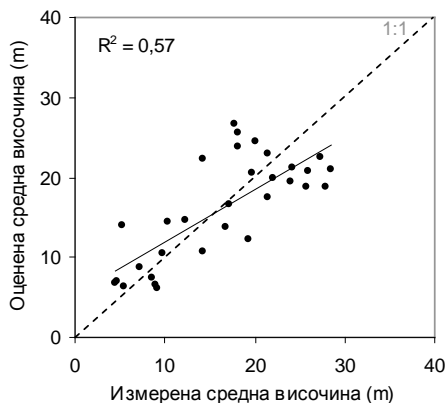
Фигура 24. Графики на съответствието между наземните измервания и оценките на показателите на структурата на гората чрез регресионните уравнения съставени по данни от пробните площадки. За всеки показател е показан резултатът за модела с най-ниска относителна грешка, като номера до всяка графика отговаря на номерацията на моделите в Таблица 21.



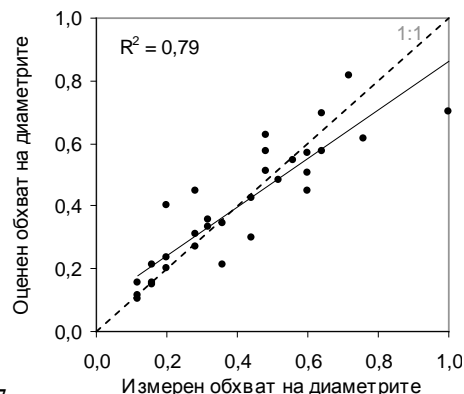
№11



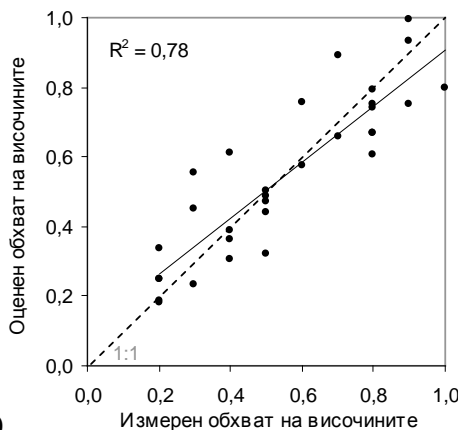
№13



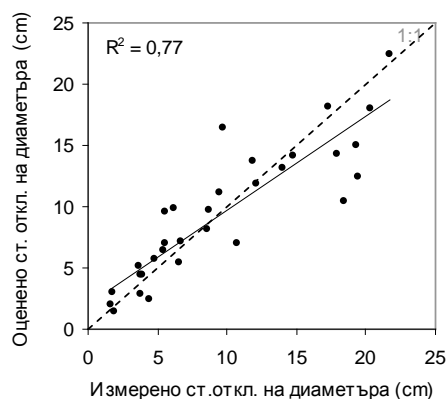
№15



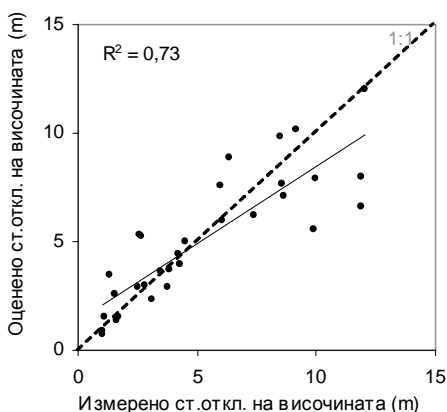
№17



№20



№22



№24

Фигура 24. Продължение

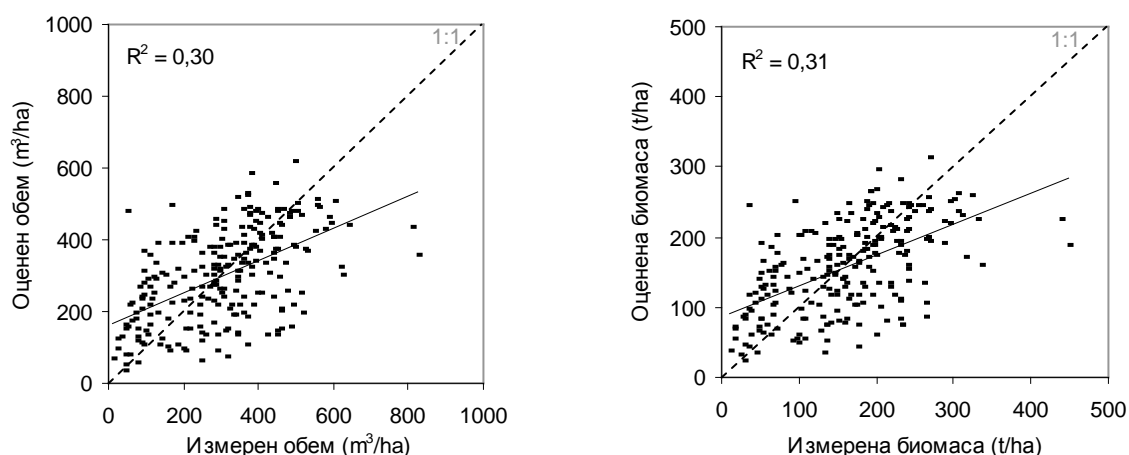
Стойностите на R^2 нарастват от 0,75 на 0,90 за $D_{\text{дом.}}$ и от 0,79 на 0,89 за $H_{\text{дом.}}$ в резултат от добавянето на втора независима променлива (Таблица 21). Резултатите от кръстосаната валидация показват значително понижаване на стойностите на абсолютната и относителната грешка при многофакторните модели. Чрез тях $D_{\text{дом.}}$ може да се оцени със средна

квадратична грешка 7,4 cm (19,4%), а $H_{\text{дом}}$ съответно с 3,1 m (14,2%). Тези резултати са само малко по-слаби от получените от Kayitakire *et al.* (2006), където грешката при оценката на височината е 2,2 m (10%). И двата модела показват добро съответствие на оценките с наземните измервания (Фиг. 24).

