

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ВТОРИЧНОЙ ФЛОЭМЫ КАРЛИКОВОЙ БЕРЕЗЫ (*BETULA NANA*)

В.А. Каменная✉, А.С. Аксенов

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), 163002, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17

tory.kobzar@yandex.ru

Представлены результаты анализа компонентного состава вторичной флоэмы карликовой березы (*Betula nana*) с применением оригинальной методики анализа лигноуглеводного сырья и использованием ферментных препаратов. Получены достоверные данные о содержании целлюлозы, гемицеллюлоз, лигнина, пектиновых веществ, крахмала, экстрактивных веществ (растворимых в воде и этиловом спирте). Проведено сравнение полученных результатов с литературными данными по компонентному составу вторичной флоэмы представителя рода *Betula* умеренной зоны — березы повислой (*Betula pendula*). Определены биохимические пути адаптации карликовой березы к климатическим условиям тундровой зоны. Сделано предположение о механизме формирования обнаруженных различий. Выполнена оценка питательной ценности вторичной флоэмы карликовой березы как кормовой культуры для оленеводства.

Ключевые слова: карликовая береза (*Betula nana*), вторичная флоэма, целлюлоза, крахмал, лигнин, экстрактивные вещества, ферменты

Ссылка для цитирования: Каменная В.А., Аксенов А.С. Компонентный состав вторичной флоэмы карликовой березы (*Betula nana*) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 3. С. 32–42. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-3-32-42

Карликовая береза (*Betula nana*) — древовидный кустарник, представитель рода Береза, семейства Березовые (рис. 1). Ареал обитания данного вида приурочен к арктическим и субарктическим зонам Евразии и Северной Америки. Вне северных широт карликовую березу можно обнаружить в горных районах Европы. Широкое распространение вида свидетельствует о его экологической пластичности. Морфология *Betula nana* может изменяться от стелющегося кустарничка в северных регионах до крупного кустарника на юге ареала обитания [1]. Карликовая береза имеет стабилизирующее значение кустарничкового покрова типичной тундры, которое проявляется в препятствии развитию термокарстовых процессов [2]. Данный вид является неотъемлемой частью кормовой базы для оленеводства в условиях Крайнего Севера. Основную питательную ценность для оленей несут листья, почки, цветы и молодые побеги, богатые органическими и минеральными веществами. По окончании вегетационного периода (отсутствие высокопитательных органов) в качестве корма олени могут использовать кору карликовых растений [3, 4]. Анализ компонентного состава коры березы повислой по-



Рис. 1. Карликовая береза
Fig. 1. Dwarf birch

казал, что содержание углеводной части во вторичной флоэме в 4 раза выше чем в корке, что свидетельствует о ее большой питательной ценности [5].

Внешний слой коры — корка — состоит из омертвевших клеток, выполняющих защитную функцию. Слой между коркой и вторичной флоэмой — перидерма — представляет собой комплекс производных феллогена. К производным

феллогена относятся феллема и феллодерма. Феллема — это пробковая ткань, которая защищает растение от потери влаги и имеет терморегулирующую функцию вследствие низкой теплопроводности. Феллодерма выполняет запасающую функцию, депонируя органические вещества, которые используются феллогеном. Внутренняя часть коры представляет собой вторичную флоэму (луб), она выполняет функцию транспорта органических веществ от фотосинтезирующих органов к органам-акцепторам. Вторичная флоэма — комплексная ткань, где проводящую функцию выполняют ситовидные элементы, запасающую — лубяная паренхима, механическую — флоэмные волокна и склериды. Образуется вторичная флоэма путем деления везикулярного камбия: клетки, отложенные наружу, образуют вторичную флоэму; внутрь — ксилему. Ксилема как проводящий элемент, обеспечивает восходящий ток воды и минеральных веществ. Как и флоэма, ксилема представляет собой комплексную ткань: проводящую функцию здесь выполняют сосуды и трахеиды, запасающую — паренхима, механическую — волокна либриформа (рис. 2) [6].

С точки зрения деревообрабатывающей промышленности ксилема имеет большее значение, поскольку служит сырьем для целлюлозно-бумажной промышленности и производства пиломатериалов. Широкое использование древесины в производстве способствовало росту интереса к ее изучению. Вторичная флоэма входит в состав коры, которая является отходом деревообрабатывающей промышленности. Как следствие, она малоизучена, несмотря на важную роль в росте и развитии растения [7].

Основными компонентами как ксилемы, так и флоэмы являются целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин и экстрактивные вещества. Однако их соотношение различно. Для ксилемы характерно высокое содержание целлюлозы и лигнина, что обусловлено строением клеточной стенки сосудов и волокон либриформа, в то время как вторичная флоэма характеризуется высоким содержанием экстрактивных веществ. Концентрация и разнообразие экстрактивных веществ в коре вызвано многообразием выполняемых функций [7].

Несмотря на широкое распространение карликовой березы и разнообразие ее морфотипов, данных о компонентном составе данного вида нет. Исследование компонентного состава вторичной флоэмы карликовой березы позволит не только оценить ее питательную ценность как кормовой культуры, но и определить пути адаптации данного вида к неблагоприятным условиям окружающей среды.

