

Б Ъ Л Г А Р С К А А К А Д Е М И Я Н А Н А У К И Т Е
ИНСТИТУТ ПО БИОРАЗНООБРАЗИЕ И ЕКОСИСТЕМНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Людмила Миткова Лозанова

**Роля на подземната биомаса на дървесни растения за акумулация на
въглерод в планински горски екосистеми**

Автореферат
на дисертация

за присъждане на образователната и научна степен „Доктор”

Научна специалност: 02.22.01. “Екология и опазване на екосистемите”

Научен ръководител: проф. д-р Миглена Кирчева Жиянски
Научни консултанти: доц. д-р Светла Вълева Братанова-Дончева
доц. д-р Стела Стоянова Лазарова

София
2020

Дисертацията е разработена в рамките на редовна докторантура в Института по биоразнообразие и екосистемни изследвания – БАН.

Дисертационният труд е обсъден и насочен към защита на разширено заседание на отдел "Екосистемни изследвания, екологичен риск и консервационна биология" на ИБЕИ – БАН, състояло се на 28.02.2020 г.

Дисертационният труд се състои от 125 страници и съдържа 23 фигури и 9 таблици. Списъкът на цитираната литература съдържа 21 заглавия на кирилица и 219 – на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 28.05.2020 г. от 10:00 часа в заседателната зала на Института по биоразнообразие и екосистемни изследвания – БАН, на ул. „Майор Ю. Гагарин” № 2, на открито заседание на избраното научно жури (назначено със Заповед на Директора на ИБЕИ-БАН № 29/20.03.2020 г.) в състав:

Проф. д-р Нешо Чипев (ИБЕИ – БАН)

Проф. д-р Цветан Златанов (ИБЕИ – БАН) – председател на научното жури

Проф. д-р Миглена Жиянски – научен ръководител (ИГ – БАН)

Проф. д-р Марияна Любенова (БФ, СУ)

Доц. д-р Виолета Димитрова (ЛТУ)

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Института по биоразнообразие и екосистемни изследвания – БАН, база 1.

Съдържание

Благодарности	5
Използвани съкращения	6
1. Увод.....	7
2. Литературен обзор	8
3. Цел и задачи	10
4. Материали и методи	10
4.1. Обекти на проучване	10
4.1.1. Характеристика на изследваните горски екосистеми.....	
4.1.2. Описание и характеристика на изследваните обекти	
4.2. Определяне на основни почвени характеристики	12
4.3. Определяне на основни характеристики на кореновата система	13
4.3.1. Общ запас и вертикално разпределение на корените – метод на Родин и др. (1968)	
4.3.2. Запас и вертикално разпределение на корени с диаметър до 10 mm – метод на „Последователно събиране на почвени проби”	
4.3.3. Изчисляване на годишна продукция (Pa)	
4.3.4. Изчисляване на годишен оборот (TR) на финни корени.....	
4.4. Определяне на концентрация на въглерод и азот във финни корени.....	15
4.5. Определяне на запаси на въглерод в коренова система	16
4.6. Определяне на годишен трансфер на въглерод и азот от финните корени.....	16
4.7. Статистически анализи	16
5. Резултати и обсъждане	17
5.1. Основни почвени характеристики	17
5.2. Характеризиране на подземната дървесна биомаса – метод на Родин и др. (1968)	17
5.3. Характеризиране на подземна дървесна биомаса – метод на “Последователно събиране на почвени проби”	19
5.3.1. Подземна биомаса и разпределение на корените по класове на диаметър.....	
5.3.2. Вертикално разпределение на кореновата биомаса.....	
5.3.3. Годишна динамика на коренова биомаса и некромаса	
5.3.4. Годишна продукция и оборот.....	
5.4. Роля на подземната дървесна биомаса от бук и дугласка за акумулиране на въглерод и трансфер на въглерод и азот в почвата.	23
5.4.1. Съдържание на въглерод и азот в кореновата система на бук и дугласка	
5.4.2. Оценка на запасите от въглерод в подземната дървесна биомаса в гори от бук и култури от дугласка	

5.4.3. Годишен трансфер на въглерод и азот от фините корени към почвата	
6. Обобщение, изводи и приноси	27
Изводи.....	28
Приноси	29
7. Публикации, свързани с дисертационния труд.....	31
8. Участие в научни форуми	31
Декларация за оригиналност и достоверност.....	32
9. Списък с приложения	33
10. Литература.....	33
Summary	37

Благодарности

Изказвам най-искрените си благодарности на проф. д-р Миглена Жиянски и доц. д-р Светла Братанова за цялостната помощ и подкрепа, която ми оказваха по време на докторантурата. Изключително съм благодарна на проф. д-р Нешо Чипев, проф. д-р Цветан Златанов, Ивайло Стоянов и д-р Станислав Лазаров за ценните предложения и препоръки, свързани с подготвянето на дисертацията.

Благодаря на доц. д-р Ангел Ферезлиев, Митко Лозанов и Здравко Желязков за помощта, която ми оказваха в теренната работа и за събиране на пробите.

Изключително съм благодарна на проф. д-р Бойко Георгиев за отзивчивостта и съдействие в административната част. Благодаря на всички колеги от Секция "Екосистемни изследвания с център LTER – България" и База 1 за приятелската атмосфера и топло отношение. Сърдечно благодаря на проф. д-р Йордан Узунов за морална подкрепа и интереса към работата ми.

Благодаря на доц. д-р Георги Радославов и доц. д-р Петър Христов за тяхната съпричастност, подкрепа и ценни съвети.

Благодарна съм на д-р Елена Вангелова за възможността да осъществя краткосрочна специализация в Станция за проучване на горите "Алис Холт", Хемпшир, Великобритания и за направените химични анализи на пробите.

Изказвам огромни благодарности на доц. д-р Стела Лазарова и гл. ас. д-р Мартин Маринов за безценната помощ, търпение, загриженост и искрено приятелство, с което ме дариха.

Благодарна съм на родителите си, Паруша и Христо за обичта и доверието. Благодаря!

Използвани съкращения

ДГС	Държавно горско стопанство
ЕС	Европейски съюз
ИАГ	Изпълнителна агенция по горите
ИБЕИ	Институт по биоразнообразие и екосистемни изследвания
ИГ	Институт за гората
МД	Моделно дърво
НИМХ	Национален институт по метеорология и хидрология
ООН	Организация на обединените нации
РКООНИК	Рамкова конвенция на ООН за изменение на климата
С	Въглерод
С/N	Съотношение въглерод/азот
CH ₄	Метан
CO ₂	Въглероден диоксид
DIC	Разтворен неорганичен въглерод
DM	Матрица на решенията
DOC	Разтворен органичен въглерод
FAO	Организация по прехрана и земеделие
Ia _(C)	Годишен трансфер на въглерод от фините корени
Ia _(N)	Годишен трансфер на азот от фините корени
IPCC	Междуправителствен панел по изменение климата
ММ	Максимум – минимум
N	Азот
N ₂ O	Диазотен оксид
P	Продукция на фините корени
Pa	Годишна продукция на фините корени
Pg	Пикограм = 10 ⁻¹² g
SOC	Почвен органичен въглерод
SOM	Почвена органична материя
TR	Оборот на фините корени
WRB	Световна референтна база (международен стандарт за класификация на почвите)

1. Увод

Горските екосистеми са източник на ресурси и енергия, и имат основна роля за поддържането на биоразнообразието, регулирането на климата и биогеохимичните цикли на Земята. Тяхното състояние е силно повлияно от различни фактори като човешка дейност, глобални климатични промени и биологични инвазии. Изгарянето на изкопаеми горива (Le Quéré et al. 2009), обезлесяването и превръщането на гори в обработваеми земи (Murty et al. 2002) са двата основни фактора, които водят до нарастване концентрацията на парникови газове в атмосферата, съответно до засилване на парниковия ефект.

От всички наземни екосистеми, горите имат най-съществен принос за смекчаване на климатичните изменения, тъй като поглъщат и съхраняват значителни количества въглерод, особено в почвата. Те заемат около 30% от земната повърхност (FAO 2006), но съхраняват повече от 70% от глобалното количество почвен органичен въглерод, а дървесната растителност представлява около 80% от биомасата на Земята (Lorenz & Lal 2010). Ролята на естествените горски екосистеми и на устойчиво стопанисваните гори да поглъщат CO₂ и да секвестират въглерод е широко призната от еколози, икономисти и политици. Съществуват различни международни програми, целящи да определят икономическата стойност на горите във връзка със способността им да абсорбират и задържат въглерод. В съответствие с Рамковата конвенция на ООН по изменение на климата (РКООНИК, 1992) и в изпълнение на ангажиментите на ЕС съгласно Парижкото споразумение от 5 октомври 2016 г., България следва *“да намалява емисиите си на парникови газове и да увеличава поглъщанията”* (Регламент 2018/841 на ЕС). Горите, като основен компонент в сектор *„Земеползване, промени в земеползването и горско стопанство“* имат потенциал да осигуряват дългосрочни ползи за климата и чрез устойчиво управление и въвеждане на новаторски практики на стопанисване да допринасят за постигането на целите на Съюза за намаляване на емисиите на парникови газове с най-малко 40% до 2030 г., както и на дългосрочните цели на Парижкото споразумение в областта на климата. Като страна-член на ЕС, България трябва да регистрира и докладва емисиите и поглъщанията на парникови газове от горските територии, като се отчитат регионалните особености в страната. Това предполага наличие на актуални данни и анализи за запасите на въглерод в надземната и подземна биомаса в съответствие с различни характеристики на гората, напр. тип местообитание, възраст, почвен тип, минали и настоящи практики на управление.

Кореновата система изпълнява основни функции, осигуряващи жизнената дейност на дърветата като физическо закрепване към почвата и устойчивост към неблагоприятни въздействия, поглъщане и транспортиране на вода и хранителни вещества. На ниво растително съобщество корените и ризосферата участват във всички екологични процеси и услуги, предоставяни от горските екосистеми: кръговрат на хранителни вещества и воден баланс, почвообразуване, осигуряване на биоресурси, поддържане на почвеното плодородие и биоразнообразие (Bardgett et al. 2014). Във връзка с глобалните предизвикателства пред човечеството, изследванията върху ролята на подземната биомаса на дървесните растения за поглъщане на парникови газове (CO₂, CH₄, N₂O) и проследяване влиянието на климатичните промени върху биогенния кръговрат на въглерода са особено актуални и значими.

2. Литературен обзор

В литературния обзор на дисертацията е направен обстоен преглед върху следните теми: 1) роля на горските екосистеми и кореновата система на дървесни растения за акумулиране на въглерод; 2) динамика, основни резервоари, потоци и запаси на въглерод в гори с различен произход; 3) структура и функция на кореновата система на горскодървесни видове; 4) кратък анализ на основните аспекти на проучванията свързани с коренова система на дървесни растения в България и света.

Регулирането на кръговрата на въглерода представлява една от най-важните екосистемни услуги, предоставяна от горите. За по-доброто разбиране на динамиката и оценяване на процесите на улавяне, поглъщане и акумулиране на въглерод в природните системи, се използват термините *поглъщатели* (sinks), *резервоари* (pools), *потоци* (fluxes) и *секвестриране* (carbon sequestration). Естествените гори и горите, стопанисвани по устойчив начин, се считат за най-важните поглъщатели на CO₂ и други парникови газове (Luuyssaert et al. 2008, Lewis et al. 2019). Най-общо, въглеродът в горските екосистеми се натрупва в два основни резервоара – растителна биомаса и почва (IPCC 2003). По конкретно, въглеродните запаси се разпределят в следните депа: *надземна биомаса*, която включва дървесна, храстова и тревиста растителност, мъртва дървесина и горска постилка; *подземна биомаса* – корени и почвена биота; и *почвен въглерод* – органични и неорганични форми на въглерод. Листата, фината коренова биомаса и горската постилка се считат за „бързи въглеродни резервоари“, а дървесната биомаса – за „бавен резервоар“ (Norby et al. 2002).

Ефективността на въглеродна секвестрация варира между дървесните видове, тъй като те се различават по своите характеристики, а реакцията (отговорът) им към промените в климатичните условия е видово-специфична (Lorenz & Lal 2010). Характеристики на видовете, които влияят върху цикъла на въглерода и неговия баланс са особеностите на растеж, тип коренова система и дълбочина на вкореняване, плътност на дървесината, продължителност на живот, уязвимост към нарушения и разлагане на мъртвата дървесина и гъстота на формираните насаждения (Purves & Pacala 2008). Корените в горските екосистеми акумулират 20% – 40% от общото количество въглерод и през последните десетилетия все повече се осъзнава значението на кореновата система и ризосферата за натрупването на почвен органичен въглерод. Условията на средата – температура, валежи и почви, природните нарушения, както и използваните горскостопаниски практики имат важно значение за бюджета и динамиката на въглерод в гората (Jandl et al. 2007).

Изучаването на кореновата структура и функции е от изключително важно за разбирането на процесите в горските екосистеми. Кореновите системи на дърветата се състоят от морфологично и функционално различни корени. Въпреки че структурата е генетично обусловена, изследванията показват, че е трудно да се дефинират видови закономерности в развитието на корените, тъй като често условията на месторастене и почвата променят кореновата форма до такава степен, че особеностите на дървесния вид са частично или изцяло променени (Lug & Hoffman 1967). В зависимост от напречния диаметър се разграничават две основни групи корени – *фини* (fine) и *груби* (coarse), като в научната литература съществуват вариации в зависимост от размерите, приети като гранични. Грубите и фините корени се различават по своите функции и обикновено се изследват чрез прилагане на различни методи. Поради различната скорост на разлагане и особеностите на жизнения цикъл, грубите корени имат съществено значение за дългосрочното съхраняване на въглерод в почвата и разпределението му в дълбочина (Sorgonà et al. 2018), а фините корени основно са свързани с „преноса“ на органичен въглерод към „резервоара“ на почвеното органично вещество (Rasse et al. 2005).