За разлика от предходните два показателя, апроксимацията на **средната височина и средния диаметър** чрез регресионните модели е по-неточна, което се вижда от по-ниските стойности на R^2 . Причината е, че средната височина и диаметър са зависими от дърветата в по-ниските етажи. Тези дървета не оказват влияние върху характера на горната повърхност на склопа, който наблюдаваме чрез оптичните спътникови сензори. Този резултат е в съответствие с Cohen и Spies (1992), които установяват, че спътниковите данни са по-слабо свързани със средния диаметър и средната височина в сравнение с диаметъра и височината на дърветата формиращи горната част на склопа. Относителната грешка на еднофакторния модел за $D_{\text{ср}}$ е 48,3%, а за $H_{\text{ср}}$ – 32,9%. Текстурният признак *дисперсия* изчислен по зеления канал (B2) на QuickBird подобрява и двата модела, като подобрението е по-значително за $D_{\text{ср}}$, чиято относителна грешка при многофакторния модел намалява с почти десет процента. Въпреки това оценките на средния диаметър са чувствително занижени в площадките, където той надвишава 40 cm (Фигура 24). Точността на оценката на средната височина чрез предложения модел е малко по-добра от тази, която получават Нууррă *et al.* (2000) – 5,8 m (36%).

Обхватът на диаметрите е сравнително точно оценен чрез близкия инфрачервен канал (XS3) на SPOT5 и чрез комбинацията му с *различието* на канал B4 на QuickBird – съответно 27,5% и 24,7% относителна грешка (Таблица 21). Сравнително добър резултат дават и двата модела за оценка на **обхвата на височините** – 24,2% и 21,2% относителна грешка съответно за еднофакторния и многофакторния модел използващ текстурна информация (Таблица 21).

Данните в Таблица 21 показват, че **стандартните отклонения** на диаметърра и на височината са показатели, които е сравнително по-трудно



№25

№26

Фигура 25. Графики на съответствието между наземните измервания и оценките на обема и биомасата чрез регресионните уравнения съставени по данни от подотделите и SPOT5. Моделите са представени в Таблица 22.

да се оценят чрез използвания метод. Грешките на еднофакторните модели са значителни – съответно 38,8% и 42,9% и не спадат под 30% дори след добавянето на текстурна променлива.

4.3.1 Анализ на регресионните модели и тяхната точност

Най-добър резултат при регресионния анализ е получен за показателя доминираща височина, тъй като моделите, особено многофакторният се характеризират с висок R^2 и ниска относителна грешка (Таблица 24). Добрите възможности за оценка на този показател чрез спътниковите данни са демонстрирани и от други автори (Jakubauskas, 1996; Kayitakire *et al.*, 2006). На другия полюс са гъстотата и средният диаметър, чиито оценки в настоящото изследване са твърде неточни. Към тях може да се добави и кръговата площ, поради много ниската стойност на R^2 .

Обемът и биомасата са едни от показателите представляващи най-голям интерес от гледна точка на управлението на горските ресурси. Таблица 25 обобщава постигнатата точност на оценките на двата показателя получена от различни автори и дава възможност да се оцени мястото на разработените в настоящото изследване регресионни модели. Моделите за обема и биомасата в нашето изследване имат по-високи абсолютни стойности на грешката в сравнение с предходните изследвания. В същото време относителните грешки в някои случаи са по-ниски особено за моделите съставени чрез данните от пробните площадки. Относителната грешка е мярка за големината на абсолютната грешка спрямо средната стойност на показателя в изследвания район. Тя показва практическото значение на дадена абсолютна грешка от гледна точка на конкретните условия. Имайки предвид това, сравнението на моделите трябва да се базира едновременно и на двата типа грешка, както и на конкретните особености на горите. На практика, наблюдаваните високи стойности на абсолютната грешка са очаквани, тъй като е известно, че спътниковите данни имат по-малък потенциал за точно оценяване на обема и биомасата в

Таблица 24. Подреждане на дендрометричните показатели според минималната относителна грешка постигната при регресионния анализ. В светлосиво са маркирани показателите имащи ниво на грешката под 25%, а в тъмносиво тези с над 35%.

Структурен показател	Използвани независими променливи при които се получава най-ниска грешка при линейния регресионен анализ	RMSE _r (%)
Проективно покритие	Индекса SI от SPOT5 и дисперсия на канал B4 на QuickBird	12,8
Доминираща височина	Канал XS3 на SPOT5 и дисперсия на канал B4 на QuickBird	14,2
Доминиращ диаметър	Канал XS3 на SPOT5 и дисперсия на канал B4 на QuickBird	19,4
Обхват на височините	Канал XS3 на SPOT5 и контраст на канал B4 на QuickBird	21,2
Обхват на диаметрите	Канал XS3 на SPOT5 и различие на канал B4 на QuickBird	24,7
Кръгова площ	Канал SWIR на SPOT5	28,6
Средна височина	Канал XS3 на SPOT5 и дисперсия на канал B2 на QuickBird	29,8
Ст. Откл. на диаметъра	Канал XS3 на SPOT5 и различие на канал B4 на QuickBird	30,2
Биомаса	Канал XS3 на SPOT5	32,4
Обем	Канал XS3 на SPOT5	33,0
Ст. Откл. на височината	Канал XS3 на SPOT5 и контраст на канал B4 на QuickBird	34,8
Среден диаметър	Канал XS3 на SPOT5 и дисперсия на канал B2 на QuickBird	38,8
Гъстота	Канал XS3 на SPOT5 и хомогенност на канал B3 на QuickBird	51,9

Таблица 25. Грешки при оценката на обема и биомасата на иглолистни гори чрез спътникови данни според предишни изследвания. Показани са също средните стойности на обема и биомасата в използваните от авторите наземни данни, както и използваният спътников сензор.

Автори	Спътникови данни	Обем			Биомаса		
		Средно (m ³ ha ⁻¹)	RMSE (m ³ ha ⁻¹)	RMSE _r (%)	Средно (t ha ⁻¹)	RMSE (t ha ⁻¹)	RMSE _r (%)
Reese <i>et al.</i> (2003) ^c	-	187,0	-	58			
Reese <i>et al.</i> (2003) ^c	Landsat <i>ETM+</i>	181	85	33			
Mäkelä, Pekkarinen (2004) ^c	Landsat <i>TM</i>	135,8	71,3	47,6			
Нуурпää <i>et al.</i> (2000)	SPOT <i>XS</i>	156,5	78,9 ^a	50			
Ozdemir, Karnieli (2011)	WorldView-2	61,5	27,2	44,2			
Muukkonen, Heiskanen (2005)	Terra <i>ASTER</i>	93 ^b	88,5	44,8	115	48,2	39,5
Hall <i>et al.</i> (2006)	Landsat <i>ETM+</i>	194,1	70,0	36,1	114,4	37,6	32,9
Fazakas <i>et al.</i> (1999) ^c	Landsat <i>TM</i>	182,0	-	66,6	92,3	-	66,5
Lefski <i>et al.</i> (2001)	Landsat <i>TM</i>				681,5	-	47 ^a
Това изследване (подотдели)	SPOT5 <i>HRG</i>	301,1	136,5	45,4	158,5	69,0	43,5
Това изследване (площадки)	SPOT5 <i>HRG</i>	462,4	152,4	33,0	216,6	70,2	32,4

^a стойността е стандартната грешка на оценката, а не RMSE

^b цитираната стойност е от таблица 1 в Muukkonen и Heiskanen (2005), но е твърде ниска и най-вероятно става въпрос за печатна грешка

^c използваният метод е kNN; при останалите автори е използван регресионен анализ.