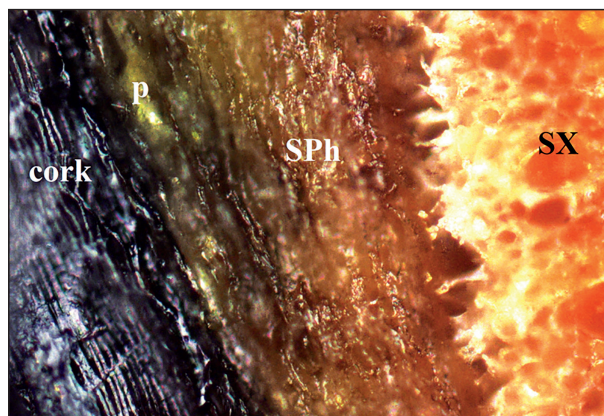


Рис. 2. Поперечный срез (ув. $\times 450$) стволика березы карликовой (50 мкм): cork — корка; p — перидерма; SPh — вторичная флоэма; SX — вторичная ксилема

Fig. 2. Cross-section ($\times 450$ magnification) of a dwarf birch trunk (50 μm): cork — cortex; p — periderm; SPh — secondary phloem; SX — secondary xylem

Цель работы

Цель работы — определение путей адаптации карликовой березы к условиям тундровой зоны путем анализа компонентного состава вторичной флоэмы.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали образец *Betula nana*, отобранный в августе 2020 г. в экспедиции на севере Восточно-Европейской равнины в зоне тундры (Россия, НАО, $68^{\circ}03'N$, $61^{\circ}38'E$). Образцы замораживали в жидком азоте и хранили в низкотемпературном холодильнике Thermo Scientific Forma 88 000 при температуре $-80^{\circ}C$. Для анализа использовали вторичную флоэму — слой между корой и древесиной стволика карликовой березы. Вторичную флоэму высушивали в лиофильной сушилке Labconco FreeZone и измельчали скальпелем до размера 0,5...1 мм.

Для анализа компонентного состава вторичной флоэмы была предложена оригинальная методика с применением экстракции этанолом и горячей водой, а также щелочного, кислотного и ферментативного гидролиза. В результате исследования вторичной флоэмы карликовой березы были определены следующие показатели: содержание гемицеллюлоз, целлюлозы, лигнина, экстрактивных веществ, растворимых в спирте и воде, в том числе пектина и крахмала (рис. 3).



Рис. 3. Схема анализа компонентного состава вторичной флоэмы
 Fig. 3. Schematic diagram of secondary phloem component analysis

Для определения содержания пектиновых веществ измельченную абсолютно сухую флоэму подвергали ферментативному гидролизу. В качестве ферментного препарата пектолитического действия использовали Pectinex Ultra Color (Novozymes), содержащий пектинэстеразу и полигалактуроназу. Пектинэстераза осуществляет этерификацию пектиновых веществ, полигалактуроназа — расщепление α -1,4-связи [10]. Содержание пектиновых веществ рассчитывали по концентрации восстанавливающих сахаров в гидролизате. Концентрацию восстанавливающих сахаров определяли методом Шомоди — Нельсона [11].

Методика определения содержания крахмала включала в себя стадии щелочного и ферментативного гидролиза. Полученный в результате щелочного гидролиза раствор нейтрализовали уксусной кислотой. Ферментативный гидролиз проводили в два этапа: на первом этапе в раствор вносили Aquazum и инкубировали в течение 1 ч при температуре 50 °С, на втором этапе вносили Duozym и выдерживали при тех же условиях. Данная методика обусловлена последовательностью реакций при гидролизе крахмала. На первом этапе Aquazum, обладающий амилитической активностью, разрушает молекулу крахмала до декстринов с меньшей молекулярной массой. На втором этапе Duozym благодаря

высокой глюкоамилазной активности расщепляет полученные декстрины до глюкозы [13]. Исходя из концентрации глюкозы в полученном гидролизате рассчитывали содержание крахмала. Концентрация глюкозы была определена на автоматическом анализаторе глюкозы мембранного типа «Энзискан Ультра».

При использовании ферментных препаратов для анализа компонентного состава необходимо учитывать содержание свободных сахаров в анализируемой пробе и в ферментном препарате. Для этого параллельно с опытом проводили холостые пробы, с которыми выполняли те же манипуляции, но без использования ферментного препарата для определения свободных сахаров в пробе и без вторичной флоэмы для определения их содержания в используемом ферментном препарате.

Для определения содержания веществ, экстрагируемых горячей водой, измельченную вторичную флоэму кипятили в дистиллированной воде с присоединенным обратным холодильником, после чего сушили. По разнице масс рассчитывали содержание водорастворимых экстрактивных веществ.

Содержание веществ, растворимых в этиловом спирте определяли по разнице масс абсолютно сухой вторичной флоэмы и остатка после спиртовой экстракции. Полученный остаток

кипятили в присутствии обратного холодильника в 2%-м растворе HCl. В результате чего гемицеллюлозы переходили в раствор в виде восстанавливающих сахаров, по концентрации которых рассчитывали содержание гемицеллюлоз. Остаток после кислотного гидролиза промывали дистиллированной водой до pH 7,0 и подвергали ферментативной обработке целлюлазами, ферментами, катализирующими расщепление целлюлозы.

Гидролиз целлюлозы возможен в присутствии комплекса целлюлолитических ферментов: эндо-, экзодеполимеразы и β -глюкозидазы. Эндоглюконазы катализируют разрыв гликозидных связей внутри целлюлозной цепи, уменьшая молекулярную массу молекулы и увеличивая их количество. Экзоглюконазы катализируют отщепление молекулы глюкозы (экзоглюкозидаза) или целлобиозы (экзоцеллобиогидролаза). Расщепление полученной в результате гидролиза целлобиозы на две молекулы глюкозы катализируется целлобиазой [16]. В качестве ферментных препаратов целлюлолитического действия при анализе компонентного состава вторичной флоры карликовой березы использовали биокатализаторы на основе рекомбинантных ферментных препаратов *Penicillium verruculosum* [17]. Расчет расхода ферментных препаратов проводили исходя из их активности и массы субстрата. По окончании ферментативного гидролиза целлюлоза расщепляется до глюкозы, по концентрации которой рассчитывали содержание целлюлозы.

После спиртовой экстракции, кислотного гидролиза и обработки целлюлазами в остатке вторичной флоры остается лигнин, содержание которого определяли по массе абсолютно сухого остатка после промывки.