Най-често фините корени се определят като корени с диаметър под 2 mm, но в по-стари проучвания за фини са се считали корени с размери по-малки от 3 mm, 5 mm или 10 mm. Те са нелегитимизирани части от кореновата система, които заедно с асоциираните

микоризни гъби абсорбират хранителни вещества и вода от почвата. Имат основна роля за кръговрата на биогенните елементи в наземните екосистеми. Въпреки че биомасата на фините корени не надхвърля 5% (Vogt et al. 1996), фините корени имат основен принос за включването на въглерод в почвата поради бързия им оборот (Lukas 2012). В горските екосистеми фината коренова биомаса представлява 22–36% от годишната чиста първична продукция (Jackson et al. 1997) и е установено, че може да допринесе до два пъти по-големи количества SOC в сравнение с горската постилка (Xia et al. 2015).

Усилията за изясняване ролята на подземната дървесна биомаса в горските екосистеми за поглъщане на парникови газове от атмосферата и за биогеохимичния кръговрат на въглерода в последните години нарастват. Изследванията, свързани с кореновата биомаса, съдържанието на въглерод в корените и ролята им за акумулацията му в почвата, са много разнообразни и комплексни. Установено е, че количеството на кореновата биомаса и секвестрирането на въглерод в горските екосистеми зависи от фактори като дървесен вид, тип почва, почвени свойства, климатични условия и практики на управление (Gill & Jackson 2000, Helmisaari et al. 2007, Finér et al. 2011a, 2011b). Изследвани са влиянието на възрастта на насаждението (Peichl et al. 2006), произхода (Cai et al. 2019) и отговорът на кореновата система към засушавания (Brunner et al. 2015).

Първите целенасочени изследвания върху коренови системи на горскодървесни видове в България са започнали през 70-те години на XX век и са свързани с видове използвани за създаване на горски култури (Манолова 1970, 1971, 1972, Китин 1970, 1973) и реконструкции на слабопродуктивни издънкови дъбови гори (Бъчваров и др. 1976). През 80-те години изследванията върху дървесна коренова биомаса са свързани предимно с изучаване на биологичния кръговрат на елементите и връзката им с почвените условия и растителността в дъбови екосистеми (Нинов и др. 1983, Любенова 1988, Любенова и Бондев 1987). Проведените след 2000-та година изследвания разширяват спектъра от горски екосистеми и обхващат най-разпространените в страната горскодървесни видове (обикновен бук (*Fagus sylvatica* L.), смърч (*Picea abies* (L.) Karst.), бял бор (*Pinus sylvestris* L.) и благун (*Quercus frainetto* Ten.) (Zhiyanski 2004, Димитрова и др. 2014, Dimitrova et al. 2014, 2015 и други).

Обективната оценка на различни антропогенни въздействия изисква добро познаване на запасите и динамиката на въглерод в почвата и връзката им с характеристиките на дървесната коренова система в условия на повлияни и неповлияни горски екосистеми. В този аспект проучванията в различни по произход горски екосистеми (широколистни естествени и иглолистни култури) дават възможност за сравнителен анализ и предоставят допълнителни данни за характеризиране на двата типа екосистеми. Актуалността на посочените по-горе аспекти и значимостта на проблема, определиха необходимостта от разширяване на проучванията и провеждане на целенасочени изследвания върху кореновата биомаса в два типа планински горски екосистеми в България.

3. Цел и задачи

Целта на настоящото изследване е да се характеризират структурата и биомасата на кореновите системи на значими за горското стопанство дървесни видове с различен произход и да се оцени ролята им за акумулация на почвен въглерод в условията на планински горски екосистеми в България (Родопи и Стара планина).

За постигане на тази цел като обект на изследването са избрани два моделни вида, които са с висока значимост за горското стопанство – обикновен бук (местен широколистен вид) и дугласка (интродуциран иглолистен вид).

Поставени са следните изследователски задачи:

1. Характеризиране на почвите чрез определяне на основни почвени параметри и свойства в гори от обикновен бук и в горски култури от дугласка.
2. Определяне на подземната биомаса (груби, средни и фини корени) на двата дървесни вида.
3. Определяне на запаса, годишната продукция и оборота на фините корени.
4. Характеризиране на вертикалното разпределение и времевата динамиката на фините корени.
5. Оценка на запаса на въглерод и азот в подземната дървесна биомаса и в почвата в контекста на капацитета на изследваните горски екосистеми да регулират кръговрата на въглерода.

4. Материали и методи

Изследването е проведено в два типа горски екосистеми: естествени гори от обикновен бук (*F. sylvatica*), разположени в Централна Стара планина, и култури от дугласка (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), разположени в Западни Родопи. Двата дървесни вида принадлежат към различни функционални типове растителност (широколистни листопадни и иглолистни вечнозелени дървета) (Kattge et al. 2017), но проявяват сходни екологични изисквания към средата.

4.1. Обекти на проучване

4.1.1. Характеристика на изследваните горски екосистеми

Обикновеният бук е един от най-разпространените и важни дървесни широколистни видове в Европа. Общата площ на горите доминирани от бук (*F. sylvatica* и *F. orientalis*) в България е 454253 ha (ИАГ 2016) и представляват около 17% от общата залесена територия и 23% от площта на широколистните гори в страната. Заемат разнообразни ландшафти и надморски височини от морското равнище до горната граница на гората. Имат важно икономическо значение за страната и са обект на множество изследвания. Значителна част са включени в защитени територии, а повече от $\frac{3}{4}$ – в зони от европейската екологична мрежа Натура 2000 (ИАГ 2016). На територията на страната са определени пет типа природни местообитания на съобщества доминирани бук, включени в мрежата Натура 2000 и в Червената книга на България (том III).

Ареалът на дугласката обхваща територии от Скалистите планини и Западното крайбрежие на Северна Америка. Поради качествената дървесина, високата продуктивност и адаптивност, видът е интродуциран в Европа и България и е широко използван за създаване на горски култури (Hermann & Lavender 1999). Насажденията от дугласка в Европа заемат около 800 000 хектара (Forest Europe 2015). Залесяването с дугласка в България започва в началото на миналия век (1908 г.) в района на с. Шипка, но придобива

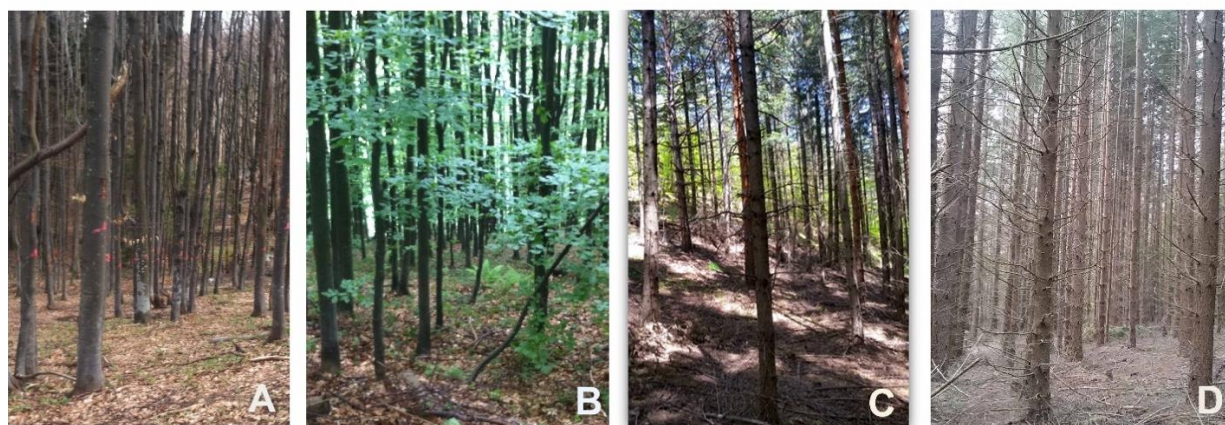
по-широки мащаби в края на 60-те и началото на 70-те години. Култури от дугласка се срещат в почти всички горскорастителни райони на страната в широк обхват от надморски височини (150–1600 m н.в.), често на стръмни склонове (до 36 градуса) и ерозиран почви (Попов и др. 2018). Културите от дугласка в България заема площ от 9078 ha (ИАГ 2016) и представляват около 0.2% от общата залесена територия или 0.86% от площта, заета от иглолистни гори у нас.

4.1.2. Описание и характеристика на изследваните обекти

Теренните дейности са извършени през 2015 – 2016 г. в четири пробни площи с размер 100 m² – две от бук (*Fs1*, *Fs2*) и две от зелена дугласка (*Pm1*, *Pm2*). Основните характеристики на двата района и четирите пробни площи (дървесен състав, географски особености, почвени характеристики, климатични фактори и др.) са представени в Таблица 1 и визуализирани на Фигура 1.

Проучваните букови гори са разположени на северния склон на Централна Стара планина в района на местността Беклемето и се управляват от ДГС Троян. Според класификацията за местообитания с европейска значимост (Натура 2000) изследваните територии се отнасят към местообитание 9130 – Букови гори от типа *Asperulo-Fagetum*. Средногодишните валежи в изследваната област варират в широки граници (680 – 1240 mm) с максимални количества отчетени през май и юни и минимални – през февруари. Средната годишна температура за периода 1972 – 2012 година варира между 4°C и 8°C (НИМХ 1972 – 2012). Проучваните култури от дугласка се намират в района на Западните Родопи и се управляват от ДГС Алабак, гр. Велинград. Създадени са чрез залесяване през 70-те и 80-те години на XX век върху бивши селскостопански земи. Средногодишните валежи в изследваната област варират от 660 до 790 mm с максимални количества през май и юни и минимални – през февруари. Средната годишна температура за периода 1972 – 2012 година варира между 7.4° C и 9.7° C (НИМХ 1972 – 2012).

Почвите и в двата проучвани района се отнасят към тип планински кафяви горски почви (Cambisols) – подтип ненаситени (Dystric Cambisols) (WRB 2014). Характеризират се с плитък профил (до 60 cm), тънък хумусен хоризонт (12 – 15 cm) и силно кисела реакция по цялата дълбочина на почвения профил (pH под 5).



Фигура 1. Снимки на пробните площи – бук: *Fs1* (A) и *Fs2* (B); дугласка: *Pm1* (C) и *Pm2* (D). Снимки: Л. Лозанова (A, B) и А. Ферезлиев (C, D)

Таблица 1. Местоположение и основни характеристики на изследваните пробни площи. Източници: Горскостопански планове на ДГС Троян (2017 – 2027) и ДГС Алабак (2018 – 2028), Ferezliev et al. 2018.

Дървесен вид	<i>Fagus sylvatica</i>		<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>menziesii</i>	
Пробна площ	Fs 1	Fs 2	Pm 1	Pm 2
Географски район	Средна Стара планина		Западни Родопи	
Географски координати	42°47' 4.47" N 24°36' 53.16" E	42°47' 5.21" N 24°36' 33.39" E	42°02' 28.19" N 23°56' 20.76" E	42°02' 30.32" N 23°56' 27.05" E
Отдел/подотдел	108 ю	109 к	385 п	385 с
Надморска височина (m)	1330	1325	1100	1050
Изложение	N	NW	NE	NE
Наклон	35°	25°	15°	14°
Средногодишни температури (°C)	6.1		7.5	
Годишни валежи (mm)	901		677	
Дървесен състав (%)	бук 100%		дугласка 87% бял бор 13%	
Средна възраст през 2015 г.	64	47	37	47
Гъстота (брой дървета/ha)	2090	2700	661	1700
Средната височина на дървостоя (m)	17.2	16.1	25.1	30.8
Среден диаметър на h=1.3 m (cm)	14.6	9.1	24.1	23.0
Почвен тип (WRB 2014)	Dystric Cambisols		Dystric Cambisols	

4.2. Определяне на основни почвени характеристики

Почвите в изследваните четири пробни площи са анализирани за определяне на основни характеристики – почвен скелет, обемната плътност, реакция на почвен разтвор (pH H₂O и pH CaCl₂) и съдържание на органичен въглерод и азот. Анализите са направени в Лабораторията по горско почвознание (ИГ – БАН) и в Лабораторията за почвени анализи към Станцията за проучване на горите (Alice Holt Research Station – Forest Research), Хемпшир, Великобритания. Почвената реакция и съдържанието на органичен С и N са определени чрез сухо изгаряне при 900 °C с помощта на C/N анализатор (CE Instruments Ltd, FlashEA 1112 Series).