гори, където те са високи. Именно такива са условията в изследвания район. Все пак настоящото изследване показва, че в иглолистните гори в Рила планина спътниковите данни и емпиричният подход могат да се прилагат без да се прави компромис с относителната грешка, тоест тя се запазва на същите нива или дори е малко по-ниска от тази която се наблюдава в други типове иглолистни гори в Европа и Северна Америка.

Различните приложения на данните за структурата на гората получени чрез приложения метод може да имат различни изисквания към точността. Според НАРЕДБА № 6 от 5.02.2004 г. за устройство на горите и земите от горския фонд и на ловностопанските райони в Република България “точността на таксиране на горите с дървопроизводителни и средообразуващи функции в границите на горския фонд е 10 % за зрелите и престарели насаждения и до 15 % за останалите насаждения”. От разработените регресионни модели само тези за проективното покритие и доминиращата височина имат относителна грешка под 15%. Наистина, високата грешка на регресионните модели на ниво пиксел не отговаря на оперативните информационни нужди в горскостопанския сектор. Въпреки това информация е необходима, не само за оперативни цели, но също за планирането и за разработването на различни стратегии (Franklin, 2001). Трансформирането на непрекъснатите оценки в интервална скала може да е достатъчно за някои от тези приложения. Друга възможност е данните да се използват за получаване на осреднени оценки в рамките на по-голяма територия, например отдел или горскостопански участък. Тъй като грешките в представените модели имат случаен характер, което се показва от липсата на значимост на показателя Bias може да се предполага, че при осредняване получените стойности ще се доближават до реалните средни стойности в дадена територия.

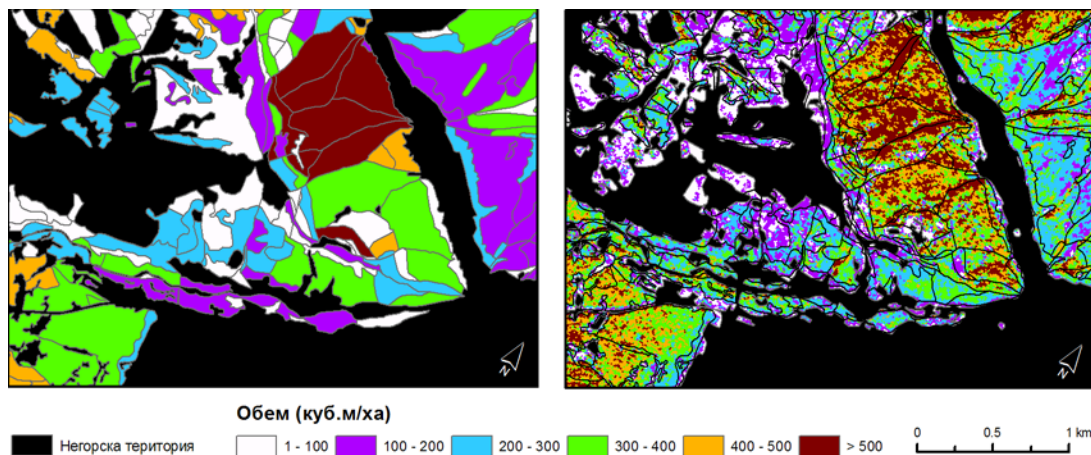
Има различни фактори, които могат да влияят на точността на разработените модели. Такива са например грешките в наземните

измервания. При дървесния обем на подотделите грешките могат да са от порядъка на 10-15% както е споменато по-горе. Конверсионните коефициенти за надземната биомаса са с добра точност – разликата в средните между наземните измервания и разчетите чрез коефициенти е 1% за белия бор и 6% за смърча по оценки на Замолодчиков и др. (2005). Все пак, трябва да се има в предвид, че тези коефициенти са разработени и тествани за територия извън България. Най-големи грешки в наземните данни от пробните площадки може да се очакват за обема, биомасата и проективното покритие. Другият основен източник на грешки е геометричната точност на данните. Неточностите в границите на подотделите се дължат на грешки в картата на месторастенията използвана за създаване на цифровия слой и достигат до няколко десетки метра. В резултат подотделите могат да бъдат нехомогенни, което влияе на отражателните характеристики особено на малките подотдели (Нууррә *et al.*, 2000). В настоящото изследване тези влияния са до голяма степен отстранени поради използването на подотдели с площ над един хектар и изключването на граничните пиксели при извличането на спътниковите променливи. Възможните изменения настъпили в подотделите между датите на наземните измервания и на спътниковите изображения са друга причина за нарастване на необяснените от модела вариации.

4.4 Картографиране на структурните показатели и приложимост на моделите

Пространственото разпределение на изследваните показатели на структурата на иглолистните гори в тестовия участък е моделирано чрез регресионните уравнения с най-ниска средна квадратична грешка за съответния показател в резултат на което са получени растерни слоеве. В повечето случаи се налага използването на данни както от SPOT5, така и от QuickBird. Затова текстурните изображения от QuickBird са агрегирани до размер на пиксела 10 m, така че да имат същата ПРС като изображението от SPOT5. Получените растерни слоеве с пространственото разпределение на структурните показатели са готови за използване в ГИС, където могат да послужат при различни анализи, както и да бъдат рекласифицирани според конкретните нужди. В Приложение 3 на дисертацията са представени примерни карти на разпределението на пет от структурните показатели, за които относителната грешка е под 25%, като за по-добра четимост е използвана интервална легенда.