Результаты и обсуждение

Вегетационный период карликовой березы определяется переходом среднесуточной температуры через границу $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5]. Согласно графику среднемесячных температур (рис. 4), вегетационный период *Betula nana* длится 3 мес и приходится на полярный день. Высокая инсоляция способствует усилению фотосинтеза [18]. Среднее количество осадков в области произрастания карликовой березы — 20 мм в год, но вследствие низкой транспирации в условиях пониженных температур карликовая береза не испытывает недостатка влаги. Кроме того, низкие температуры тундровой зоны ведут к снижению интенсивности дыхания растений. Высокая интенсивность фотосинтеза при низких затратах на дыхание ведет к увеличению

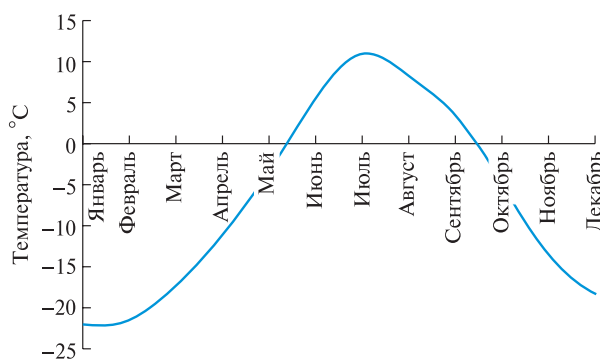


Рис. 4. Среднемесячная температура в зоне сбора образцов карликовой березы по месяцам

Fig. 4. Average monthly temperature in the dwarf birch sampling area by month

продуктивности растения и, следовательно, к формированию избытка сахарозы [19].

Утилизация сахарозы происходит в тканях-акцепторах через ее гидролиз ферментами инвертазой и сахарозосинтазой. Сахарозосинтаза в присутствии уридинтрифосфата расщепляет сахарозу на фруктозу и уридиндифосфатглюкозу (УДФ-глюкозу). Выбор пути использования УДФ-глюкозы зависит от типа клетки-акцептора и локализации сахарозосинтазы. Примембранные сахарозосинтазы поставляют УДФ-глюкозу в целлюлозосинтазный комплекс для формирования клеточной стенки. Сахарозосинтазы, связанные с мембраной амилопласта, используют УДФ-глюкозу для образования крахмала. При этом наблюдения за активностью сахарозосинтазы во вторичных флоры и ксилеме березы повислой показали, что в период активного камбиального роста продукты распада сахарозы предпочтительно используются для образования целлюлозы в ксилеме, в условиях торможения ксилогенеза, вызванного неблагоприятными условиями среды, сахароза утилизировалась преимущественно путем образования крахмала во флоры. Инвертаза участвует в расщеплении сахарозы на фруктозу и глюкозу, которые используются для формирования компонентов клеточной стенки [20].

Для анализа влияния природных условий тундровой зоны на компонентный состав вторичной флоры карликовой березы представлены данные о компонентном составе луба березы повислой (*Betula pendula*) как типичного представителя рода Береза умеренной зоны [5] (таблица).

Согласно полученным результатам, содержание экстрактивных веществ во вторичной флоры карликовой березы выше, чем у березы повислой.

Компонентный состав вторичной флоэмы березы карликовой (*Betula nana*) и березы повислой (*Betula pendula*)

Component composition of secondary phloem in dwarf birch (*Betula nana*) and silver birch (*Betula pendula*)

Компонент	<i>Betula nana</i>	<i>Betula pendula</i> [5]
Целлюлоза	14,4 ± 3,3	23,4
Гемицеллюлозы	21,4 ± 1,2	21,8
Лигнин	27,4 ± 4,5	18,1
Экстрактивные вещества, растворимые в спирте	20,9 ± 3,2	15,8
Экстрактивные вещества, растворимые в воде	26,8 ± 2,7	19,3
пектиновые вещества	7,1 ± 1,7	–
крахмал	7,3 ± 1,5	–

К растворимым в спирте веществам относятся жирные кислоты, липиды, фитостеролы и терпены. Доказано, что жирные кислоты и липиды способствуют адаптации растения к низким температурам. Под влиянием низких температур снижается текучесть клеточных мембран, что активирует синтез десатуразы, фермента, катализирующего превращение одинарной связи между атомами углерода в цепи жирных кислот в двойную. Полиненасыщенные жирные кислоты обеспечивают устойчивость растения к замерзанию [21]. Фитостеролы — производные изопреноидов, входят в состав плазматической мембраны растительной клетки. В растении фитостеролы могут находиться в свободном виде, образовывать сложные эфиры с жирными кислотами и гликозиды со свободными сахарами. Фитостеролы являются предшественниками фитогормонов — регуляторов роста и развития растения [22]. Терпены — это непредельные углеводороды, производные изопрена. Благодаря наличию кратной связи могут образовывать полимеры и кислородзамещенные производные, которые носят название — терпеноиды. Структурное разнообразие терпенов и терпеноидов обуславливает разнообразие выполняемых ими функций. Они являются участниками обменных процессов, участвуют в фотохимических реакциях, регулируют активность генов [23]. Таким образом, экстрактивные вещества участвуют в формировании устойчивости к неблагоприятным факторам среды, что необходимо для жизни в условиях Крайнего Севера.