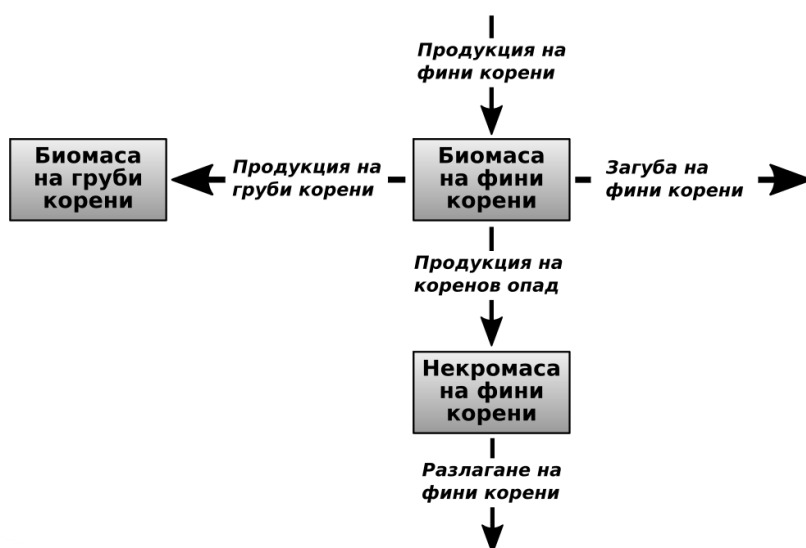
4.3. Определяне на основни характеристики на кореновата система

4.3.1. Общ запас и вертикално разпределение на корените – метод на Родин и др. (1968)

За определяне на общият запас, и вертикалното разпределение на кореновата биомаса на двата изследвани дървесни вида е приложен модифициран метод на Родин и др. (1968). Теренната работа е осъществена еднократно през вегетационния сезон на 2015 г. За всяка пробна площ е избрано средно моделно дърво, около което е очертана окръжност с радиус 1 m и е проучена една четвърт от площта на кръга. От избрания участък се отстраняват тревистите растения, мъховете и горската постилка. Почвата се изкопава послойно на четири дълбочини (0–10, 10–20, 20–30, 30–40 cm), изважда се и се разстила върху брезент с размери 2 m². Всеки почвен слой се преглежда, пресява и корените се отделят ръчно, като се поставят се в полиетиленови пликкове. Пробите са транспортирани до ИБЕИ – БАН за последваща обработка. След прецизно измиване с вода корените са разделени според размер на диаметъра и разпределени в три класа: фини (0-2 mm), средни (2<d<10 mm) и груби (d>10 mm). Кореновите проби са изсушени при температура 90° C в продължение на 48 часа до достигане на постоянно сухо тегло и претеглени с точност до 0.01 g. Данните за запаса на кореновата биомаса са представени в g m⁻² за всяка почвена дълбочина. Общо са събрани, обработени и анализирани 16 коренови проби.

4.3.2. Запас и вертикално разпределение на корени с диаметър до 10 mm – метод на „Последователно събиране на почвени проби“

За определяне на запаса и характеризиране на вертикалното разпределение и динамиката на корени с диаметър до 10 mm е приложен индиректен метод на “Последователно събиране на почвени проби” (*Sequential Soil Coring*) (Persson 1978). Метода осигурява и първоначални данни за изчисляване на годишната продукция и оборот на фините корени. Този метод се основава на предположението, че нарастването и отмирането на фините корени се случват едновременно, следователно промените в биомасата (количеството живи корени) и некромасата (количеството мъртви корени) отразяват скоростта, с която се осъществява оборотът на фините корени. Моделът, описващ запасите и потоците в кореновата система на дървесните видове, който се използва за изчисляване на годишната продукция и оборот и стои в основата на метода е представен на Фигура 2.



Фигура 2. Схематичен модел, описващ запасите и потоците в кореновата система на дървесните видове. Източник: Лукас (2012)

За прилагането му се използва цилиндрична стоманена сонда, с помощта на която се изважда почвена проба с определен обем. От почвената проба се отделят живите и мъртви корени, измиват се и се претеглят. За да се установят настъпилите промени в количеството на кореновата биомаса и некромаса за даден период от време (напр. 1 година), пробовземането се извършва многократно (всеки месец или всеки сезон). Продукцията и оборотът на фините корени се изчисляват като се използват данни за получената био- и некро-маса (g или kg) за единица обем или площ, като се използват формулите, представени по-долу.

В настоящето изследване пробовземането е извършвано всеки месец от май до октомври 2015 г. и през април 2016 г. Изполваната цилиндрична стоманена сонда е с диаметър 8 cm и височина 15 cm (753.9 cm^3). Всеки месец са събирани проби от три почвени дълбочина (0–15, 15–30, 30–45 cm), на разстояние около 1 m от ствола на 12 случайно избрани дървета или общо по 36 броя коренови проби от пробна площ. Пробите са транспортирани до ИБЕИ–БАН и са обработени в рамките на 24 часа. Корените се отделят от почвата, промиват се с вода през лабораторни сита с размер на отворите 1 mm и 63 μm , измерват се и се сортират по размер на диаметъра в три класа: фини (0–2 mm), малки (2–5 mm) и средни (5–10 mm) (Böhm 1979).

В зависимост от състоянието си, корените се разпределят на две категории – „живи” и „мъртви”. За живи се считат корените, които са еластични и гъвкави и имат външно бледо оцветяване. За „мъртви“ се приемат корените, които са кафяви или черни на цвят, твърди и чупливи, в различни етапи на разлагане (Schuurman & Goedewaagen 1965, Brassard et al. 2011). След като се сортират по размер, класове и категории, корените се изсушават при температура 90°C в продължение на 48 часа до постоянно сухо тегло, след което се претеглят с точност до 0.01 g. Сухото тегло на живите корени представлява биомасата (B), а сухото тегло на мъртвите корени представлява некромасата (N). Данните за биомасата и некромасата са конвертирани от мерни единици за обем към площ и са представени в g m^{-2} . Кореновата маса (биомаса и некромаса) за всяка дълбочина на почвата (0–15, 15–30, 30–45 cm) и общата коренова маса (биомаса и некромаса до 0–45 cm) са изчислени за всеки клас корени. Общо са събрани, обработени и анализирани 1008 коренови проби.

4.3.3. Изчисляване на годишна продукция (Pa)

За изчисляване на годишната продукция на фините и малки корени (Pa ; $\text{g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) са използвани два подхода: "матрица на решенията" (Decision Matrix) и "максимум – минимум" (Maximum – Minimum).

"Матрица на решенията" (Decision Matrix, DM)

При използването на този подход годишната продукция [$\text{Pa}_{(\text{DM})}$] е равна на сумата от всички изчислени продукции (P) между две дати на пробовземане в продължение на една пълна година:

$$\text{Pa}_{(\text{DM})} = \sum P$$

Продукцията (P) между две дати на вземане на проби е изчислено чрез: 1) добавяне на разликите в биомасата (ΔB) и некромасата (ΔN), 2) чрез добавяне само на разликите в биомасата (ΔB) или 3) P равно на нула (Fairley & Alexander 1985).

Следните уравнения се прилагат при съответни обстоятелства:

$P = \Delta B + \Delta N$	а) ако биомасата и некромасата нарастват	(1)
	б) ако биомасата намалява, а некромасата нараства, но $\Delta B < \Delta N$	
$P = \Delta B$	а) ако биомасата нараства, а некромасата намалява	(2)
	а) ако биомасата и некромасата намаляват	
$P = 0$	б) ако биомасата намалява, а некромасата нараства, но $\Delta B > \Delta N$	(3)

"Максимум – минимум" (*Maximim – Minimit, MM*)

Годишната продукция [$P_{a(MM)}$] се получава чрез изваждане на минималната (B_{min}) от максималната (B_{max}) месечна стойност, получени за биомасата на фините и малките корени, независимо от другите стойности, измерени за една година (McClaugherty et al. 1982). Този подход използва данните само за биомасата.

$$P_{a(MM)} = B_{max} - B_{min}$$

4.3.4. Изчисляване на годишен оборот (TR) на финни корени

Изчислява се стойност, която показва колко пъти фината коренова биомаса се обновява за една година. Оборътът на фините корени може да бъде изчислен чрез използване на данни за максималната (B_{max}) и средната стойност (B_{mean}) на биомасата, получени чрез прилагане на двата подхода (DM и MM) за нейното определяне ($TR_{(DM)}$ и $TR_{(MM)}$).

Оборотът, изчислен на база на максималната биомаса ($TR_{B_{max}}$) на фините корени, се получава чрез разделяне на годишната продукция (P_a) на най-високата стойност на биомасата (B_{max}) (Gill & Jackson 2000):

$$TR_{B_{max}} = P_a / B_{max}$$

Средният годишен оборот на фините корени ($TR_{B_{mean}}$) се изчислява като отношение на годишната продукция на фини корени (P_a) към средната стойност, получена за биомасата (B_{mean}) (McClaugherty et al. 1982):

$$B_{mean} = \sum B / n \quad \begin{array}{l} n - \text{брой на събраните проби за една} \\ \text{година} \end{array}$$

$$TR_{B_{mean}} = P_a / B_{mean}$$

4.4. Определяне на концентрация на въглерод и азот във финни корени

От всяка пробна площ са анализирани 3 сборни коренови проби – за всеки месец и дълбочина (общо 252 проби). Анализът за определяне на концентрацията на въглерод и азот във фините корени е направен с C/N анализатор (CE Instruments Ltd, FlashEA 1112 Series) в Лабораторията за почвени анализи към Станцията за проучване на горите (Alice Holt Research Station – Forest Research), Хемпшир, Великобритания.

4.5. Определяне на запаси на въглерод в коренова система

Оценката на въглеродните запаси в дърветата изисква информация за сухото вещество и концентрацията на въглерод в различните органи. За изчисляване на запаса на въглерод и азот във фините корени са използвани концентрациите на двата елемента получени от анализа, описан в точка 4.4. За корените над 2 mm са използвани осреднени стойности за концентрации на въглерод изчислени на основата на литературни данни за груби корени от двата дървесни вида.

4.6. Определяне на годишен трансфер на въглерод и азот от фините корени

За изчисляване на годишния трансфер на въглерод и азот от фините корени в почвата (I_a , $\text{g m}^{-2} \text{y}^{-1}$) се използват данни за концентрацията на въглерод и азот във фините корени и годишната продукция. Изчислява се, като се умножи измерената концентрация за всеки елемент (C или N, %) с годишната продукция ($P_{a(\text{DM})}$, $\text{g m}^{-2} \text{y}^{-1}$) на фините корени (Xia et al. 2015):

$$I_{a(\text{C})} = P_a \times C$$

$$I_{a(\text{N})} = P_a \times N$$

4.7. Статистически анализи

Данните за некромасата, годишната продукция, оборота на фините корени и съдържанието на въглерод във фините корени между типовете гори, пробните площи и дълбочината на почвата бяха анализирани с помощта на непараметрични тестове (Mann–Whitney U test и Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks test). Времевата динамика на биомасата и некромасата беше анализирана с помощта на непараметричен тест за свързани извадки (Friedman ANOVA), последван от тест на Wilcoxon за сравнение по двойки при наличие на статистически значими разлики. Разпределението на данните за фината биомаса, годишния трансфер на въглерод и азот от фините корени към почвата и запаса на въглерод в корените бе нормализирано чрез Box-Cox трансформация. За тестване на разликите в биомасата, концентрацията на азот във фините корени, запаса на въглерод в корените и годишния трансфер на въглерод и азот от фините корени към почвата между типовете гори, пробните площи и дълбочините на почвата бяха използвани t -тест, еднофакторен (One-Way ANOVA) и многофакторен дисперсионен анализ (Factorial ANOVA). При последните два типа анализ беше приложен Bonferroni post-hoc тест за сравнение по двойки. Статистическите анализи бяха извършени със STATISTICA for Windows, версия 13.2.1 (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA).

5. Резултати и обсъждане

5.1. Основни почвени характеристики

Резултатите от анализа на основните почвени характеристики в изследваните екосистеми са представени в Таблица 2.

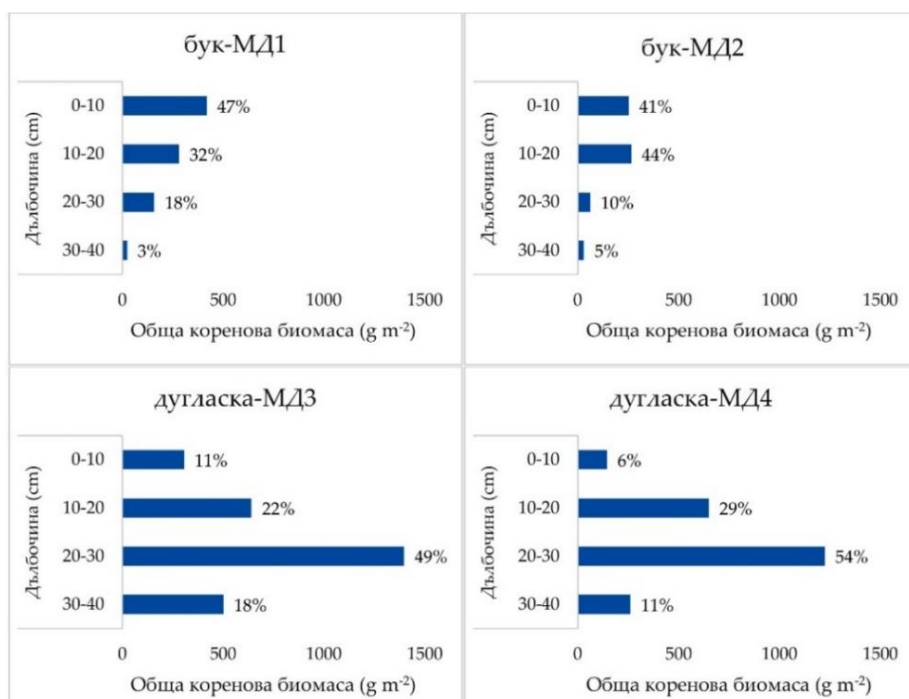
Таблица 2. Основни почвени характеристики в изследваните горски екосистеми.