На Фигура 26 е показан фрагмент от карта на обема съставена чрез спътниковите данни, заедно с карта получена чрез наземните данни от лесоустройствения проект. За нуждите на сравнението стойностите на обема са групирани в шест класа. Вижда се, че картата изготвена по спътниковото изображение отразява сравнително точно пространственото разпределение на горите с различна стойност на обема. Въпреки това в някои райони се наблюдават разлики от един клас или повече между двете

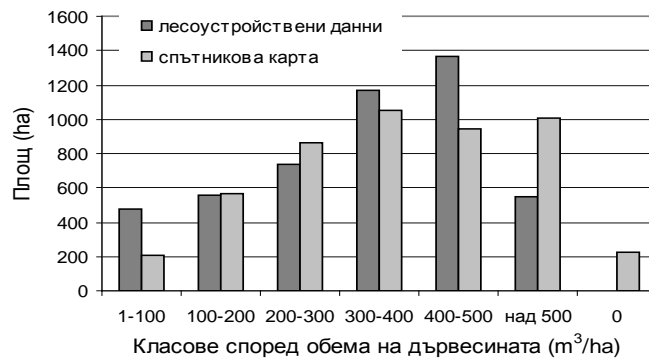


Фигура 26. Фрагмент от карти на обема на дървесината съставени чрез информацията от лесоустройствения проект (ляво) и чрез моделиране с помощта на спътникови данни (дясно). За картата в дясно е използван моделът съставен по данните от подотделите, като границите им са показани с черна линия за по-добро ориентиране.

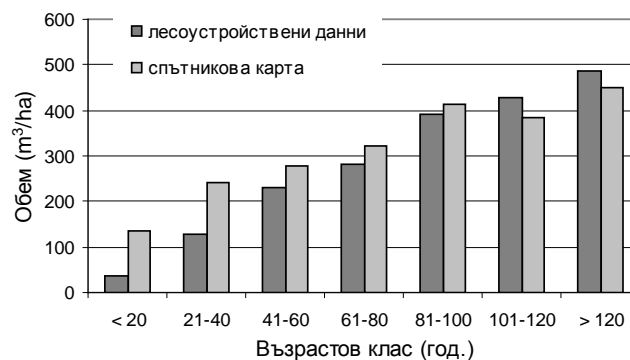
карти. Освен на грешки в оценките получени по спътниковите данни тези разлики се дължат отчасти и на нехомогенността на някои подотдели, която не е отразена в лесоустройствените данни.

Направено е сравнение на площите които заемат отделните класове в двете карти в границите на територията с налични лесоустройствени данни. Оценените чрез спътниковите изображения площи на класовете в интервала от 100 до 400 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ са много близки до тези получени чрез наземните данни (Фигура 27). По-неточни са оценките на площта за крайните класове – този от 1 до 100 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ е с двойно занижена площ, а този над 500 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ заема приблизително двойно по-голяма площ в спътниковата карта в сравнение с площта дадена в лесоустройствения проект. Причините за тези несъответствия може да са в надценяването на ниските стойности на обема от използвания модел (№25) или в нелинейния характер на връзката между отражателните характеристики и обема, както и слабата чувствителност на спътниковите данни към измененията в обема над 400 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$. Освен това около 200 ha от сравняваната територия е класифицирана като неиглолистни гори чрез спътниковите данни, тоест дървесния обем при нея е нула (Фигура 27). Друг подход е сравнението да се извърши в рамките на отделни групи от подотдели. На Фигура 28 са представени средните обеми според двата източника по групи подотдели от един клас на възраст. Знаково-ранговият тест на Уилкоксон ($Z=-1,352$; $p=0,176$) не показва значима разлика между оценките получени по спътниковите данни и тези от лесоустройствения проект.

В рамките на същата територия (4861 ha) беше изчислен общият обем на дървесината на базата на двете карти. Според лесоустройствените данни тя възлиза на 1,648 млн. m^3 , а според спътниковата карта на 1,751 млн. m^3 . Сравнително малката разлика (6,2%) показва, че картата съставена по спътникови данни може да се използва за разчети в рамките на по-големи територии, като например горскостопански участъци.



Фигура 27. Сравнение на площта на класовете гори според обема, оценена чрез данните от лесоустройствения проект и съставената по спътникови данни карта.



Фигура 28. Сравнение на средната стойност на обема за отделните класове на възраст получена чрез данните от лесоустройствения проект и съставената по спътникови данни карта.

Приложението на разработените регресионни модели за картографиране на разглежданите тук показатели в други райони със сходни по състав иглолистни гори изисква грешките да бъдат допълнително проверени и оценени чрез нови наземни данни. Прехвърлянето на регресионните коефициенти върху друго спътниково изображение зависи от фенологичните различия, атмосферните условия, различията в геометрията на сцените (зенитен и азимутен ъгъл на Слънцето и спътника) и използвания спътников сензор. Освен това спътниковите изображения трябва да са със същото ниво на предварителна обработка – теренна корекция на яркостните стойности.

5 Заключение и перспективи

Настоящото изследване разкрива някои от особеностите на взаимовръзките между данните от спътникови многоканални сензори с ПРС от 0,6 до 20 m и структурата на иглолистни гори в Рила планина и прави опит да ги използва за оценяване и картографиране на определени дендрометрични показатели. Основните резултати от извършеното изследване могат да се обобщят по следния начин:

- Изследваните корелационни зависимости на ниво пробна площадка и подотдел показват, че независимо от спътниковия сензор данните в близкия инфрачервен канал отразяват най-добре

различията в структурата на разглежданите типове иглолистни гори. Единствено проективното покритие е максимално корелирано с вегетационните индекси NDVI и SI.

- Дендрометричните показатели са в различна степен корелирани със спектралните канали и вегетационните индекси, като най-силно свързана с тях е доминиращата височина ($r=-0,80\div-0,89$), а най-слабо кръговата площ ($r=-0,35\div-0,55$).

- Гъстотата и проективното покритие са положително корелирани със спектралните канали и използваните вегетационни индекси, а при всички останали показатели корелационната зависимост е отрицателна. И двете тенденции се обясняват с измененията настъпващи в повърхността на склопа с увеличаване на възрастта на гората и по-точно с появата и увеличаването на площта на засенчените понижени участъци и прозорци. Не всички показатели, обаче са пряко свързани с хоризонталната структура на склопа и могат еднакво точно да бъдат оценени чрез описаните изменения в отражението. В най-голяма степен с тях са свързани показателите характеризиращи максималните размери на дърветата – доминираща височина и доминиращ диаметър и по-слабо други показатели като биомасата, обема и разнообразието в размерите на дърветата, които се влияят от наличието на смесени и разновъзрастни дървостои и от стопанската дейност.

- Топографската корекция не води до засилване на корелационните зависимости. Въпреки това ползата от корекцията за намаляване на ефекта на засенченост на релефа е значителна и поради това се препоръчва за съставянето на регресионни модели и карти да се използват изображения с топографска корекция.