К группе веществ, растворимых в воде, относятся танины, красящие и пектиновые вещества, крахмал, свободные сахара. Танины

представляют собой полифенольные соединения. Благодаря своей способности связываться с белками, полисахаридами и биополимерами они выполняют защитную функцию [24]. Использование в методике анализа компонентного состава ферментных препаратов с высокой амилитической и глюкоамилазной активностью позволило рассчитать содержание крахмала во вторичной флоэме, которое составило 7,3 %. Крахмал — это основное запасное вещество для растения. Он представляет собой полисахарид, состоящий из единиц D-глюкопиранозы, которые связаны α -1,4-связью в молекуле амилозы и α -1,4 с ответвлениями α -1,6 в молекуле амилопектина. В растении крахмал присутствует в виде крахмальных зерен [10]. Обработка измельченной вторичной флоэмы щелочью позволила улучшить доступ к крахмалу аксиальной паренхимы [11]. Содержание крахмала во вторичной флоэме относительно высокое, для сравнения — содержание крахмала в лубе березы повислой в период камбиального роста составляет 0,11 % [5], что обусловлено временем сбора образцов карликовой березы, которое соответствует замедлению ксилогенеза. Снижение интенсивности ксилогенеза на фоне высокой продуктивности карликовой березы ведет к формированию избытка сахарозы, которую необходимо утилизировать. Один из способов ее утилизации — образование крахмала. Локализация пула — вторичная флоэма — обусловлена слабым развитием запасующих органов, для рода Береза это листья и корни [5].

Среди водорастворимых веществ есть пектиновые вещества. Пектин — это полисахарид, состоящий из остатков D-галактуроновой кислоты, соединенных α -1,4-гликозидной связью, в растении чаще встречается в виде метилового эфира. Находится в срединной пластинке и в клеточных стенках паренхимных клеток внутренней части коры [9]. Пектиновые вещества набухают в воде, благодаря чему вода меньше испаряется и замерзает при более низких температурах [25]. Таким образом, высокое содержание пектиновых веществ во вторичной флоэме (7,1 %) может служить механизмом адаптации карликовой березы к низким температурам и круглосуточной инсоляции в вегетационный период.

Гемицеллюлозы коры представителей рода Береза состоят в основном из остатков глюкозы и ксилозы. Благодаря своей аморфной структуре и гидрофильным свойствам гемицеллюлозы замедляют высыхание тканей [26]. Содержание гемицеллюлоз во вторичной флоэме карликовой березы составляет 21,4 %, что не отличается от содержания их в лубе березы

повислой — 21,8 %. Следовательно, гемицеллюлозы не имеют значения для адаптационных механизмов карликовой березы. Отметим, что гидролизат, полученный при кипячении вторичной флоэмы в 2%-м растворе HCl был малинового цвета. Пигменты растений извлекаются водой, однако водный экстракт, полученный при кипячении вторичной флоэмы, был коричневого цвета. Следовательно, малиновую окраску придали не пигменты, а продукты реакций, протекающих при кислотном гидролизе. Подобные цветные реакции характерны для веществ фенольной природы [24]. Фенольные соединения во вторичной флоэме могут быть таннинами и предшественниками лигнина, что может свидетельствовать о высокой степени лигнификации.

Такие компоненты клеточной стенки, как целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин, — связаны и формируют лигноцеллюлозную структуру тканей древесных растений [27]. Целлюлоза — самый распространенный полисахарид на Земле, который состоит из остатков β -глюкозы, данное положение ОН-группы у C1 обуславливает различие пространственной структуры молекул крахмала и целлюлозы [14, 15]. Содержание целлюлозы во вторичной флоэме карликовой березы ниже чем в березе повислой, в то время как содержание лигнина значительно выше. Высокие показатели лигнина во вторичной флоэме можно обнаружить во флоэмных волокнах и склереидах, паренхимные клетки луба не лигнифицируются. Лигнин принимает участие в защите растения от факторов стресса. В тундровой зоне это высокое УФ-излучение, вызванное круглосуточной инсоляцией [5]. Опыты по исследованию влияния экзогенной сахарозы на формирование вторичной флоэмы показали, что избыток сахарозы в период камбиального роста приводит к формированию склереид во вторичной флоэме березы повислой, что не характерно для рода Береза [28]. Таким образом, склерификация вторичной флоэмы является путем вывода избытка сахарозы для карликовой березы. Следовательно, высокий потенциал фотосинтеза на фоне низких затрат на дыхание приводит к избытку сахарозы, которая депонируется не только в виде крахмала, но и выводится за счет лигнификации клеток.

Кора карликовой березы служит кормовой базой для оленеводства. Основную питательную ценность для животного имеют крахмал и целлюлоза. Крахмал легко доступен для пищеварительных ферментов, его перевариваемость составляет от 94 до 97 %. Пищеварительные железы не вырабатывают целлюлаз, поэтому цел-

люлоза расщепляется под действием ферментов микроорганизмов, которые заселяют рубец и толстый кишечник. Целлюлоза — легкогидролизуемое соединение, однако во вторичной флоэме целлюлоза присутствует в виде лигноуглеводного комплекса. Соединения целлюлозы с лигнином и гемицеллюлозами затрудняют доступ ферментов к субстрату, следовательно, усвояемость целлюлозы снижается [29]. Несмотря на негативное влияние, оказываемое на питательную ценность целлюлозы, лигнин положительно влияет на амило- и целлюлолитическую активность рубцовой жидкости, снижает количество вредоносных бактерий и азота в пищеварительном тракте животного [30]. Высокое содержание крахмала во вторичной флоэме карликовой березы делает ее хорошим ресурсом при выборе пастбищ для оленеводства. Высокое содержание лигнина, в свою очередь, снижает перевариваемость целлюлозы и гемицеллюлоз, но положительно сказывается на пищеварении животных. Пектиновые вещества, входящие в состав вторичной флоэмы, оказывают благоприятное влияние на выведение из организма биогенных токсинов и тяжелых металлов, находящихся в составе нерастворимых комплексов (нерастворимые комплексы, образованные пектиновыми веществами с биогенными токсинами и тяжелыми металлами). Также пектины препятствуют развитию гнилостных процессов в рубце [31].