Дървесен вид/ Пробна площ	Дълбочина (cm)	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	C (%)	N (%)	C/N	Обемна плътност (g cm ⁻³)	Скелетни фракции	
								% >1mm	% >3mm
Бук									
Fs 1	0–15	4.22	3.81	9.39	0.78	12	0.63	14.35	14.68
	15–30	4.58	4.09	4.38	0.39	11	0.72	22.20	23.50
	30–45	4.90	4.30	2.50	0.24	10	1.00	22.83	32.42
Fs 2	0–15	4.23	3.76	8.73	0.75	12	0.61	16.39	17.12
	15–30	4.41	3.91	5.67	0.50	11	0.66	21.20	26.20
	30–45	4.59	4.05	3.61	0.32	11	0.87	23.67	30.61
Дугласка									
Pm 1	0–15	5.34	4.77	2.61	0.14	19	0.97	4.03	1.51
	15–30	5.03	4.33	1.22	0.07	17	1.12	7.70	3.70
	30–45	5.09	4.26	0.59	0.04	15	1.14	11.32	5.13
Pm 2	0–15	5.02	4.24	1.02	0.06	17	1.25	13.73	1.82
	15–30	5.04	4.31	0.59	0.04	15	1.27	12.40	1.50
	30–45	5.61	4.89	0.80	0.06	13	1.13	15.35	4.95

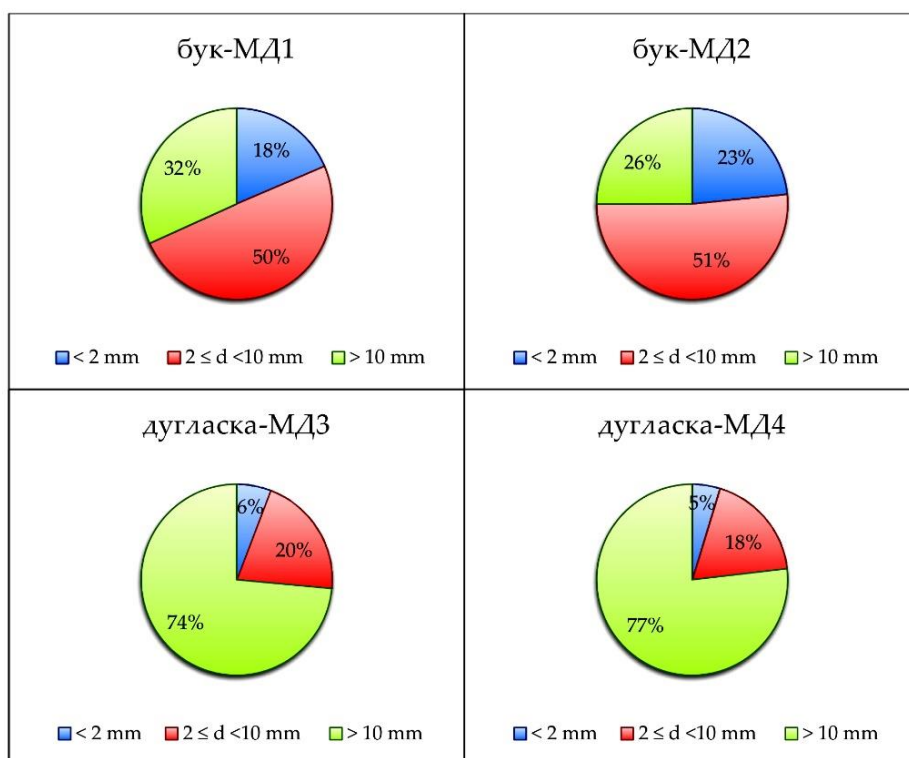
Реакцията на почвата (pH) е силно кисела в буковите гори и средно кисела в културите от дугласка. Съдържанието на въглерод и азот, както и на скелетните фракции се характеризират с по-високи стойности в буковите гори, докато обемната плътност е по-ниска. Получените по-високи стойности на съотношението C/N в почвите при дугласката (13–19) са показател за по-ниската степен на разграждане на органичната материя и по-ниска запасеност на почвата с азот.

5.2. Характеризиране на подземната дървесна биомаса – метод на Родин и др. (1968)

Измерените стойности на общата коренова маса, която включва всички размери корени до 40 cm дълбочина, са значително по-високи при дугласката в сравнение с бука (средни стойности 2562 и 745 g m⁻², съответно за дугласка и бук). Установени са различия в разпределението ѝ по дълбочини (Фиг. 3). С най-голямо процентно участие при бука са средните корени (ср. 50.5%), а най-ниско е количеството на фините корени (ср. 20.5 %), а при дугласката с най-голямо процентно участие са грубите корени с дебелина над 10 cm (ср. 75.5%) (Фиг. 4).



Фигура 3. Вертикално разпределение на общата коренова маса в четирите моделни дървета от бук (МД1 и МД2) и дугласка (МД3 и МД4)



Фигура 4. Процентно разпределение на корените по класове – фини ($d = 0-2$ mm), средни ($2 < d < 10$ mm) и груби ($d > 10$ mm) за всяко моделно дърво – МД1 и МД2 (бук) и МД3 и МД4 (дугласка).

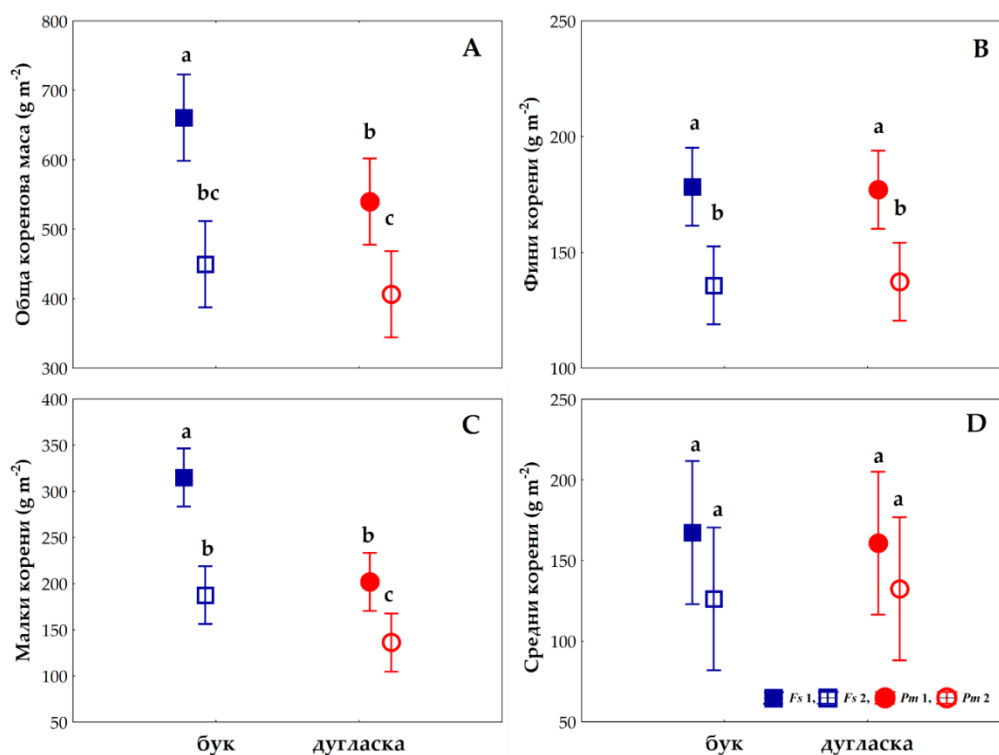
Изследваните коренови системи от бук и дугласка показват различни модели на разпределение на кореновата биомаса до 30 cm дълбочина (Фиг.3). Максимални стойности на биомасата са измерени в двата повърхностни почвени слоя (0–10 cm и 10–20 cm) при бука и в трети почвен слой (20–30 cm) – при дугласката. Това разпределение се обуславя от по-голямата биомаса на грубите корени на тези дълбочини. И при двата дървесни вида над 80% от общата коренова маса е разположена в орвано-минералния почвен слой до 30 cm дълбочина. Двата дървесни вида се различават по отношение на вертикалното разпределение на грубите корени, което наподобява моделите на вертикално разпределение на общата коренова биомаса. Биомасата на фините корени преобладава в най-горния почвен слой при дугласката и във втория слой – при бука. Установените различия в общата коренова маса и вертикалното разпределение на корените в дълбочина между двата дървесни вида биха могли да се дължат на комплекс от фактори, като: 1) значително по-голямата гъстота на буковите гори в сравнение с културите от дугласка, 2) различия в основните почвени характеристики в двата изследвания района и 3) видово-специфични особености в структурата на кореновите системи на двата дървесни вида.

5.3. Характеризиране на подземна дървесна биомаса – метод на “Последователно събиране на почвени проби”

На база на събираните ежемесечни данни, получени при прилагането на индиректния метод за оценка на дървесна коренова маса, са получени данни за основни характеристики на фините (0-2 mm), малки (2-5 mm) и средни (5-10 mm) корени в три почвени дълбочини (0–15, 15–30, 30–45 cm). Анализирани са запасите, вертикалното разпределение, времевата динамика, годишната продукция и оборота на изследваните класове корени при двата дървесни вида.

5.3.1. Подземна биомаса и разпределение на корените по класове на диаметър

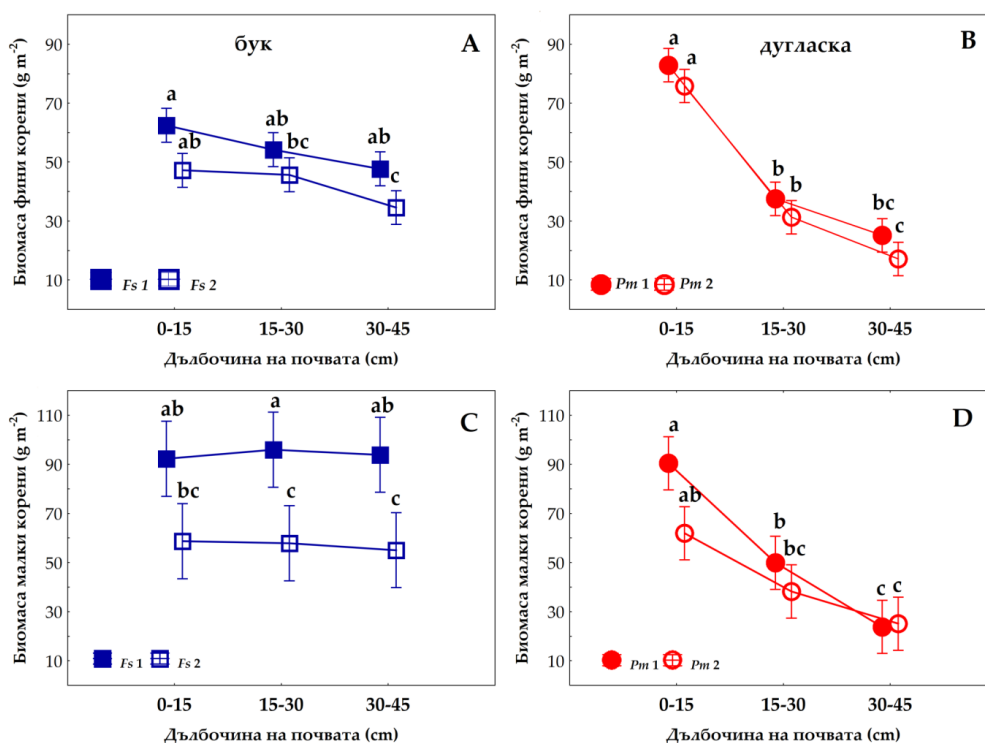
Общата коренова маса, включваща всички размери корени до 45 cm дълбочина на почвата, е значително по-висока в буковите гори в сравнение с културите от дугласка ($t(82) = 2.25$, $p = 0.027$), което се дължи на значително по-голямото количество малки корени в буковите гори ($t(82) = 4.65$, $p < 0.001$). Общата коренова маса и общата маса (биомаса и некромаса) на всеки клас корени показват различни модели на разпределение между изследваните пробни площи (Фиг. 5 A–D). Установената значително по-висока обща коренова маса (всички корени с диаметър < 10 mm на дълбочина до 45 cm) в буковите гори се дължи на значително по-високата биомаса на малките корени (2–5 mm) и предполага акумулиране на повече въглерод в тях. При някои характеристики на кореновата система (напр. обща коренова маса и обща маса на фините и малки корени) са установени по-големи различия между пробните площи от всеки дървесен вид, отколкото между двата вида. Значително по-високата маса на фините и малки корени в две от пробните площи ($Fs1$ и $Pm1$) би могла да се обясни с разликите в специфични характеристики на насажденията, т.е. по-малката гъстота на дърветата в тези пробни площи, в сравнение с пробните площи $Fs2$ и $Pm2$. Значително влияние на гъстотата на насажденията върху някои количествени характеристики и вертикалното разпределение на фините корени е установено и в гори от смърч (Helmisaari et al. 2007, Kucbel et al. 2011). Тези проучвания установяват линейна зависимост между общата биомаса на фините корени и гъстотата на насажденията, проявяваща се като положителна корелация на ниво насаждения, и отрицателна – на ниво единични дървета.



Фигура 5. Обща коренова маса (корени с диаметър <10 mm, 0–45 cm, n = 84) (A) и коренова маса (биомаса и некромаса, 0–45 cm) на фини (0–2 mm, n = 84) (B), малки (2–5 mm, n = 84) (C) и средни (5–10 mm, n = 84) (D) корени в изследваните пробни площи. Значимите разлики между пробните площи, установени чрез еднофакторен дисперсионен анализ (One-Way ANOVA) и Bonferroni post-hoc тест, са означени с различни латински букви. Тестовите са изчислени въз основа на Вох-Сох-трансформирани стойности за кореновата маса; по оста Y на фигурата са представени оригиналните стойности. Вертикалните колони показват доверителните интервали (95% SD) за всяка пробна площ.