- Величината на корелационните коефициенти на дендрометричните показатели и спектралните канали от четирите използвани спътникови сензори като цяло нараства с увеличаване на тяхната ПРС. Сензорът SPOT5 HRG е с най-високи корелации при девет от дендрометричните показатели в пробните площадки, а QuickBird при всичките показатели от подотделите. Разликите в корелациите на SPOT5 HRG и QuickBird не са статистически значими, което показва, че двата сензора имат сходен потенциал за оценяване на структурата на гората.

- От четирите текстурни признака – *дисперсия*, *различие*, *контраст* и *хомогенност* изчислени по многоканалното и панхроматичното изображение от QuickBird последният е най-силно корелиран с показателите на структурата на гората. Въпреки това закономерностите наблюдавани на ниво пробни площадки и подотдели са противоречиви и изискват допълнителни изследвания. От дендрометричните показатели на пробните площадки гъстотата, $D_{\text{дом.}}$ и $H_{\text{дом.}}$ са най-силно корелирани с текстурните признаци

($r=|0,74| \div |0,79|$), а кръговата площ не е статистически значимо корелирана с тях.

- Индексът NDHD е сравнително слабо корелиран с дендрометричните показатели. Все пак значимата корелация с повечето показатели на структурата на гората показва, че техните изменения могат да бъдат свързани с анизотропното поведение на отражението от склопа.

- Спектралните данни от SPOT5 самостоятелно или заедно с текстурни данни от QuickBird позволяват съставянето на значими регресионни модели за всички изследвани дендрометрични показатели. Въпреки това приложимостта на моделите за отделните показатели не е еднаква. Така например моделите за кръговата площ и проективното покритие имат ниски стойности на R^2 , което ги прави по-неустойчиви. Моделът за гъстотата има много голяма средноквадратична грешка, поради което този показател не може да бъде оценяван чрез приложения подход в този тип гори. Най-добро съчетание на R^2 и средноквадратична грешка се получава при моделите за доминиращата височина и диаметър и за обхвата на височините и диаметрите. Тези показатели могат най-успешно да бъдат оценени чрез регресионния метод и използваните спътникови данни. Настоящото изследване показва, че текстурната информация от QuickBird допринася съществено за подобряване на регресионните модели при повечето дендрометрични показатели, докато индексът NDHD не добавя нова информация в сравнение с използването само на спектралните канали и индекси от SPOT5.

Наблюдаваните грешки при моделите съставени с наличните в това изследване данни в повечето случаи са сходни с тези получени при предишни подобни изследвания. Като цяло трудностите в приложението на метода в района са свързани с относително високата биомаса и сложната структура на горите в Рила планина. Въпреки че за някои от изследваните показатели абсолютните грешки са по-високи от тези наблюдаване в други райони с използването на същия тип спътникови изображения, относителните грешки показват, че ефективността на регресионния метод в района се запазва в същите граници.

Използвайки комбинация от данни от SPOT5 и QuickBird грешката на оценките на три от разглежданите показатели (проективно покритие, доминираща височина и доминиращ диаметър) е под 20%, а на още два (обхват на диаметрите и височините) – под 25%. Тези резултати са незадоволителни от гледна точка на инвентаризацията на горите, където изискванията към точността са по-големи. Въпреки това смятаме, че генерираната информация за структурата на гората може да е от полза за други приложения. Основното предимство на използвания метод е, че дава представа за разпределението на показателите по територията и така помага за планирането на по-нататъшни и по-детайлни изследвания и теренни работи. Поради това данните могат да се използват като

първоначален източник на информация или като средство за мониторинг на промените и обновяване на данните в интервалите между провеждането на периодичната инвентаризация. В този смисъл дистанционните методи може да са ефективно средство за набавяне на информация, когато наличната информация от наземни източници е остаряла и неточна. Освен това в таксационните описания липсват показатели които пряко да характеризират разнообразието в размерите на дърветата, както и проективното покритие, които са важни структурни характеристики.

Приноси

1. Апробиран за условията в Рила планина е емпирико-статистическият подход за оценяване и картографиране на показатели на структурата на иглолистни гори чрез спътникови многоканални изображения.
2. Установена е емпирично взаимовръзката между регистрирани чрез спътникови сензори спектрални отражателни характеристики на иглолистни гори и техните структурни характеристики за тестови участък „Говедарци” на базата на данни получени чрез мрежа от наземни пробни площадки.
3. Разработени и тествани са регресионни модели за оценка на 13 основни показатели на структурата на иглолистни гори чрез спътникови спектрални и текстурни данни от SPOT5 и Quickbird.
4. Съставени са карти на иглолистните гори в тестови участък „Говедарци” според тяхното проективно покритие, доминираща височина, доминиращ диаметър, обхват на височината и обхват на диаметъра използвайки спътникови изображения.

Списък на публикациите свързани с дисертационния труд

- Dimitrov, P., E. Roumenina. 2012. Studying the relationship between some attributes of coniferous forests and spectral data from the ASTER satellite sensor. *Aerospace Research in Bulgaria*, 24: 116–128
- Dimitrov, P. 2012. Using of multispectral satellite images for estimation and mapping of coniferous forest aboveground tree biomass. *Problems of geography*, 1-2: 90–104
- Dimitrov, P. 2012. Mapping of coniferous forests' structural attributes in Rila Mountain, Bulgaria by satellite data. *Proceedings of European SCGIS Conference with International Participation “Best practices: Application of GIS technologies for conservation of natural and cultural heritage sites”* 21 - 23 May 2012, Sofia, Bulgaria (под печат)