Выводы

Вторичная флоэма, несмотря на свой небольшой объем, имеет важное значение для жизни растения. Анализ компонентного состава вторичной флоэмы карликовой березы позволил определить его адаптивный ответ на экстремальные условия арктической зоны, которая характеризуется высокой инсоляцией и низкими температурами в период короткого вегетационного периода. Примером адаптационных изменений компонентного состава карликовой березы к климатическим условиям тундровой зоны стали высокие содержания во вторичной флоэме экстрактивных и пектиновых веществ. Пектиновые вещества за счет своей влагоудерживающей способности снижают температуру замерзания и минимизируют негативный эффект от высокой инсоляции. Экстрактивные вещества выполняют защитную функцию в растении путем участия в обменных процессах и фотохимических реакциях. В период интенсивного ксилогенеза сахароза, которая образуется в избытке на фоне высокой продуктивности растения, используется для формиро-

вания целлюлозы вторичной стенки в ксилеме. В период снижения интенсивности ксилогенеза сахараза утилизируется преимущественно во вторичной флоэме путем накопления крахмала, что объясняет его высокое содержание. Другим путем вывода избытка сахаразы из обмена является склерификация клеток, на что указывает повышенное содержание лигнина. Оценка компонентного состава вторичной флоэмы в разные фазы вегетационного периода позволит точнее определить механизмы адаптации карликовой березы к условиям среды.

Благодарности


Выражаем благодарность Чухчину Дмитрию Германовичу и коллективу ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова за помощь в проведении исследования.

Список литературы

- [1] Jonsell B. *Betula* L // Flora Nordica, 2000, v. 1, pp. 197–203.
- [2] Петров Р.Е., Карсанаев С.В., Максимов Т.Х. Стабилизирующая роль кустарничкового покрова типичной тундры на Северо-Востоке России // Естественные науки: итоги и перспективы развития: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Якутск, 27 ноября 2018 г. Якутск: Изд-во СВФУ, 2018. С. 200–206.
- [3] Байкалова Л.П., Долгова Н.Г. Кормовые ресурсы и их рациональное использование для оленеводства арктической зоны // Арктика 2018: международное сотрудничество, экология и безопасность, инновационные технологии и логистика, правовое регулирование, история и современность: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Красноярск, 16–17 мая 2018 г. Якутск: Изд-во КГАУ, 2018. С. 21–27.
- [4] Романенко Е.А. Геохимическая оценка кормовых растений полуострова Ямал // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: Материалы Всерос. школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. Пермь, 22–23 апреля 2021 г. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2021. С. 420–423.
- [5] Ведерников Д.Н., Шабанова Н.Ю., Рошин В.И. Изменение химического состава корки и луба березы повислой *Betula pendula* Roth (*Betulaceae*) по высоте дерева // Химия растительного сырья, 2010. № 2. С. 43–48.
- [6] Алехин Н.Д., Балнокин Ю.В., Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В., Мейчик Н.Р., Носов А.М., Полеская О.Г., Харитонашвили Е.В., Чуб В.В. Физиология растений. М.: Академия, 2007. 640 с.
- [7] Галактионов О.Н., Хюнинен И.А. Анализ компонентного состава лесосечных отходов, происхождения и направлений утилизации // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике, 2016. № 4. С. 214–2018.
- [8] Дейнеко И.П., Фаустова Н.М. Элементный и групповой химический состав коры и древесины осины // Химия растительного сырья, 2015. № 1. С. 51–62.
- [9] Rowell R.M. Cell wall chemistry // Handbook of wood chemistry and wood composites, 2005. Т. 2. С. 33–72.
- [10] Синицын А.П., Синицына О.А., Рожкова А.М. Промышленная биотехнология: возможности создания микроорганизмов продуцентов технических ферментов // Актуальная биотехнология, 2022. № 1. С. 128–131.
- [11] Галибина Н.А., Новицкая Л.Л., Никерова К.М. Донорно-акцепторные отношения органов и тканей березы повислой при альтернативных сценариях ксилогенеза // Физиология растений, 2019. Т. 66. № 2. С. 128–136.
- [12] Хадько И.А., Лукина В.А. Определение крахмала в гофрокартоне ферментативным методом // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, Бийск, 21–23 мая 2014 г. Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2014. С. 213–216.
- [13] Никитина Е.В., Решетник О.А., Губайдуллин Р.А. Биотехнологические аспекты применения амилолитических ферментов в пищевой промышленности // Вестник Казанского технологического университета, 2013. Т. 16. № 13. С. 148–153.
- [14] Heinegard D., Oldberg. Structure and biology of cartilage and bone matrix noncollagenous macromolecules // The FASEB J., 1989, t. 3, no. 9, pp. 2042–2051.
- [15] Mohr H., Schopfer P. Plant physiology. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012, 628 p.
- [16] Фоменко И.А., Тучкова С.Н. Утилизация целлюлозосодержащих отходов при помощи грибов // Новые технологии, 2021. № 5. С. 123–133.
- [17] Новожилов Е.В. Применение комплексных биоактиваторов на основе рекомбинантных ферментных препаратов *Penicillium verticillium* для гидролиза полцеллюлозы из лиственной древесины // Катализ в промышленности, 2014. № 4. С. 74–80.
- [18] Плюснина С.Н., Загирова С.В. Структура фотосинтетического аппарата *Betula nana* (*Betulaceae*) на Северном и Приполярном Урале // Ботанический журнал, 2016. Т. 101. № 3. С. 261–274.
- [19] Van Gestel N.C. Continuous light may induce photosynthetic downregulation in onion—consequences for growth and biomass partitioning // Physiologia Plantarum, 2005, t. 125, no. 2, pp. 235–246.
- [20] Мошенская Ю.Л., Галибина Н.А., Новицкая Л.Л., Никерова К.М. Роль сахарозосинтазы в акцепторных органах древесных растений // Физиология растений, 2019, t. 66, no. 1, pp. 13–25.
- [21] Слепцов С.И., Хлебный Е.С., Журавская А.Н. Липиды, жирные кислоты и флавоноиды в листьях *Amaranthus retroflexus*, произрастающего в условиях центральной Якутии // Химия растительного сырья, 2017. № 3. С. 77–84.
- [22] Галкина Е.Е., Воробьева О.А. Особенности биосинтеза фитостеролов пальмы ползучей и тыквы обыкновенной как компонентов лекарственных средств // Современные проблемы биохимии, генетики и биотехнологии: Материалы III Всерос. конф. с междунар. участием, Уфа, 21–23 сентября 2021 г. Уфа: Изд-во РИН БашГУ, 2021. С. 52–55.