5.3.2. Вертикално разпределение на кореновата биомаса

Вертикалното разпределение на биомасата на фините (Фиг. 6 A, B) и малки (Фиг. 6 C, D) корени показва различни модели в двата типа гори. При бука фините корени намаляват постепенно с увеличаване на дълбочината (съответно 38%, 34% и 28%), като се наблюдава статистически значима разлика в биомасата само между повърхностния и най-дълбокия почвен слой ($F_{2, 123} = 7.3$, $p < 0.001$, p (Bonferroni correction) < 0.02 ; Фиг. 6 A). Повече от половината биомаса (ср. 59%) фини корени в двете пробни площи от дугласка са концентрирани в първия почвен слой (0–15 cm) и намаляват значително с увеличаване на дълбочината (15–30 cm – ср. 25% и 30–45 cm – ср. 16%) ($F_{2, 123} = 123.7$, $p < 0.001$, Фиг. 6 B). Не се наблюдава ясно изразена стратификация във вертикалното разпределение на малките корени в буковите гори (34%, 33% и 32%) (Фиг. 6 C). При сравнение на двете пробни площи от бук е установено, че биомасата на малките корени е значително по-ниска в Fs2 и значими разлики са установени при сравняване на биомасата от втори и трети почвен слой (p (Bonferroni correction) < 0.01 , Фиг. 6 C). Разпределението на малките корени в дълбочина в културите от дугласка показва сходен модел с този при фините. Най-голяма е биомасата им в повърхностния слой (53%) и значително намалява с увеличаване на дълбочината (30% и 18%, съответно за втори и трети почвен слой, $F_{2, 123} = 37.6$, $p < 0.001$; Фиг. 6 D).



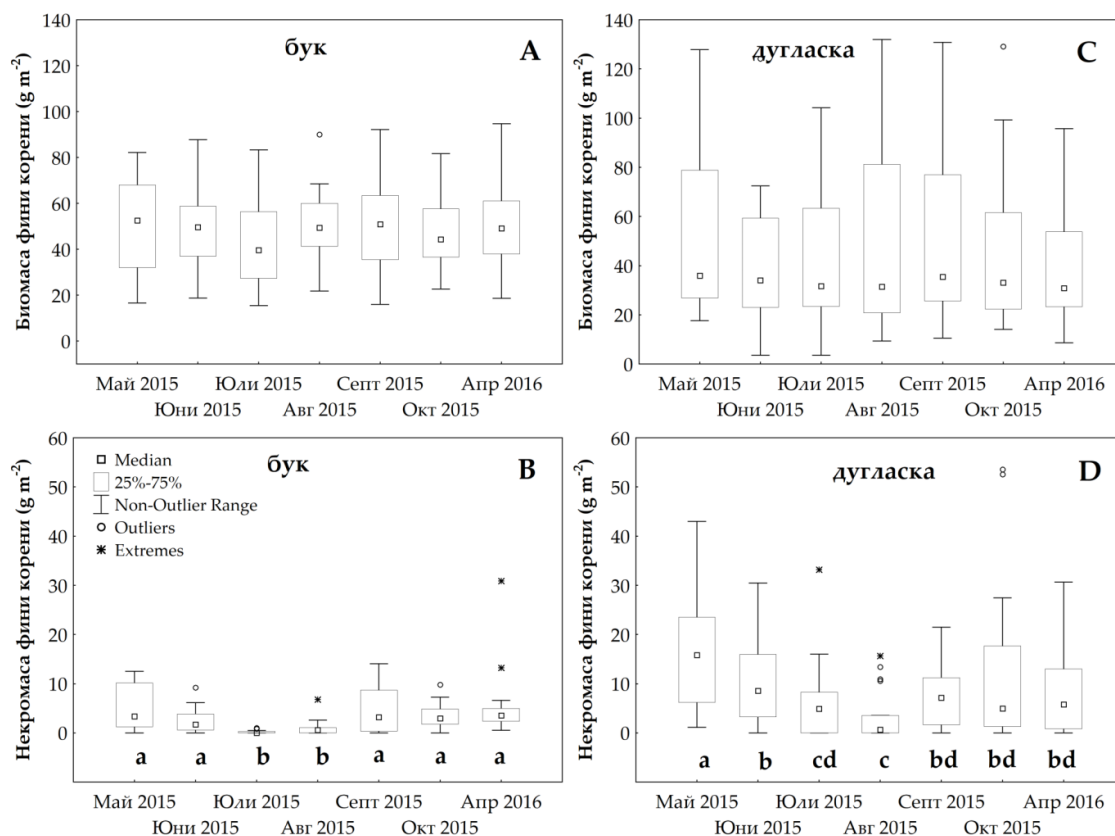
Фигура 6. Вертикално разпределение на фини (0–2 mm) (A, B) и малки (2–5 mm) (C, D) корени в пробните площи от бук (*Fs1* и *Fs2*, $n = 126$) и дугласка (*Pm1* и *Pm2*, $n = 126$). Статистически значимите разлики в кореновата биомаса между дълбочините на почвата и пробните площи, установени чрез многофакторен дисперсионен анализ (Factorial ANOVA) и Bonferroni post-hoc тест, са означени с различни латински букви. За тестовите са използвани Вох-Сох-трансформирани стойности за кореновата биомаса; по оста Y на фигурата са представени оригиналните стойности. Вертикалните колони показват доверителните интервали (95% SD) за всяка дълбочина на почвата.

Контрастните модели на разпределение на корените в това изследване и наблюдаваните различия в предходни проучвания, могат да бъдат свързани както с архитектурата на кореновата система на дървесните видове (Moser et al. 2016), така и с фенотипната пластичност на корените в отговор към локалните условия на средата (Hertel et al. 2013). Количеството и разпределението на влагата и хранителните вещества (Forde & Lorenzo 2001, Grossman & Rice 2012) също може да обясни по-високата биомаса на фините и малки корени в най-горния почвен слой в културите от дугласка и относително равномерното разпределение, наблюдавано в буковите гори. Значително по-високото съдържание на въглерод и азот и по-високата степен на минерализация (C/N) в буковите гори, както и по-малката обемна плътност на почвата (Таблица 2) предполагат по-благоприятни условия за растеж на корените в дълбочина при буковите гори в сравнение с почвените условия в културите от дугласка. По-голямото количество валежи (Таблица 1) и по-слабата евапотранспирация в буковите гори в сравнение с културите от дугласка (Nisbet 2005), осигуряват наличието на по-добра водозапасаеност на почвите и при по-големи дълбочини, което благоприятства растежа и развитието на фините корени на бука.

5.3.3. Годишна динамика на коренова биомаса и некромаса

Времовата динамика на биомасата и некромасата при фините и малките корени показват сходни тенденции. И при двата типа гори, биомасата на фините корени варира в периода на изследване, но не е установена статистически значима разлика между месеците, в които са събирани проби (Фиг. 7 A, C). Некромасата на фините корени намалява, достигайки своя минимум през м. юли в буковите гори и през м. август в културите от дугласка, след което отново нараства. И при двата дървесни вида бяха установени

статистически значими разлики при сравняване на некромасата (0–45cm) между отделните месеци (бук χ^2 (N = 18, df = 6) = 44.0, $p < 0.001$) и дугласка (χ^2 (N = 18, df = 6) = 39.7, $p < 0.001$), Фиг. 7 В, D) и тези разлики са значими за всяка една от изследваните дълбочини. Установените модели във времевата динамика на биомасата и некромасата на малките корени са подобни на тези при фините корени.



Фигура 7. Времева динамика на биомасата (A, C) и некромасата (B, D) на фините корени (0–45 cm) при бук (A, B) и дугласка (C, D). Различните букви под вертикалните колони показват статистически значими разлики ($p < 0.05$) между месеците, установени чрез тест на Friedman за множество сравнение и тест на Wilcoxon за сравнение по двойки.

Нарастването на корените на дърветата е свързано със сезонните промени и основно зависи от абиотичните фактори на средата. Въпреки, че двата изследвани дървесни вида принадлежат към два функционално различни типа растителност и изследваните горски екосистеми са разположени в два отдалечени един от друг района, се установяват сходни тенденции в динамиката на кореновата биомаса и некромасата. Месечните колебания в биомасата, както при фините, така и при малките корени през целия изследван период бяха незначителни и съответстват на „равномерно разпределен модел” (McCormack et al. 2014).

5.3.4. Годишна продукция и оборот

Общата годишна продукция на фините корени ($P_{a(DM)}$, 0–45 cm) е по-висока при бука (ср. 162.2 g/m²) в сравнение с дугласката (ср. 117.4 g/m²), но не се различават статистически между пробните площи от всеки дървесен вид и между двата дървесни вида. В дълбочина не са установени значими различия в годишната продукция на фините корени в буковите гори, докато в културите от дугласка годишната продукция на фините корени в най-горния слой (0–15 cm) е значимо по-висока в сравнение с продукцията в по-дълбоките

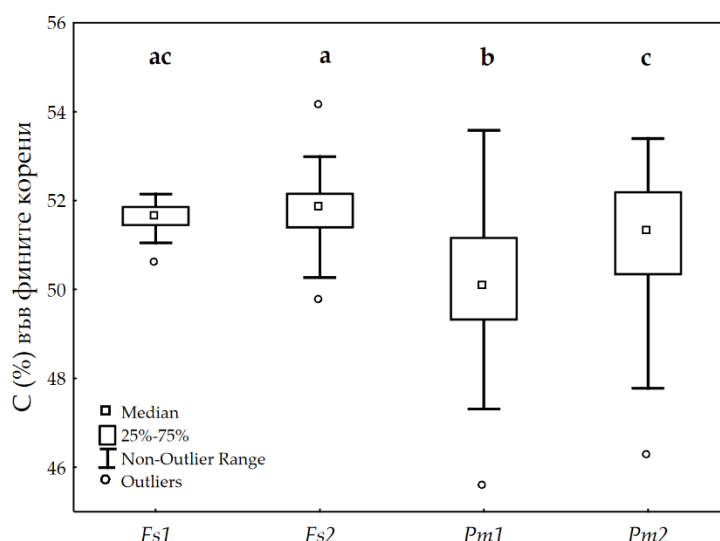
почвени слоеве ($Pa_{(DM)}$), множествено сравнение: $H(2, N = 18) = 8.9, p = 0.01$; сравнения по двойки: между 0–15 и 15–30 cm, $p = 0.045$ и между 0–15 и 30–45 cm, $p = 0.01$).

Средните стойности на оборота на фините корени при бука и дугласката варират в тесни граници и се различават според приложеният подход на изчисление ($TR_{(DM)} V_{mean}$ 1.17 и 1.04, $TR_{(DM)} V_{max}$ 0.80 и 0.73; $TR_{(MM)} V_{mean}$ 0.81 и 0.88, $TR_{(MM)} V_{max}$ 0.54 и 0.61). Bruner et al. (2013) обобщават публикуваните данни от изследвания върху оборота на фини корени, проведени в европейските гори. Авторите предлагат при изготвяне на прогностични модели и оценки на запаса на въглерод в гори от бук и смърч да бъдат използвани темпове на оборот съответно 0.86 ug^{-1} и 0.88 ug^{-1} ($TR_{(DM)} V_{max}$) и 1.11 ug^{-1} за двата дървесни вида, когато се използват данни, изчислени със средна биомаса ($TR_{(DM)} V_{mean}$). Получените при настоящото изследване данни за средните темпове на оборот на фините корени [0.76 ug^{-1} ($TR_{(DM)} V_{max}$) и 1.11 ug^{-1} ($TR_{(DM)} V_{mean}$)] за двата типа гори са по-близки до средните, предложени за Централна и Северна Европа, и по-високи в сравнение с тези, установени в проучвания от Южна Европа (Brunner et al. 2013). Това може отчасти да се дължи на по-сухите и по-топли климатични условия или на по-ниските степени на разлагане и темп на оборот на корените в районите на Средиземноморието.

5.4. Роля на подземната дървесна биомаса от бук и дугласка за акумулиране на въглерод и трансфер на въглерод и азот в почвата.

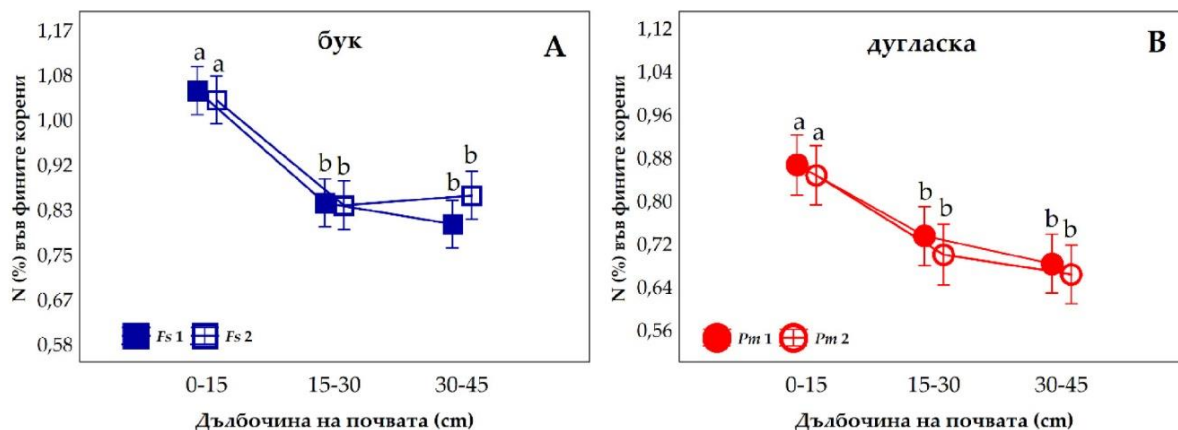
5.4.1. Съдържание на въглерод и азот в кореновата система на бук и дугласка

Процентното съдържание (концентрацията) на въглерод ($C_{(FR)}$) и азот ($N_{(FR)}$) и тяхното съотношение ($C/N_{(FR)}$) във фините корени от бук и дугласка са визуализирани на фигури 8–10. Установени са статистически достоверни разлики в концентрациите на въглерод във фините корени до 45 cm дълбочина при сравняване на двата дървесни вида и пробните площи ($H(3, N = 248) = 55.8, p < 0.001$, Фиг. 8). Концентрацията на въглерод във фините корени не се различава достоверно между двете пробни площи от бук, но е по-висока от тази в пробните площи от дугласка. В културите от дугласка се установяват статистически значими разлики между двете площи. Не са установени статистически значими различия между отделните почвени слоеве и при двата дървесни вида.