Списък на цитираната в автореферата литература

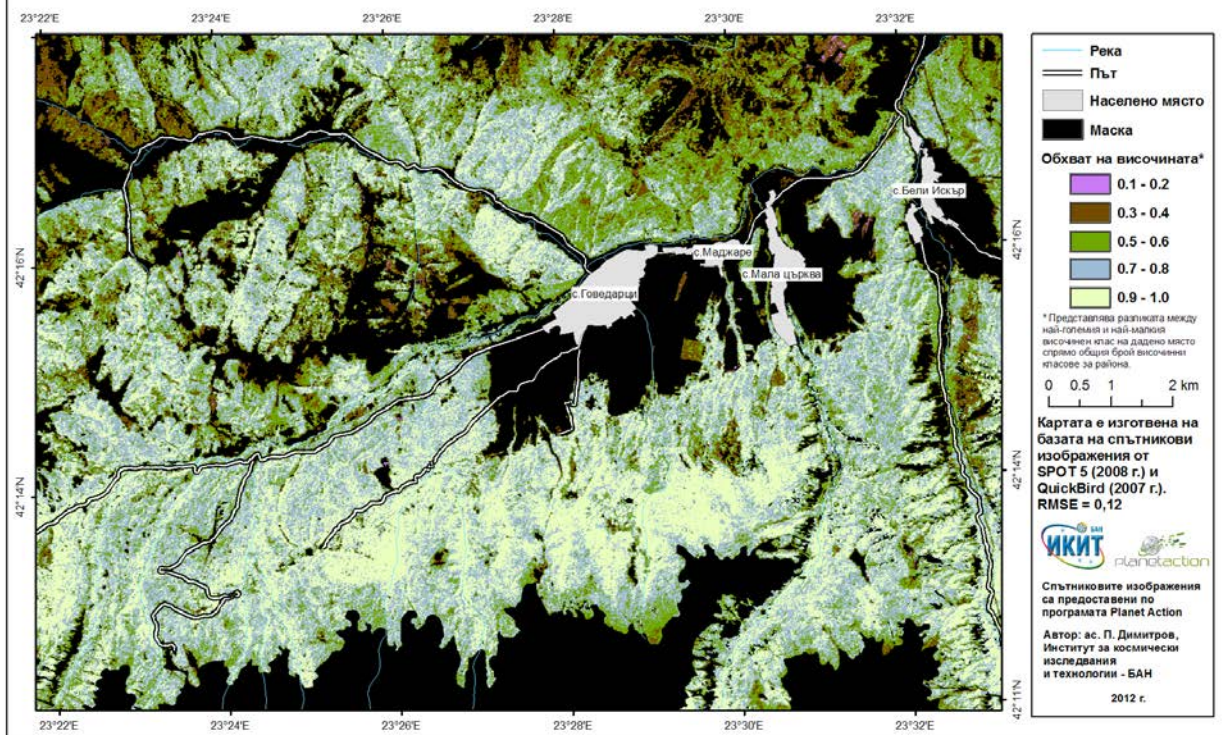
- Замолодчиков, Д.Г., А.И. Уткин, Г.Н. Коровин. 2005. Конверсионные коэффициенты фитомасса/запас в связи с дендрометрическими показателями и составом древостоев. *Лесоведение*, **6**: 73-81
- Корчагин, А.А. 1976. Строение растительных сообществ. В: (Лавренко, Е., А. Корчагин, Ред.) Полевая геоботаника. Том V., Л., Наука, 320 с
- Мардиросян, Г. 2003. Аерокосмически методи в екологията и изучаването на околната среда. София, Академично издателство “Проф. Марин Дринов”, 207 с.
- Anaya, J.A., E. Chuvieco, A. Palacios-Orueta. 2009. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management*, **257**: 1237–1246
- Chen, J.M., J. Liu, S.G. Leblanc, R. Lacaze, Jean-Louis Roujean. 2003. Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption. *Remote Sensing of Environment*, **84**: 516–525
- Cho, M.A., A.K. Skidmore, I. Sobhan. 2009. Mapping beech (*Fagus sylvatica* L.) forest structure with airborne hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **11**: 201–211
- Cohen, W.B., T.A. Spies. 1992. Estimating Structural Attributes of Douglas-Fir/Western Hemlock Forest Stands from Landsat and SPOT Imagery. *Remote Sensing of Environment*, **41**: 1-17
- Cohen, W.B., T.K. Maersperger, S.T. Gower, D.P. Turner. 2003. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, **84**: 561–571
- de Wasseige, C., P. Defourny. 2002. Retrieval of tropical forest structure characteristics from bi-directional reflectance of SPOT images. *Remote Sensing of Environment*, **83**: 362–375
- Fazakas, Z., M. Nilsson, H. Olsson. 1999. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. *Agricultural and Forest Meteorology*, **98-99**: 417-425
- Franklin, J., S.R. Phinn, C.E. Woodcock, J. Rogan. 2003a. Rationale and conceptual framework for classification approaches to assess forest resources and properties. In: (M. Wulder and S. Franklin Eds.) *Remote sensing of forest environments: Concepts and case studies*. Norwell, MA, Kluwer Academic Publishers, 279-300
- Franklin, S.E., R.J. Hall, L. Smith, G.R. Gerylo. 2003b. Discrimination of conifer height, age and crown closure classes using Landsat-5 TM imagery in the Canadian Northwest Territories. *Int. J. Remote Sensing*, **24**: 1823-1834
- Franklin, S.E. 2001. *Remote sensing for sustainable forest management*. Boca Raton-London-New York- Washington, Lewis Publishers, 407 p.
- Gerylo, GR, Hall RJ, Franklin SE, Gooderham S, Gallagher L. 2000. Modeling forest stand parameters from Landsat Thematic Mapper (TM) data. In: *Proceedings of the 22nd Canadian Remote Sensing Symposium, August 21-25, 2000, Victoria, British Columbia*, 405-413
- Hall, R.J., R.S. Skakun, E.J. Arsenault, B.S. Case. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management*, **225**: 378–390
- Hyyppä J., H. Hyyppä, M. Inkinen, M. Engdahl, S. Linko, Yi-Hong Zhu. 2000. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*, **128**: 109-120
- Jakubauskas, M.E. 1996. Thematic Mapper Characterization of Lodgepole Pine Seral Stages in Yellowstone National Park, USA. *Remote Sensing of Environment*, **56**: 118-132

- Joshi, C., J. Leeuw, A. Skidmore, I. Duren, H. Oosten. 2006. Remotely sensed estimation of forest canopy density: A comparison of the performance of four methods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **8**: 84–95
- Kayitakire, F., C. Hamel, P. Defourny. 2006. Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, **102**: 390–401
- Lefsky, M.A., W.B. Cohen, T.A. Spies. 2001. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. *Can. J. For. Res.*, **31**: 78-87
- Lefsky, M.A., W.B. Cohen. 2003. Selection of remotely sensed data. In: (M. Wulder and S. Franklin Eds.) *Remote sensing of forest environments: Concepts and case studies*. Norwell, MA, Kluwer Academic Publishers, 13-46
- Li, X., A.H. Strahler. 1985. Geometric-Optical Modeling of a Conifer Forest Canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. **Ge-23**, No. 5: 705-721
- Li, X., A.H. Strahler. 1992. Geometric-Optical Bidirectional Reflectance Modeling of the Discrete Crown Vegetation Canopy: Effect of Crown Shape and Mutual Shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **30**(2): 276-292
- Mäkelä, H., A. Pekkarinen. 2004. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management*, **196**: 245–255
- Muukkonen, P., J. Heiskanen. 2005. Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data. *Remote Sensing of Environment*, **99**: 434–447
- Ozdemir, I., A. Karnieli. 2011. Predicting forest structural parameters using the image texture derived from WorldView-2 multispectral imagery in a dryland forest, Israel. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **13**: 701–710
- Reese, H., M. Nilsson, T.G. Pahlén, O. Hagner, S. Joyce, U. Tingelöf, M. Egberth, H. Olsson. 2003. Countrywide Estimates of Forest Variables Using Satellite Data and Field Data from the National Forest Inventory. *Ambio*, **32**(8): 542-548
- Soenen, S.A., D.R. Peddle, C.A. Coburn. 2005. SCS+C: a modified Sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain. *IEEE Transactions in geoscience and remote sensing*, **43**(9): 2148-2159
- Spies, T.A. 1998. Forest Structure: A Key to the Ecosystem. *Northwest Science*, **72**(2): 34-39
- Tomppo, E., Schadauer, K., McRoberts, R.E., Gschwantner, Th., Gabler, K. & Ståhl, G. 2010. Introduction. In: (Tomppo, E., Gschwantner, Th., Lawrence, M., McRoberts, R.E., Eds.) *National Forest Inventories - Pathways for common reporting*. Springer, pp. 1-18
- Zheng, D., J. Rademacher, J. Chen, T. Crow, M. Bresee, J. Le Moine, Soung-Ryoul Ryu. 2004. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment*, **93**: 402–411