- [23] Широких И.Г., Огородникова С.Ю. Влияние терпеновых соединений на ростовые и физиолого-биохимические показатели проростков пшеницы // Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Киров, 27–29 ноября 2007 г., Киров: Изд-во ВятГГУ, 2007. С. 91–95.
- [24] Зуйкевич В.В. Танины в растительном сырье // Биологически активные соединения в жизни человека: сб. статей VII Университетской студ. науч.-практ. конф., Брест, 14 декабря 2017 г., Брест: Из-во БрГУ, 2018. С. 34–36.
- [25] Оводова Р.Г. Новейшие сведения о пектиновых полисахаридах // Известия Коми научного центра УРО РАН, 2010. № 3. С. 37–45.
- [26] Mian A.J., Timell T.E. Isolation and characterization of a cellulose from the inner bark of white birch (*Betula papyrifera*) // Canadian J. of Chemistry, 1960, t. 38, no. 7, pp. 1191–1198.
- [27] Теофилова Е.П., Мысякина И.С. Лигнин: химическое строение, биodeградация, практическое использование (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология, 2016. Т. 52. № 6. С. 559–569.
- [28] Тарелкина Т.В., Новицкая Л.Л. Влияние экзогенной сахарозы на формирование флоэмы березы повислой, ольхи серой и осины // Труды Карельского научного центра Российской академии наук, 2019. № 12. С. 43–54.
- [29] Левахин Г.И., Дускаев Г.К., Ферапонтова А.С., Овчинников А.А., Миколайчик И.Н. Роль углеводов в процессе пищеварения жвачных животных (обзор) // Животноводство и кормопроизводство, 2015. № 1 (89). С. 92–95.
- [30] Курепин А.А., Шорец Р.Д., Лемешевский В.О. Влияние соотношения НДК и КДК в рационах коров на микробиологические и ферментативные показатели рубцового пищеварения // Современное состояние, перспективы развития молочного животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Омск, 7–8 апреля 2018 г. Омск: Литера, 2016. С. 96–99.
- [31] Наумов Н.М. Биологически активные свойства и лечебно-профилактическое применение пектинов // Актуальные вопросы сельскохозяйственной биологии, 2018. № 2 (8). С. 13–17.

Сведения об авторах

Каменная Виктория Андреевна  — учеб. мастер, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), tory.kobzar@yandex.ru

Аксенов Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), a.s.aksenov@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.04.2025.

Одобрено после рецензирования 21.10.2025.

Принята к публикации 14.04.2026.

COMPONENT COMPOSITION OF DWARF BIRCH (*BETULA NANA*) SECONDARY PHLOEM

V.A. Kamennaya[✉], A.S. Aksenov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

tory.kobzar@yandex.ru

This study presents the analysis results of the component composition of the dwarf birch secondary phloem using a know-how method for analyzing lignocarbhydrate raw materials and enzyme preparations: amylases, pectinases and cellulases. Reliable data have been obtained on the content of the following components in the secondary phloem of dwarf birch: cellulose, hemicelluloses, lignin, pectin substances, starch, extractive substances (soluble in water and ethyl alcohol). The results obtained were compared with literature data on the component composition of the secondary phloem of the representative of the genus *Betula* of the temperate zone — silver birch (*Betula pendula*). Comparison of the component composition of the Birch genus from different climatic zones made it possible to determine the biochemical pathways of the dwarf birch adaptation to the climatic conditions of the tundra zone, which are characterized by high insolation, low temperatures during a short growing season, the presence of permafrost and low precipitation. A relatively high content of starch, lignin, pectin and extractives was found. An assumption has been made about the mechanism of formation of the detected differences based on modern ideas about plant physiology. Based on data on the component composition of secondary phloem, the nutritional value of dwarf birch secondary phloem as a fodder crop for reindeer husbandry was assessed.

Keywords: dwarf birch (*Betula nana*), secondary phloem, cellulose, starch, lignin, extractives, enzymes

Suggested citation: Kamennaya V.A., Aksenov A.S. *Komponentnyy sostav vtorichnoy floemy karlikovoy berezy (Betula nana)* [Component composition of dwarf birch (*Betula nana*) secondary phloem]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 3, pp. 32–42. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-3-32-42