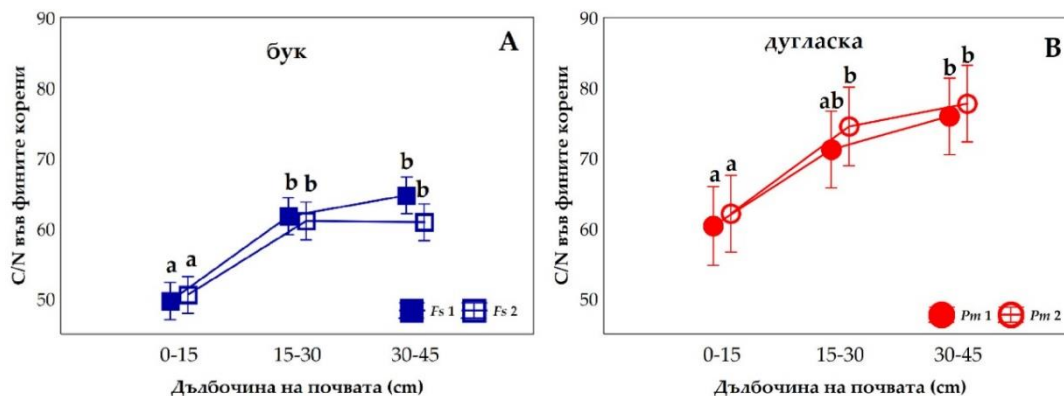
Фигура 8. Концентрация на въглерод във фините корени до 45 cm в пробните площи от бук (Fs1 и Fs2) и дугласка (Pm1 и Pm2). Статистически значимите разлики в съдържанието на въглерод в корените между пробните площи, установени чрез непараметрични тестове (Kruskal-Wallis ANOVA и тест на Wilcoxon за сравнение по двойки), са означени с различни латински букви.

Концентрацията на азот във фините корени до 45 cm дълбочина е значително по-висока в буквите гори в сравнение с културите от дугласка ($t(247) = 8.72$, $p < 0.001$). И при двата дървесни вида са установени статистически значими разлики във вертикалното разпределение на $N_{(FR)}$ (Фиг. 9 А, В). Съотношението $C/N_{(FR)}$ до 45 cm дълбочина е значително по-ниско в буквите гори в сравнение с културите от дугласка ($t(247) = -8.4$, $p < 0.001$) и отново бяха установени статистически значими разлики във вертикалното разпределение на $C/N_{(FR)}$ и при двата вида (Фиг. 10 А, В).



Фигура 9. Концентрация на азот във фините корени от бук (А) (Fs1 и Fs2, $n = 126$) и дугласка (В) (Pm1 и Pm2, $n = 126$), представена по пробни площи и почвени дълбочини/слоеве. Статистически значимите разлики между почвените дълбочини и пробните площи, установени чрез многофакторен дисперсионен анализ (Factorial ANOVA) и Bonferroni post-hoc тест, са означени с различни латински букви.

Установената в настоящото изследване средна концентрация на въглерод за двата вида е 50.5 (47.9 – 51.8)% и надхвърля средната стойност за Европейските гори, но се доближава до средната стойност 49.2%, установена при предходно проучване в широколистни и иглолистни гори от България (Димитрова и др. 2014). Измерените концентрации на въглерод в горите от бук (51.1%) са около 1.4% по-високи от измерените за културите от дугласка (49.7%) и се различават значимо между двата типа гори. Подобна е разликата (1.5%) между средните стойности за широколистни и иглолистни дървесни видове (съответно 48.9% и 47.4%), установени от Европа (Neumann et al. 2019). За определяне на запаса на въглерод в корените над 2 mm са използвани осреднени стойности за концентрации на въглерод (49% за дугласка и 48.5% за бук), изчислени на основата на литературни данни за груби корени от двата дървесни вида.



Фигура 10. Съотношение C/N във фините корени от бук (А) (Fs1 и Fs2, $n = 126$) и дугласка (В) (Pm1 и Pm2, $n = 126$), представено по пробни площи и почвени дълбочини/слоеве. Статистически

значимите разлики между почвените дълбочини и пробните площи, установени чрез многофакторен дисперсионен анализ (Factorial ANOVA) и Bonferroni post-hoc тест, са означени с различни латински букви.

5.4.2. Оценка на запасите от въглерод в подземната дървесна биомаса в гори от бук и култури от дугласка

На основа на теглото на сухата биомаса и концентрацията на въглерод в трите основни категории корени – фини (0-2 mm), средни (2-10 mm) и груби (> 10 mm) – е направена оценка на капацитета на кореновата система на двата изследвани дървесни вида за краткосрочно и дългосрочно съхранение на въглерод. Чрез данните за биомасата, получени като резултат от прилагането на двата метода за изследване на подземната дървесна биомаса, са изчислени и обобщени запасите на въглерод за всяка пробна площ, разпределени по класове корени (Таблица 3). Разпределението на запаса на въглерод по класове корени корелира с теглото на сухата биомаса за всеки клас. С изключение на стойностите за запас на въглерод в средните корени при дугласката, изчислените запаси на въглерод във фините и средни корени са сходни при сравняване на двата метода. Получените количества въглерод в резултат от прилагането на метода на Родин и др. (1968) показват, че букът се характеризира с най-голям запас на въглерод в средните корени, докато преобладаваща част от запаса на въглерод при дугласката се акумулира в грубите корени. При сравняване на двата дървесни вида (метод на „Последователно събиране на почвени проби“) са установени статистически достоверни разлики в запаса на въглерод във фините и средни корени. Запасът на въглерод във фините и средните корени е значително по-висок в буковите гори в сравнение с културите от дугласка (фини корени: $t(247) = 2.5$, $p = 0.01$, средни корени: $t(250) = 2.5$, $p < 0.001$).

Таблица 3. Запаси на въглерод (gC m^{-2}), изчислени на основата на общата коренова биомаса на фини (0-2 mm), средни (2-10 mm) и груби корени (>10 mm), установени с модифициран метод на Родин и др. (1968) и метод на „Последователно събиране на почвени проби“ в изследваните букови гори (*Fs1* и *Fs2*) и култури от дугласка (*Pm1* и *Pm2*). Данните са представени като средна аритметична стойност $\pm$ стандартна грешка.

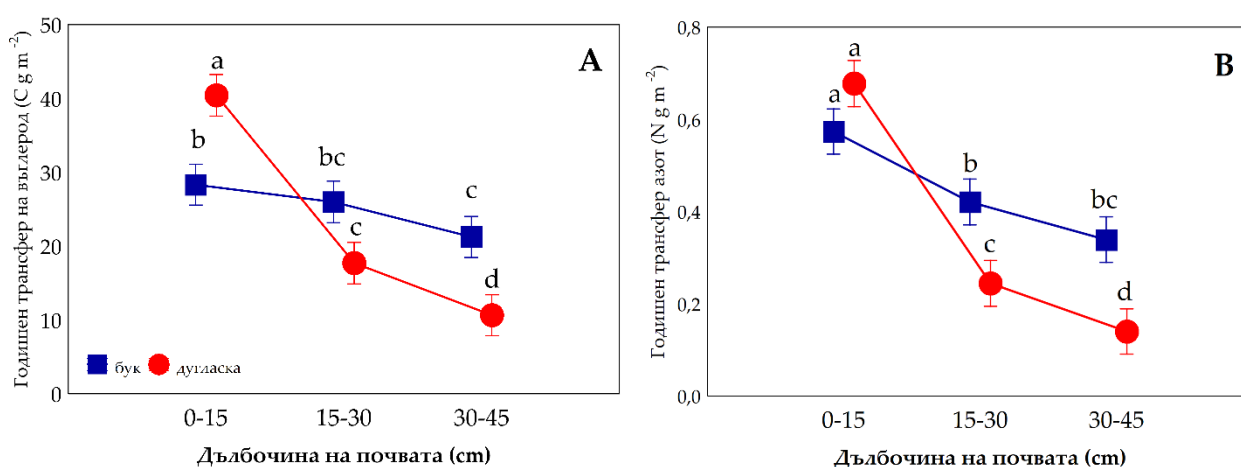
Диаметър на корените	Биомаса (g m^{-2})			Запас на въглерод (gC m^{-2})		
	0-2 mm	2-10 mm	>10 mm	0-2 mm	2-10 mm	>10 mm
Модифициран метод на Родин и др. (1968)						
Бук	150.5 $\pm$ 13.1	375.8 $\pm$ 6.4	219.1 $\pm$ 61.0	77.1 $\pm$ 7.4	187.9 $\pm$ 31.2	109.6 $\pm$ 30.5
МД1 – <i>Fs1</i>	163.5 $\pm$ 14.8	438.2 $\pm$ 31.0	280.0 $\pm$ 65.1	84.4 $\pm$ 7.6	219.1 $\pm$ 15.0	140.0 $\pm$ 26.8
МД2 – <i>Fs2</i>	137.4 $\pm$ 13.9	313.4 $\pm$ 29.6	158.1 $\pm$ 22.3	69.7 $\pm$ 7.1	156.7 $\pm$ 14.4	79.1 $\pm$ 10.9
Дугласка	126.3 $\pm$ 26.9	498.8 $\pm$ 77.9	1936.9 $\pm$ 177.9	62.9 $\pm$ 12.9	249.5 $\pm$ 39.2	968.5 $\pm$ 89.0
МД3 – <i>Pm1</i>	153.2 $\pm$ 14.4	576.7 $\pm$ 37.7	2114.7 $\pm$ 246.6	75.7 $\pm$ 7.1	288.4 $\pm$ 18.5	1057.4 $\pm$ 120.8
МД4 – <i>Pm2</i>	99.4 $\pm$ 12.5	420.9 $\pm$ 49.7	1759.0 $\pm$ 187.0	50.0 $\pm$ 6.3	210.5 $\pm$ 24.3	879.5 $\pm$ 103.7
„Последователно събиране на почвени проби“ (Sequential Soil Coring)						
Бук	146.4 $\pm$ 18.9	362.8 $\pm$ 77.6		74.9 $\pm$ 10.3	175.9 $\pm$ 35.2	
<i>Fs1</i>	165.2 $\pm$ 5.5	435.3 $\pm$ 7.8		85.2 $\pm$ 2.2	211.1 $\pm$ 3.8	
<i>Fs2</i>	127.5 $\pm$ 5.3	290.2 $\pm$ 8.7		64.6 $\pm$ 2.0	140.7 $\pm$ 4.2	
Дугласка	134.9 $\pm$ 10.6	273.9 $\pm$ 22.7		67.2 $\pm$ 4.7	134.2 $\pm$ 11.1	
<i>Pm1</i>	145.5 $\pm$ 6.6	296.6 $\pm$ 18.3		71.9 $\pm$ 8.7	145.3 $\pm$ 9.2	
<i>Pm2</i>	124.3 $\pm$ 5.0	251.2 $\pm$ 12.1		62.5 $\pm$ 8.9	123.1 $\pm$ 5.9	

Резултатите от двата метода за изследване на кореновата система показват, че букът се характеризира с по-голям запас на въглерод в корените до 10 mm и по-високи стойности на годишен трансфер на въглерод от фините корени към почвата в сравнение с дугласката. Същевременно, запасът на въглерод в грубите корени с размер над 10 mm при дугласката е значително по-висок (968.5 gC m^{-2}) в сравнение с бука (109.6 gC m^{-2}). Макар и на основата на малък брой изследвани дървета, този резултат ни дава основание да предположим, че дугласката е вид, който се характеризира с по-висок капацитет да секвестрира въглерод в кореновата система в сравнение с бука, което се потвърждава и от по-ниските стойности на въглерод в почвата в пробните площи с дугласка (Таблица 2). Данни от изследване във Франция определят дугласката като най-ефективният дървесен горски вид в секвестрирането на въглерод (Bastien 2019) в сравнение с други дървесни видове, включително бук. Изследванията, оценяващи съдържанието на въглерод в груби корени са значително по-оскъдни и в много случаи непълни, поради трудностите, свързани с провеждането на комплексни изследвания върху биомаса, динамика и пространствена структура на кореновата система на дървесни растения.

5.4.3. Годишен трансфер на въглерод и азот от фините корени към почвата

Данните за количеството на постъпващите в почвата въглерод и азот чрез годишната продукция на фините корени, наричано по-долу годишен трансфер ($I_{a(C)}$ и $I_{a(N)}$), са представени на Фигура 11. Годишният трансфер на въглерод ($I_{a(C)}$) и азот ($I_{a(N)}$) от фините корени към почвата до 45 cm дълбочина е по-висок при бука в сравнение с дугласката ($I_{a(C)}$: $t(247) = 2.75$, $p < 0.001$, $I_{a(N)}$: $t(247) = 4.73$, $p < 0.001$). При бука годишният трансфер на въглерод и на азот постепенно намалява с увеличаване на дълбочината. Годишният трансфер на въглерод е статистически значимо по-висок в повърхностния в сравнение с най-дълбокия почвен слой ($I_{a(C)}$: $F_{2, 119} = 7.6$, p (Bonferroni correction) < 0.001), но не се различава достоверно между всеки от тях и междинния почвен слой (Фиг. 11 А). Годишният трансфер на азот ($I_{a(N)}$) при бука е статистически значимо по-висок в повърхностния почвен слой в сравнение с по-долните два почвени слоя ($F_{2, 119} = 24.8$, p (Bonferroni correction) < 0.001 , а разликата между втория и третия почвен слой не е достоверна (Фиг. 11 В).