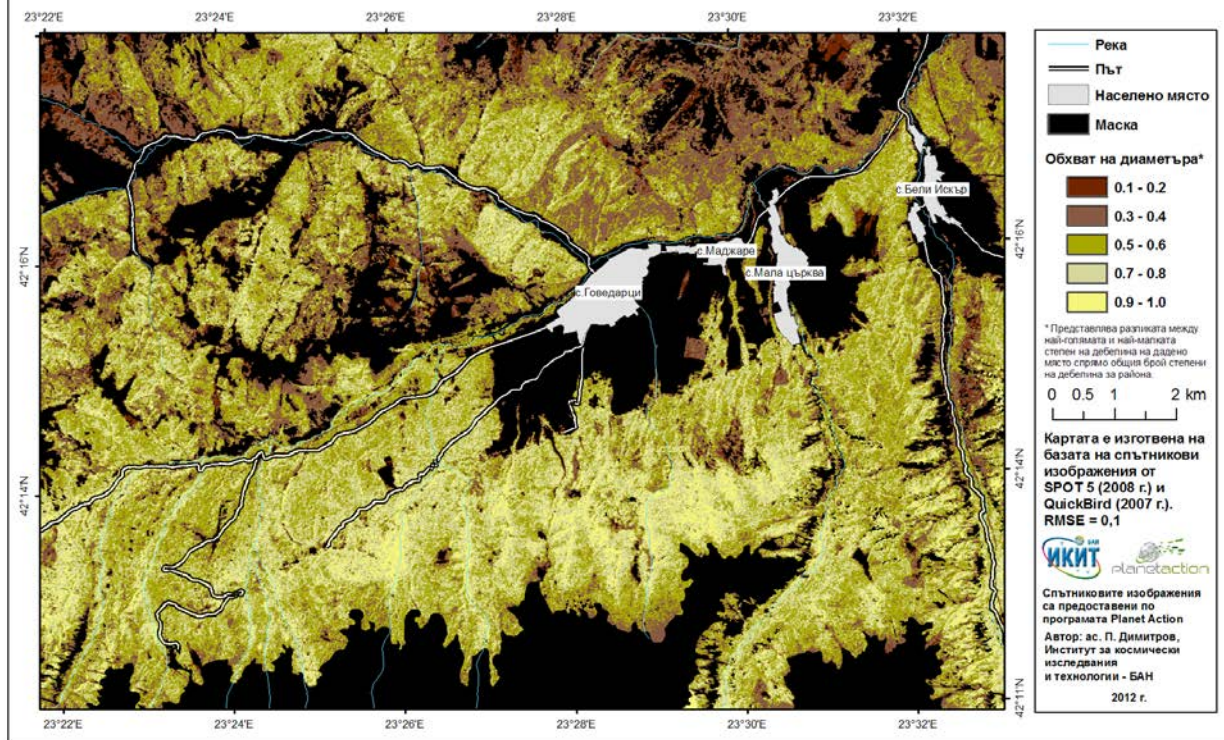
Приложение 3 Примерни карти на разпределението на някои структурни показатели в тестовия участък съставени на базата на спътниковите растерни слоеве

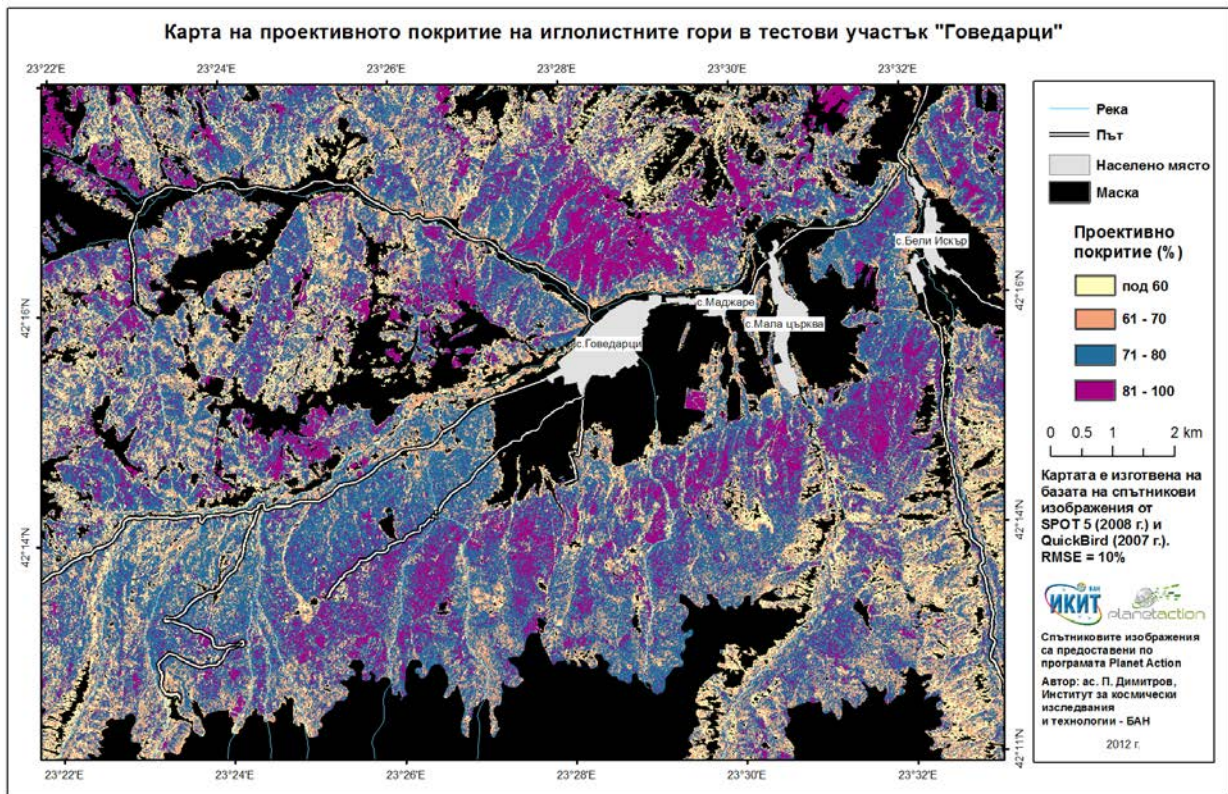


Карта на обхвата на височината на иглолистните гори в тестови участък "Говедарци"



Карта на обхвата на диаметъра на иглолистните гори в тестови участък "Говедарци"





Благодарности

Изказвам най-искрена благодарност на своя научен ръководител Проф. д-р Евгения Руменина за всеотдайната подкрепа и методическата помощ, както и на всички колеги от секция "Дистанционни изследвания и ГИС" на ИКИТ-БАН за тяхното съдействие и напътствия. Част от полевите изследвания са финансирани по Договор No. BG051PO001/07/3.3-02/63/170608 на ИКИТ с Фонд "Научни изследвания" по програма "Развитие на човешките ресурси" на Европейския социален фонд. Използваните в дисертацията спътникови изображения от SPOT 4, SPOT 5 и QuickBird са предоставени безвъзмездно от SPOT Image и Digital Globe по линия на програмата Planet Action, за което съм дълбоко признателен. Спътниковото изображение от ASTER е закупено по Договор НИК-03/2007 сключен между Фонд "Научни изследвания" и ИКИТ – БАН.

Estimation and mapping of structural attributes of coniferous forests by multispectral satellite images

Petar Kirilov Dimitrov, PhD thesis

Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences;
Acad. G. Bonchev St., bl. 1, Sofia 1113, Bulgaria, e-mail: petarkirilov@mail.bg;
PhD supervisor: Assoc. Prof. Eugenia Roumenina

Summary

The objective of the study is to estimate and map the structure of coniferous forests by multispectral satellite images with spatial resolution from 0.6 to 20 m. Study area in Rila Mountain is selected which forests are representative of most of the coniferous forests in Bulgaria. The feasibility of using three types of satellite data for prediction of forest structure is assessed: 1) spectral bands data and vegetation indices from SPOT 4/5, ASTER and QuickBird images, 2) textural measures from QuickBird image, and 3) angular index (NDHD) calculated using two SPOT4 images with different geometry of acquisition. For characterizing forest structure in the study area 13 attributes are used (density, basal area, volume, above-ground biomass, canopy cover, mean diameter, dominant diameter, Std.dev. of diameter, range of diameters, mean height, dominant height, Std.dev. of height and range of heights). They are measured in 32 plots with varying size (30×30 to 5×5m) during several field campaigns in 2009, 2010 and 2011. Data for mean diameter and height, volume and above-ground biomass from forest inventory compartments are also used. Correlations between satellite data and forest structure attributes are evaluated on plot and stand level and also for the original satellite images and those undergone topographic correction. The relationships found are discussed and used as a guide for selection of independent variables for regression-based estimation of forest structure attributes. Simple and multiple linear regressions are used for modelling.

It is found that regardless of the satellite sensor used the data from the near infrared band are most strongly related with forest attributes and therefore are most useful for explaining differences in the structure of the studied type of forest. Only canopy cover show higher correlations with the ratio of the near infrared to the shortwave infrared band (the SI index) and with NDVI. From all forest attributes, the dominant height shows highest correlations with the satellite data (r between -0.80 and -0.89 for the terrain corrected images from different sensors), and the basal area shows lowest correlations (r between -0.35 and -0.55). The density and canopy cover are positively correlated with the data from the spectral bands and with the vegetation indices while the other structural attributes are negatively correlated with them. This is explained by the changes in roughness of the upper canopy surface with the aging of forest. These changes affect most strongly the attributes characterising the maximal size of trees –

dominant diameter and height, and relatively weakly other attributes like above-ground biomass and size diversity.

Contrary to expectations the topographic correction of images do not provide for obtaining stronger correlations. Even slightly lower, however, the correlation coefficients of the topographically corrected images do not differ significantly from those obtained with uncorrected data. Thus, using of topographically corrected images is recommended.

The SPOT5 spectral data show highest correlations for nine of the structural attributes at plot level, and the QuickBird spectral data show highest correlations for all attributes at stand level. The two sensors with lower spatial resolution – ASTER and SPOT4 – show weaker results. The spectral bands or indices from SPOT5 with highest correlation with forest structure attributes are selected for regression analysis.

From the texture measures calculated from the QuickBird image *homogeneity* show highest correlation with forest structure attributes. The attributes with highest correlation coefficients with texture are the dominant diameter and height (-0.78 and -0.74 respectively). In general, the texture measures are weakly correlated to forest structure attributes in comparison with the spectral data (mainly the near infrared band). The angular index NDHD shows even lower correlation coefficients with the forest attributes, although they are statistically significant in most cases.

For most of the structure attributes the multiple regression models with one spectral (from SPOT5) and one textural (from QuickBird) independent variable have higher R^2 and lower RMSE. Only for the above-ground biomass and volume the simple models with the SPOT5 near infrared band are better than the multiple models. Using combination of SPOT5 and QuickBird data the relative RMSE of models for canopy cover, dominant height and dominant diameter is lower than 20%, and for range of heights and diameters is lower than 25%. The model for density has high RMSE (51.9%) and is inapplicable. For the other structural attributes the achieved minimal relative RMSE is between 28.6% (basal area) and 38.8% (mean diameter).

Modelling errors from this study are close to that reported in literature for similar forest types and satellite data used. They are still high for industrial inventory and operational planning in forestry. However, the study shows that the empirical modelling is useful method for obtaining basic information for forest structure in the studied forest types. This information could supplement ground-based inventory especially when only spatially aggregated estimates are needed or other data sources are outdated. It may be used as preliminary data source or as a tool for monitoring of changes in the intervals between forest inventories. Moreover, forest inventory databases lack data for attributes directly characterizing the diversity in tree size, as well as the canopy cover, which are important structural parameters.