References

- [1] Jonsell B. *Betula* L. *Flora Nordica*, 2000, v. 1, pp. 197–203.
- [2] Petrov R.Ye., Karsanayev S.V., Maksimov T.K. *Stabiliziruyushchaya rol' kustarnichkovogo pokrova tipichnoy tundry na Severo-Vostoke Rossii* [The stabilizing role of shrub cover of typical tundra in the North-East of Russia] *Yestestvennonauchnyye issledovaniya: itogi i perspektivy razvitiya: mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Natural science research: results and prospects of development: materials of the International Scientific and Practical Conference]*. Yakutsk, November 27, 2018. Yakutsk: NEFU, 2018, pp. 200–206.
- [3] Baykalova L.P., Dolgova N.G. *Kormovyye resursy i ikh ratsional'noye ispol'zovaniye dlya olenevodstva arkticheskoy zony* [Feed resources and their rational utilization for reindeer husbandry in the Arctic zone] *Arktika 2018: mezhdunarodnoye sotrudnichestvo, ekologiya i bezopasnost', innovatsionnyye tekhnologii i logistika, pravovoye regulirovaniye, istoriya i sovremennost': mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Arctic 2018: international cooperation, ecology and safety, innovative technologies and logistics, legal regulation, history and modernity: material. Intl. scientific-practical Conf.]*. Krasnoyarsk, May 16–17, 2018. Yakutsk: Publishing house of the Krasnoyarsk State Agrarian University, 2018, pp. 21–27.
- [4] Romanenko Y.A. *Geokhimicheskaya otsenka kormovykh rasteniy poluostrova Yamal* [Geochemical assessment of forage plants of the Yamal Peninsula]. *Ekologicheskaya bezopasnost' v usloviyakh antropogennoy transformatsii prirodnoy sredy: mater. vserossiyskoy shkoly-seminara, posvyashchennoy pamyati N.F. Reymersa i F.R. Shtil'marka* [Ecological safety in the conditions of anthropogenic transformation of the natural environment: material. All-Russian school-seminar dedicated to the memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark]. Perm, April 22–23, 2021. Perm: Publishing house of Perm State National Research University, 2021, pp. 420–423.
- [5] Vedernikov D.N., Shabanova N.Y., Roshchin V.I. *Izmeneniye khimicheskogo sostava korki i luba berezy povisloy Betula pendula Roth (Betulaceae) po vysote dereva* [Changes in the chemical composition of the bark and bast of silver birch *Betula pendula* Roth (*Betulaceae*) by tree height]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2010, no. 2, pp. 43–48.
- [6] Alekhin N.D., Balnokin Y.V., Gavrilenko V.F., Zhigalova T.V., Meychik N.R., Nosov A.M., Polesskaya O.G., Kharitonashvili Y.V., Chub V.V. *Fiziologiya rasteniy* [Plant physiology: a textbook for students. Universities]. Moscow: Academy, 2007, 640 p.
- [7] Galaktionov O.N., Khyunninen I.A. *Analiz komponentnogo sostava lesosechnykh otkhodov, proiskhozhdeniya i napravleniy utilizatsii* [Analysis of the component composition of logging waste, origin and directions of disposal]. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy: ot teorii k praktike* [Current directions of scientific research: from theory to practice], 2016, no. 4, pp. 214–2018.

- [8] Deyneko I.P., Faustova N.M. *Elementnyy i gruppovoy khimicheskiy sostav kory i drevesiny osiny* [Elemental and group chemical composition of aspen bark and wood]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2015, no 1, pp. 51–62.
- [9] Rowell R.M. Cell wall chemistry. Handbook of wood chemistry and wood composites, 2005, t. 2, pp. 33–72.
- [10] Sinitsyn A.P., Sinitsyna O.A., Rozhkova A.M. *Promyshlennaya biotekhnologiya: vozmozhnosti sozdaniya mikroorganizmov-produtsentov tekhnicheskikh fermentov* [Industrial biotechnology: possibilities for creating microorganisms that produce technical enzymes]. *Aktual'naya biotekhnologiya* [Actual biotechnology], 2022, no. 1, pp. 128–131.
- [11] Galibina N.A., Novitskaya L.L., Nikerova K.M. *Donorno-akseptornyye otnosheniya organov i tkaney berezy povisloy pri al'ternativnykh stsenariyakh ksilogeneza* [Donor-acceptor relationships of organs and tissues of silver birch under alternative scenarios of xylogenesis]. *Fiziologiya rasteniy* [Plant Physiology], 2019, v. 66, no. 2, pp. 128–136.
- [12] Khadyko I.A., Lukina V.A. *Opredeleniye krakhmala v gofrokartone fermentativnym metodom* [Determination of starch in corrugated cardboard by enzymatic method]. *Tekhnologii i oborudovaniye khimicheskoy, biotekhnologicheskoy i pishchevoy promyshlennosti: mater. VII Vserossiyskoy. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhduнародnym uchastiyem* [Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industry: materials. VII All-Russian. scientific-practical conf. students, graduate students and young scientists with international participation]. Bryansk, May 21–23, 2014. Bryansk: Publishing House of Altai State Technical University named after. I.I. Polzunova, 2014, pp. 213–216.
- [13] Nikitina Y.V., Reshetnik O.A., Gubaydullin R.A. *Biotekhnologicheskiye aspekty primeneniya amiloliticheskikh fermentov v pishchevoy promyshlennosti* [Biotechnological aspects of the use of amylolytic enzymes in the food industry]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2013, v. 16, no. 13, pp. 148–153.
- [14] Heinegard D., Oldberg. Structure and biology of cartilage and bone matrix noncollagenous macromolecules. *The FASEB J.*, 1989, t. 3, no. 9, pp. 2042–2051.
- [15] Mohr H., Schopfer P. *Plant physiology*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012, 628 p.
- [16] Fomenko I.A., Tuchkova S.N. *Utilizatsiya tsellyulozosoderzhashchikh otkhodov pri pomoshchi gribov* [Recycling of cellulose-containing waste using mushrooms]. *Novyye tekhnologii* [New technologies], 2021, no. 5, pp. 123–133.
- [17] Novozhilov Ye.V. *Primeneniye kompleksnykh biokatalizatorov na osnove rekombinantnykh fermentnykh preparatov Penicillium verrucosum dlya gidroliza polutsellyulozy iz listvennoy drevesiny* [Application of complex biocatalysts based on recombinant enzyme preparations of *Penicillium verrucosum* for the hydrolysis of semi-cellulose from deciduous wood]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2014, no. 3, pp. 74–80.
- [18] Plyusnina S.N., Zagirova S.V. *Struktura fotosinteticheskogo apparata Betula nana (Betulaceae) na Severnom i Pripolyarnom Urale* [Structure of the photosynthetic apparatus of *Betula nana* (Betulaceae) in the Northern and Subpolar Urals]. *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical J.], 2016, v. 101, no. 3, pp. 261–274.
- [19] Van Gestel N.C. Continuous light may induce photosynthetic downregulation in onion—consequences for growth and biomass partitioning. *Physiologia Plantarum*, 2005, t. 125, no. 2, pp. 235–246.
- [20] Moshchenskaya Y.L., Galibina, N.A., Novitskaya, L.L., Nikerova, K.M. *Rol' sakharozosintazy v akseptornykh organakh drevesnykh rasteniy* [The role of sucrose synthase in the acceptor organs of woody plants]. *Fiziologiya rasteniy* [Plant Physiology], 2019, v. 66, no. 1, pp. 13–25.
- [21] Sleptsov S.I., Khlebnyy Y.S., Zhuravskaya A.N. *Lipidy, zhirnyye kisloty i flavonoidy v list'yakh Amaranthus retroflexus, proizrastayushchego v usloviyakh tsentral'noy Yakutii* [Lipids, fatty acids and flavonoids in the leaves of *Amaranthus retroflexus*, growing in the conditions of central Yakutia]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2017, v. 3, pp. 77–84.
- [22] Galkina Y.Y., Vorob'yeva O.A. *Osobennosti biosinteza fitosterolov pal'my polzuchey i tykvy obyknovnoy, kak komponentov lekarstvennykh sredstv* [Features of the biosynthesis of palmetto and pumpkin phytosterols as components of medicines]. *Sovremennyye problemy biokhimii, genetiki i biotekhnologii: mater. III Vserossiyskoy konferentsii s mezhduнародnym uchastiyem* [Modern problems of biochemistry, genetics and biotechnology: material. III All-Russian Conference with International Participation]. Ufa, September 21–23, 2021. Ufa: Publishing House of RIN BashGU, 2021, pp. 52–55.
- [23] Shirokikh I.G., Ogorodnikova S.Y. *Vliyaniye terpenovykh soyedineniy na rostovyye i fiziologo-biokhimicheskiye pokazateli prorstkov pshenitsy* [Influence of terpene compounds on growth and physiological-biochemical parameters of wheat seedlings]. *Problemy regional'noy ekologii v usloviyakh ustoychivogo razvitiya: mater. Vserossiyskoy nauch.-prakt. konferentsii s mezhduнародnym uchastiyem* [Problems of regional ecology in conditions of sustainable development: material. All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Kirov, November 27–29, 2007, Kirov: VyatGGU Publishing House, 2007, pp. 91–95.
- [24] Zuykevich V.V. *Tanniny v rastitel'nom syr'ye* [Tannins in plant raw materials]. *Biologicheski aktivnyye soyedineniya v zhizni cheloveka: sbornik statey VII universitetskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Biologically active compounds in human life: collection of articles of the VII University Student Scientific and Practical Conference], Brest, December 14, 2017. Brest: BrGU named after A.S. Pushkina, 2018, pp. 34–36.
- [25] Ovodova R.G. *Noveyshiye svedeniya o pektinovykh polisakharidakh* [The latest information about pectin polysaccharides]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra URO RAN* [News of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2010, v. 3, pp. 37–45.
- [26] Mian A.J., Timell T.E. Isolation and characterization of a cellulose from the inner bark of white birch (*Betula papyrifera*). *Canadian J. of Chemistry*, 1960, t. 38, no. 7, pp. 1191–1198.