При дугласката се наблюдава рязко намаляване на годишния трансфер на въглерод и азот в почвата с увеличаване на дълбочината: трансферът на елементите се различава статистически значимо между всеки от трите почвени слоя ($I_{a(C)}$: $F_{2, 118} = 117.6$, p (Bonferroni correction) < 0.001 ; $I_{a(N)}$: $F_{2, 118} = 132.4$, p (Bonferroni correction) < 0.001) (Фиг. 11).



Фигура 11. Годишен трансфер на въглерод (А) и азот (В) от фините корени към почвата в изследваните букови гори и култури от дугласката. Статистически значимите разлики между

почвените слоеве при всеки от двата дървесни вида (бук и дугласка), установени чрез многофакторен дисперсионен анализ (Factorial ANOVA) и Bonferroni post-hoc тест, са означени с различни латински букви.

Установен е сходен модел на постъпване на въглерод и азот по почвени слоеве, свързан с изменчивостта на годишната продукция на фините корени в дълбочина на почвения профил. В буковата гора годишният трансфер на въглерод и азот от фините корени не се променя съществено с нарастване на дълбочината. При културите от дугласка се наблюдава ясно изразена вертикална стратификация в годишния трансфер на двата елемента, който намалява значително с нарастване на дълбочината. Тенденцията на изменение в годишния трансфер в културите от дугласка наподобява тенденцията, установена в съотношението C/N в почвата по дълбочини (Таблица 2), което варира в по-широки граници (13–19) и намалява съществено с увеличаване на дълбочината.

По-високият запас на въглерод във фините и средни корени и по-високите стойности на годишния трансфер и оборот на фините корени при бука предполага по-голям потенциал на кореновата система на бука да секвестрира въглерод към почвеното органично вещество, което се свързва и с по-високото съдържание на въглерод в почвата в двете букови гори. Същевременно, по-големият запас на въглерод, установен в грубите корени на дугласката показва, че това е вид, който има потенциал да секвестрира въглерод предимно в грубите корени и чрез тях той да бъде дългосрочно съхранен и разпределен на по-големи дълбочини.

6. Обобщение, изводи и приноси

Настоящото проучване върху основни характеристики на кореновите системи на два дървесни вида (бук и дугласка) в два типа горски екосистеми (широколистни естествени и иглолистни култури) и направената оценка на ролята на подземната дървесна биомаса за акумулиране на почвен въглерод, дават възможност да бъдат направени следните по-важни заключения:

За всеки дървесен вид е установен специфичен модел на вертикално разпределение на кореновата биомаса по класове на диаметър. Общата коренова биомаса (фини, средни и груби корени) на дугласката е значително по-висока в сравнение с тази на бука. При дугласката е установено постепенно нарастване на общата коренова биомаса в дълбочина на почвата, достигаща максимално количество между 20 и 30 cm. При бука, общата коренова маса е концентрирана в повърхностните органо-минерални почвени слоеве (0–10 и 10–20 cm) и намалява рязко в дълбочина на почвения профил. При дугласката, грубите корени ($d > 10$ mm) имат най-висок относителен дял (76%) от общата коренова биомаса, докато при бука – с най-висок относителен дял са средните корени ($2 < d < 10$ mm, 50%).

Определени са запаса и годишната продукция на фини и малки корени в двата типа горски екосистеми и е характеризирана тяхната изменчивост по месеци, пробни площи и почвени дълбочини. Установени са специфични модели на вертикално разпределение на двата класа корени при изследваните дървесни видове. За дугласката е характерна ясно изразена тенденция на значително намаляване на биомасата с увеличаване на почвената дълбочина, докато при бука – е установена тенденция на плавно намаляване в дълбочина на почвения профил.

Установени са сходни тенденции в основни характеристики на фините корени (времева динамика на био- и некромасата, годишна продукция и оборот), въпреки че изследваните дървесни видове формират два различни типа горски екосистеми разположени в различни географски райони.

Месечните колебания в биомасата на фините и малките корени са незначителни и съответстват на „равномерно разпределен модел“. За разлика от биомасата, годишната динамика на некромасата при двата класа корени показва по-ясно изразена тенденция, с най-високи стойности, регистрирани през пролетта и есента, и най-ниски – през лятото (м. юли в буковите гори и м. август в културите от дугласка).

Средният годишен оборот на фините корени в изследваните горски екосистеми, изчислен чрез "Матрица на решенията" ($TR_{(DM)}$) и използване на средни (V_{mean}) и максимални (V_{max}) стойности за биомасата, са съответно 1.11 yr^{-1} и 0.76 yr^{-1} . Получените данни са сходни до средните стойности, публикувани за гори от Централна и Северна Европа и значимо по-високи в сравнение с тези, съобщени за гори от Южна Европа.

Анализирано са съдържанието на въглерод, азот и съотношението C/N във фините корени и е характеризирана изменчивостта по пробни площи и почвени дълбочини. И при двата дървесни вида не е установена значима изменчивост на концентрацията на въглерод в дълбочина. Установени са значимо по-високи стойности на концентрациите на въглерод и азот, и по-ниски на съотношението C/N във фините корени в горите от бук в сравнение с културите от дугласка. По-високите стойности на съотношението C/N във фините корени в културите от дугласка и в двата по-дълбоки почвени слоя в сравнение с повърхностния почвен слой е показател за по-дълъг живот на корените и по-нисък темп на оборот.

По-високият запас на въглерод във фините и средни корени и по-високите стойности на годишния трансфер и оборот на фините корени при бука предполагат по-голям потенциал на кореновата система на бука да секвестрира въглерод към почвеното органично вещество, което обуславя по-високото съдържание на въглерод в почвата в двете букови гори. Същевременно, по-големият запас на въглерод в грубите корени на дугласката показва, че това е вид, който има потенциал да акумулира въглерод предимно в грубите корени, чрез които може дългосрочно да бъде съхранен и разпределен на по-големи дълбочини.

Установен е специфичен за всеки дървесен вид модел на вертикална изменчивост на годишния трансфер на въглерода, аналогичен на моделите на вертикално разпределение на биомасата и годишната продукция на фините корени. Годишният поток на въглерод е по-висок в буковите гори в сравнение с културите от дугласка.

Изводи

Изследването дава основание да се направят следните основни изводи:

1. Общата коренова биомаса (фини, средни и груби корени) е значително по-висока в културите от дугласка в сравнение с горите от бук.
2. Двата дървесни вида показват различни модели на вертикално разпределение на общата коренова биомаса: 1) постепенно нарастваща в дълбочина при дугласката и 2) концентрирана в повърхностните почвени слоеве и намаляваща рязко в дълбочина при бука.
3. Установен е специфичен за всеки дървесен вид модел на вертикално разпределение на биомасата на фините корени: 1) концентрирана в повърхностния слой и рязко намаляваща в дълбочина в културите от дугласка и 2) равномерно намаляваща в дълбочина в горите от бук.
4. И при двата типа горски екосистеми са установени сходни тенденции в динамиката на кореновата био- и некромаса, а стойностите за годишната продукция и оборота на фините корени варират в близки граници.

5. Установени са незначителни месечни колебания в биомасата на фините и малки корени, което съответства на „равномерно разпределен модел”. Динамиката на некромасата на изследваните видове показва най-високи стойности през пролетта и есента, и най-ниски – през лятото.
6. Средните стойности за годишния оборот на фините корени в двата типа гори са сходни с установените за гори от Централна и Северна Европа и по-високи в сравнение с тези от Южна Европа.
7. Значимо по-високи стойности на концентрациите на въглерод и азот, и по-ниски на съотношението C/N във фините корени са установени в горите от бук в сравнение с културите от дугласка. Концентрацията на въглерод във фините корени не се променя в дълбочина на почвения профил.
8. Двата типа екосистеми показват специфични модели на вертикална изменчивост на годишния трансфер на въглерод чрез фините корени, които са аналогични на моделите на вертикално разпределение на биомасата и годишната продукция на фините корени. Годишният трансфер на въглерод е по-висок в буковите гори.
9. Обикновеният бук се характеризира с по-голям потенциал да секвестрира въглерод към почвата чрез фините корени. По-голямата биомаса на грубите корени при дугласката показва, че видът акумулира въглерод предимно в тях, което способства за неговото дългосрочно съхраняване. По-високите стойности на съотношението C/N във фините корени в културите от дугласка е показател за по-дълъг живот на корените и по-нисък темп на оборот.

Приноси

Оригинални научни приноси

1. За първи път са установени и сравнени по единна методика основни характеристики на кореновите системи на два дървесни вида, значими за горското стопанство у нас, и е направена оценка на потенциала на два типа горски екосистеми (широколистна естествена и иглолистна култура) да секвестрират въглерод в специфични за България климатични и едафични условия.
2. За първи път са представени данни за концентрацията и запасите на въглерод и азот във фини корени на дугласка в Европа, както и данни за годишния трансфер на въглерод и азот към почвата.
3. За първи път е установено, че средният годишен оборот на фините корени в гори от бук и култури от дугласка от планински райони на България е със стойности, по-близки до установените за гори от Централна и Северна Европа в сравнение с гори от Южна Европа.

Потвърдителни научни приноси

4. Получени са нови данни за основни характеристики на кореновите системи на два дървесни вида (бук и дугласка) в два типа горски екосистеми (широколистни естествени и иглолистни култури).
5. Допълнени са познанията за вертикалното разпределение на кореновата биомаса с нови данни за корени от различни класове.
6. Получени са нови данни за съдържанието на въглерод, азот и съотношението C/N в фини корени от бук и дугласка и е характеризирана тяхната изменчивост в дълбочина на почвения профил.

7. Допълнени са познанията за значението на фините корени за динамиката на въглерод с нови данни за концентрацията на въглерод, годишната продукция и оборота на фините корени.
8. Характеризирана е ролята на кореновата биомаса на два дървесни вида за акумулиране на въглерод в почвата в контекста на капацитета на горските екосистеми да регулират кръговрата на въглерода.

Научно-приложни приноси

9. Получените данни за основни коренови характеристики на двата дървесни вида и двата типа горски екосистеми ще бъдат предоставени на международната база данни – FRED и могат да бъдат използвани за моделиране на процеси в горски екосистеми.
10. Получената информация за важни структурни и функционални характеристики за кореновата биомаса от двата типа гори, разположени в южната част на Европа, могат да бъдат използвани от научни и други референтни бази данни във връзка с оценката и остойностяването на екосистемните услуги, предоставяни от горите.

7. Публикации, свързани с дисертационния труд

1. Lozanova, L., Zhiyanski, M., Vanguelova, E., Doncheva, S., & Ferezliev, A. (2018). Root biomass and root distribution in two different forest ecosystems in Bulgaria. PROCEEDING PAPERS of the International Scientific Conference “90 Years Forest Research Institute – for the Society and Nature”, CLORIND, 2018, ISBN:978-619-7379-28-0, 197-20
2. Lozanova, L., Zhiyanski, M., Vanguelova, E., Doncheva, S., Marinov, M. P., & Lazarova, S. (2019). Dynamics and Vertical Distribution of Roots in European Beech Forests and Douglas Fir Plantations in Bulgaria. *Forests*, 10 (12), 1123. <https://doi.org/10.3390/f10121123>

8. Участие в научни форуми

1. Lozanova L., Vanguelova E., Zhiyanski M., & Doncheva S. 2016. Comparison of roots traits under different tree species as influenced by soil type in forest ecosystems in Bulgaria and the UK” *4th Annual Meeting of BioLink Project „Soil biodiversity and Ecosystem Services”*, 12–14 April 2016, Sofia, Poster.
2. Zhiyanski M., & Lozanova L. 2016. Seasonal dynamics of fine root biomass in selected forest stands”. *5th Annual Meeting of BioLink Project „Linking belowground biodiversity and ecosystem function in European forest”*, 24–26 October 2016, Prague, Czech Republic, Poster.
3. Lozanova L., Zhiyanski M., Doncheva S., & Ferezliev A. 2018. “Root biomass and root distribution in two different forest ecosystems in Bulgaria“ In *Proceedings of the International Scientific Conference „90 Years Forest Research Institute – for the Society and Nature”*, 24–26 October 2018, Sofia, Poster.
4. Lozanova L., Doncheva S., Marinov P. M., Vanguelova V., Lazarova S., & Zhiyanski M. 2020. „Quantification, dynamics and vertical distribution of fine root carbon content, stocks and fluxes in European beech forests and Douglas Fir plantations in Bulgaria“, International Scientific Conference “*Forestry: Bridge to the Future*”, 6–9 May 2020, Sofia.

Декларация за оригиналност и достоверност

от Людмила Миткова Лозанова

Във връзка с провеждането на процедура за защита на дисертация за придобиване на научна и образователна степен „доктор“ в Института по биоразнообразие и екосистемни изследвания към БАН, декларирам:

1. Резултатите, обсъжданията и изводите в научната продукция, които предоставям в процедурата, са оригинални и не са заимствани без цитиране от изследвания и публикации, в които нямам участие.

2. Представената от мен информация във вид на копия на документи и публикации, лично съставени справки и др. съответства на обективната истина.

15.03.2020 г.
гр. София

Декларатор:
Л. Лозанова

9. Списък с приложения

Приложение 1. Таксационни описания.

Приложение 2. Таблица П1. Публикувани данни за разпределението на корените по класове, годишна продукция и оборот на фините в букови гори в Европа.

Приложение 3. Таблица П2. Публикувани данни за разпределението на корените по класове, годишна продукция и оборот на фините и малките корени в гори от дугласка.

10. Литература

- Бъчваров, Д., Петков, П., Сидеров, К. (1976). Към характеристиката на кореновата система на дъбови насаждения в Източни Родопи. *Горскостопанска наука*, 2, 3–7.
- Димитрова, В., Жиянски, М., Любенова, М. (2014). Роля на подземната фитомаса в годишната фиксация на CO₂ от горски екосистеми на основни лесообразователни видове в България. Издателска къща на ЛТУ, София, 112 стр.
- ИАГ (2016). Министерство на земеделието и храните. Разпределение на залесената площ по дървесни видове и възраст през 2015 г. Доклад. (2016 г.). Достъпно онлайн: <http://www.iag.bg/data/docs/otchet2.pdf>
- Китин, Б. (1970). Проучвания върху развитието на кореновата система при някои форми тополи. *Научни трудове на ВЛТИ*, 18, 83–91.
- Китин, Б. (1973). Върху развитието на кореновата система при някои сортове тополи. *Научни трудове на ВЛТИ*, 19, 73–81.
- Любенова, М. (1988). *Първична биологична продуктивност и енергетични запаси на церово – благунова екосистема (Quercus frainetto+Quercus cerris) в югозападната част на Вакарелската планина*. Дисертация.
- Манолова, Й. (1970). Изучавания върху кореновата система на черен бор в млади култури в Странджа. *Горскостопанска наука*, 5, 3–17.
- Манолова, Й. (1971). *Изучавания върху кореновата система на фиданки в чисти и смесени горски култури при различни месторастения в района на Странджа*. Дисертация.
- Манолова, Й., Палашеш, И., Николов, В. (1972). Коренова система на черен бор при различни условия на месторастене в Странджа. *Горско стопанство*, 5, 13–17.
- Нинов, Н., Бондев, И., Георгиев, Н. (1983). Подземна фитомаса, годишна продукция и енергетични запаси на дъбова фитоценоза в зоната на канелените горски почви. *Почвознание и агрохимия*, 6, 87–95.
- Попов, Е., Хинков, Г., Величков, И., Стефанова, П. (2018). Продуктивност на горски култури от дугласка в България и необходимост от нейното използване. *Наука за гората*, 2, 3–23.
- Регламент (ЕС) 2018/841 на Европейския парламент и на Съвета от 30 май 2018 година за включването на емисиите и поглъщанията на парникови газове от земеползването, промените в земеползването и горското стопанство в рамката в областта на климата и енергетиката до 2030 г. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/841/oj?locale=bg>
- Родин, Л., Ремезов, Н., Базилевич, Н. (1968). Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Наука, Ленинград, 145 с.
- Bardgett, R. D., Mommer, L., & De Vries, F. T. (2014). Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(12), 692–699.

- Bastien, J. C. (2019). Douglas-fir biomass production and carbon sequestration. In Spiecker, H., Lindner, M., & Schuler, J. (eds.). *Douglas-fir – an option for Europe* (pp. 84–88). What Science Can Tell Us 9. European Forest Institute.
- Böhm, W. (1979). Excavation methods. In *Methods of Studying Root Systems* (pp. 5–19). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Brunner, I., Bakker, M. R., Björk, R. G., Hirano, Y., Lukac, M., Aranda, X., ... & Konôpka, B. (2013). Fine-root turnover rates of European forests revisited: an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. *Plant and Soil*, 362(1–2), 357–372.
- Brunner, I., Herzog, C., Dawes, M. A., Arend, M., & Sperisen, C. (2015). How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science*, 6, 547.
- Cai, H., Li, F., & Jin, G. (2019). Fine root biomass, production and turnover rates in plantations versus natural forests: effects of stand characteristics and soil properties. *Plant and Soil*, 436(1–2), 463–474.
- Dimitrova V., Lyubenova, M., Zhiyanski, M., & Vangelova, E. (2015). Roots biomass and carbon in representative forest ecosystems in Bulgaria. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences; Section D Environmental Sciences*, 5(2), 2090–2108.
- Dimitrova, V., Lyubenova, M., & Dimitrov, D. (2014). Biomass of young tree saplings of main forest species in Bulgaria and its role as a carbon depot. *Silva Balkanica*, 15(2), 35–42.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations) (2006). Global planted forests thematic study: results and analysis. In Del Lungo A, Ball, Carle J (eds) *Planted forests and trees working paper 38*. FAO, Rome.
- Ferezliev, A., Mavrevski, R., & Delkov, A. (2018). Correlation between average and dominant height of middle-aged Douglas fir plantations in the North-West Rhodopes. *Silva Balcanica*, 19, 13–26.
- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., & Hirano, Y. (2011a). Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management*, 262(11), 2008–2023.
- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., & Hirano, Y. (2011b). Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 261(2), 265–277.
- Forde, B., & Lorenzo, H. (2001). The nutritional control of root development. *Plant and soil*, 232(1–2), 51–68.
- Forest Europe. State of Europe's Forests 2015 Report. Available online: <https://www.foresteurope.org/docs/fullsoef2015.pdf>.
- Gill, R. A., & Jackson, R. B. (2000). Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 147(1), 13–31.
- Grossman, J. D., & Rice, K. J. (2012). Evolution of root plasticity responses to variation in soil nutrient distribution and concentration. *Evolutionary Applications*, 5(8), 850–857.
- Helmisaari, H. S., Derome, J., Nöjd, P., & Kukkola, M. (2007). Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. *Tree Physiology*, 27(10), 1493–1504.
- Hermann, R. K., & Lavender, D. P. (1999). Douglas-fir planted forests. *New Forests*, 17(1–3), 53–70.
- Hertel, D., Strecker, T., Müller-Haubold, H., & Leuschner, C. (2013). Fine root biomass and dynamics in beech forests across a precipitation gradient—is optimal resource partitioning theory applicable to water-limited mature trees? *Journal of Ecology*, 101(5), 1183–1200.
- IPCC (2003). Intergovernmental Panel on Climate Change Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., & Wagner, F. (Eds.) Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.

- Jackson, R., Mooney, H. A., & Schulze, E. D. (1997). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(14), 7362–7366.
- Jandl, R., Vesterdal, L., Olsson, M., Bens, O., Badeck, F., & Rock, J. (2007). Carbon sequestration and forest management. *CAB Reviews*, 2(17), 017.
- Kattge, J., Diaz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., Bönisch, G., ... & Cornelissen, J. H. C. (2011). TRY – a global database of plant traits. *Global Change Biology*, 17(9), 2905–2935.
- Kuchel, S., Jaloviar, P., & Špišák, J. (2011). Quantity, vertical distribution and morphology of fine roots in Norway spruce stands with different stem density. *Plant Root*, 5, 46–55.
- Le Quéré, C., Raupach, M. R., Canadell, J. G., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., ... & Friedlingstein, P. (2009). Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience*, 2(12), 831.
- Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Mitchard, E. T., & Koch, A. (2019). Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 568, 25–28.
- Lorenz, K., & Lal, R. (2010). Introduction. In *Carbon Sequestration in Forest Ecosystems* (pp. 241–270). Springer, Dordrecht.
- Lukac, M. (2012). Fine root turnover. In *Measuring roots* (pp. 363–373). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., & Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455(7210), 213–215.
- Lyr, H., & Hoffmann, G. (1967). Growth rates and growth periodicity of tree roots. In *International Review of Forestry Research* (Vol. 2, pp. 181–236). Academic Press, New York, London.
- McClaugherty, C. A., Aber, J. D., & Melillo, J. M. (1982). The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*, 63(5), 1481–1490.
- McCormack, M. L., Adams, T. S., Smithwick, E. A., & Eissenstat, D. M. (2014). Variability in root production, phenology, and turnover rate among 12 temperate tree species. *Ecology*, 95(8), 2224–2235.
- Moser, B., Bachofen, C., Müller, J. D., Metslaid, M., & Wohlgemuth, T. (2016). Root architecture might account for contrasting establishment success of *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* and *Pinus sylvestris* in Central Europe under dry conditions. *Annals of Forest Science*, 73(4), 959–970.
- Murty, D., Kirschbaum, M. U., Mcmurtrie, R. E., & Mcgilvray, H. (2002). Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 8(2), 105–123.
- Neumann, M., Godbold, D. L., Hirano, Y., & Finér, L. (2019). Improving models of fine root carbon stocks and fluxes in European forests. *Journal of Ecology*.
- Nisbet, T. (2005). Water Use by Trees, Forestry Commission, Information Note 65. *Forestry Commission, Edinburgh*, 8.
- Norby, R. J., Hanson, P. J., O'Neill, E. G., Tschaplinski, T. J., Weltzin, J. F., Hansen, R. A., ... & Johnson, D. W. (2002). Net primary productivity of a CO₂-enriched deciduous forest and the implications for carbon storage. *Ecological Applications*, 12(5), 1261–1266.
- Peichl, M., & Arain, M. A. (2006). Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140(1–4), 51–63.
- Persson, H. (1978). Root dynamics in a young Scots pine stand in Central Sweden. *Oikos*, 508–519.
- Purves, D., & Pacala, S. (2008). Predictive models of forest dynamics. *Science*, 320(5882), 1452–1453.

- Rasse, D. P., Rumpel, C., & Dignac, M. F. (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1–2), 341–356.
- Sorgonà, A., Proto, A. R., Abenavoli, L. M., & Di Iorio, A. (2018). Spatial distribution of coarse root biomass and carbon in a high-density olive orchard: effects of mechanical harvesting methods. *Trees*, 32(4), 919–931.
- Vogt, K. A., Vogt, D. J., Boon, P., O'Hara, J., & Asbjornsen, H. (1996). Factors controlling the contribution of roots to ecosystem carbon cycles in boreal, temperate and tropical forests. *Plant Soil*, 187, 159–219.
- Xia, M., Talhelm, A. F., & Pregitzer, K. S. (2015). Fine roots are the dominant source of recalcitrant plant litter in sugar maple-dominated northern hardwood forests. *New Phytologist*, 208(3), 715–726.
- Zhiyanski, M. (2004). Structure and biomass of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in the southwest Rila Mountain. In *Proceedings of an international scientific conference marking 75 years of the Forest Research Institute of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria, 1–5 October 2003. Volume 2* (pp. 353–356). Forest Research Institute, Sofia.
- Zhiyanski, M. (2015). Fine-root production and turnover based on 2-yr of sequential coring in four forest species in Bulgaria. *Silva Balcanica*, 16, 34–49.

Role of belowground biomass of woody plants for carbon accumulation in mountain forest ecosystems

Lyudmila Mitkova Lozanova

Institute of Biodiversity and Ecosystem Research, Bulgarian Academy of Sciences,
2 Gagarin Street, 1113 Sofia, Bulgaria

Supervisor: Prof. Miglena Zhiyanski

Co-supervisor: Assoc. Prof. Svetla Bratanova - Doncheva

Co-supervisor: Assoc. Prof. Stela Lazarova

PhD Thesis, Sofia, 2020

Summary

The aim of the present study is to characterise the root system structure and biomass of two important forest tree species and to evaluate their role for carbon (C) sequestration in mountain forest ecosystems in Bulgaria. Four different stands, two European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests and two Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) plantations, located in the Central Balkan and the Rhodope Mountains, respectively, were selected. Important root traits that characterise the root system distribution (e.g., root mass vertical allocation), root system dynamics (e.g., fine roots annual production and turnover rate) and C-related functional traits (concentration, stock and flux) were investigated.

Two methods for studying tree root systems were applied. A direct method (Rodin et al. 1968) was used to study the total root mass and the distribution of fine (0–2 mm), medium ($2 < d < 10$ mm) and coarse ($d > 10$ mm) roots up to 0–40 cm soil depth. An indirect Sequential soil coring method (Persson 1978) was applied to study the root system vertical distribution and dynamics of three root diameter size classes (0–2, 2–5 and 5–10 mm) sampled at three soil depths (0–15, 15–30, 30–45 cm). Root annual production and turnover rate were analysed and quantified using Decision Matrix and Maximum-Minimum estimation approaches, respectively. The carbon and nitrogen (N) concentrations of the fine roots were measured and used for C and N stock and flux calculations (Xia et al. 2015).

Species-specific patterns of vertical distribution of the overall root biomass and the root classes were revealed. The total root biomass (fine, medium and coarse roots) was significantly higher in the Douglas fir than in the European beech (2562 and 745 g m⁻², respectively). A gradual increase of the total root biomass along the soil depth was found, reaching its maximum between 20–30 cm in the Douglas fir, and concentrated in the surface soil layers (0–20 cm) in the European beech. The coarse root biomass had the highest proportion in the Douglas fir (76% of the total root biomass), whereas the medium sized roots ($2 < d < 10$ mm) prevailed in the European beech (50% of the total root biomass).

Both methods revealed similar results in biomass assessments of roots up to 10 mm diameter. However, the Sequential soil coring method was more precise in vertical distribution assessment of the fine and small sized ($d = 2\text{--}5$ mm) roots. More than half of the fine and small root biomass of the Douglas fir stands was allocated in the uppermost soil layer and decreased significantly with soil depth, while in the beech forests the biomass was more uniformly distributed and decreased gradually along the soil depth. Although both tree species belong to two different functional plant types and the stands were situated in two distantly located regions with specific climatic and soil characteristics, the trends of the root biomass and necromass dynamics, annual production and turnover rates were similar. Based on the mean and maximum biomass data, we calculated 1.11 yr⁻¹ and 0.76 yr⁻¹ mean turnover rate, respectively. These were similar to the mean values reported for Central and Northern European forests and higher than those reported for Southern Europe.

In conclusion, our data suggest that European beech forests exhibit a higher fine root production, C concentration, C stock, and fine and medium root flux, thus having a greater potential for C sequestration into SOC pools. In contrast, the Douglas fir contains a higher C stock in the coarse roots, thus contributing for the carbon long-term accumulation.