- [27] Feofilova Y.P., Mysyakina I.S. *Lignin: khimicheskoye stroyeniye, biodegradatsiya, prakticheskoye ispol'zovaniye (obzor)* [Lignin: chemical structure, biodegradation, practical use (review)]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* [Applied biochemistry and microbiology], 2016, v. 52, no. 6. pp. 559–569.
- [28] Tarelkina T.V., Novitskaya L.L. *Vliyaniye ekzogennoy sakharozy na formirovaniye floemy berezy povisloy, ol'khi seroy i osiny* [The influence of exogenous sucrose on the formation of phloem of silver birch, gray alder and aspen]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2019, no. 12, pp. 43–54.
- [29] Levakhin G.I. Duskayev, G.K., Ferapontova, A.S., Ovchinnikov, A.A., Mikolaychik, I.N. *Rol' uglevodov v protsesse pishchevareniya zhvachnykh zhitovnykh (obzor)* [The role of carbohydrates in the process of digestion of ruminants (review)]. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo* [Animal husbandry and feed production], 2015, no. 1 (89), pp. 92–95.
- [30] Kurepin A.A., Shorets R.D., Lemeshevskiy V.O. *Vliyaniye sootnosheniya NDK i KDK v ratsionakh korov na mikrobiologicheskiye i fermentativnyye pokazateli rubtsovogo pishchevareniya* [The influence of the ratio of NDK and KDK in cows' diets on microbiological and enzymatic indicators of rumen digestion]. *Sovremennoye sostoyaniye, perspektivy razvitiya molochnogo zhitovnovodstva i pererabotki sel'skokhozyaystvennoy produktsii: mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf* [Current state, prospects for the development of dairy farming and processing of agricultural products: material. Intl. Scientific-practical Conf.]. Omsk, April 7–8, 2018. Omsk: LITERA, 2016, pp. 96–99.
- [31] Naumov N.M. *Biologicheskii aktivnyye svoystva i lechebno-profilakticheskoye primeneniye pektinov* [Biologically active properties and therapeutic and prophylactic use of pectins]. *Aktual'nyye voprosy sel'skokhozyaystvennoy biologii* [Current issues of agricultural biology], 2018, no. 2 (8), pp. 13–17.

Acknowledgments

We would like to thank Dmitry Germanovich Chukhchin and the staff of the Arctic Research Center of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov for their assistance in conducting this study.

Authors' information

Kamennaya Victoria Andreevna [✉] — Teaching master of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, tory.kobzar@yandex.ru

Aksenov Andrey Sergeevich — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, a.s.aksenov@narfu.ru

Received 10.04.2025.

Approved after review 21.10.2025.

Accepted for publication 14.04.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest