

DOI: <https://doi.org/10.18454/BIO.2024.1.4>**ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ БЕРЕЗЫ ИЗВИЛИСТОЙ**

Научная статья

Тютюкова Е.^{1,*}, Лоскутов С.²¹ ORCID : 0000-0002-2364-4998;² ORCID : 0000-0002-3779-8752;^{1,2} Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (tyukatie[at]gmail.com)

Аннотация

Для изучения климатической реакции основных полимерных компонентов клеточной стенки в годичных кольцах у березы извилистой *Betula Tortuosa* Ledeb., произрастающей в экотоне альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау, впервые использован метод инфракрасной Фурье-спектроскопии (ИКФС). Анализ корреляционной связи между спектральными показателями и средними значениями температуры воздуха и осадков показал, что главным образом погодные условия июня-августа определяют силу межмолекулярных взаимодействий в лигноуглеводной матрице в годичных кольцах у березы извилистой. Основным фактором, лимитирующим формирование «уникальной» полимерной композиции клеточной стенки березы извилистой, является дефицит тепла.

Ключевые слова: *Betula Tortuosa* Ledeb., ИКФС, климат, дендробиохимия, годичное кольцо.**INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON SPECTRAL CHARACTERISTICS OF ANNUAL RINGS OF MOUNTAIN BIRCH**

Research article

Tyutkova E.^{1,*}, Loskutov S.²¹ ORCID : 0000-0002-2364-4998;² ORCID : 0000-0002-3779-8752;^{1,2} Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (tyukatie[at]gmail.com)

Abstract

The method of Fourier infrared spectroscopy (FISS) was used for the first time to study the climatic response of the main polymeric components of the cell wall in the annual rings of the mountain birch *Betula Tortuosa* Ledeb. growing in the ecotone of the alpine forest tundra of the Kuznetsk Alatau. Analysis of the correlation between spectral parameters and average values of air temperature and precipitation showed that mainly weather conditions in June-August determine the strength of intermolecular interactions in the lignocarbhydrate matrix in annual rings in mountain birch. The main factor limiting the formation of the "unique" polymer composition of the cell wall of the birch twisted birch is the lack of heat.

Keywords: *Betula Tortuosa* Ledeb., (FTSS), climate, dendrochemistry, annual ring.**Введение**

Основной путь к пониманию влияния климатических переменных на производительность растений – это интерпретация информации, которая хранится в естественных архивах прошлого. Деревья, как долгоживущие организмы, непрерывно фиксируют экологически значимую информацию в структуре годичных колец и, следовательно, представляют собой природные архивы для изучения глобальных изменений в широком временном и пространственном масштабах [1]. В рамках данного **бэкграунда** Локосселли и Бакеридж [2] вводят в обращение новый термин «дендробиохимия». Термин расширяет понимание взаимосвязи между условиями произрастания дерева и процессами, происходящими в годичном кольце, объединяя «особенности» этих процессов в единую картину. «Особенности» внутри годичных колец должны включать параметры, которые отражают физиологию и биохимию и которые можно измерить аналитически. Наше исследование направлено на поиск ответа на вопрос о внутреннем и внешнем контроле ксилогенеза в изменяющейся среде. Исследование такого рода имеют высокую теоретическую значимость в развитии концепции образования (синтеза) и строения древесинного вещества как природной полимерной композиции. Перспективным подходом в данном случае является использование современного и экспрессного метода исследования такого как инфракрасная Фурье-спектроскопия (ИКФС). ИКФС является одним из распространенных методов определения молекулярных структур, идентификации соединений в биологических образцах, а также исследования сложных полимеров [3]. ИКФС хорошо зарекомендовала себя при анализе основных компонентов древесины, поскольку это быстрый и часто используемый метод определения химического состава сложных образцов. При помощи метода могут быть проанализированы изменения в кристаллической структуре целлюлозы, особенности строения лигнина [4]. Реализованный в нашем исследовании подход с использованием ИКФС позволяет, по-нашему мнению, выйти на новые аспекты в оценке влияния погодных условий на химический состав формирующейся древесины ствола деревьев и прогнозе качества древесины, произрастающей в условиях современного климатического тренда.

Целью нашего исследования является получение информации о биохимической структуре в годичных приростах, сформировавшихся в разных погодных условиях на примере березы извилистой (*Betula Tortuosa* Ledeb.), произрастающей в экотоне альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау.

Методы и принципы исследования

Исследования выполнялись в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау. Экотон горной лесотундры является зоной, где воздействие климата на рост древесной растительности является наиболее значимым вследствие лимита роста по температуре. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что погодные условия вегетационного периода на территории Кузнецкого Алатау по-разному влияют на соотношение основных полимерных компонентов в клеточных стенках ранних и поздних трахеид у *Betula tortuosa* Ledeb. [5]. Для исследования физико-химической неоднородности древесины годичных колец было отобрано 5 здоровых деревьев *Betula tortuosa* L. со следующими характеристиками: деревья здоровые, 1–2 категории жизненного состояния; листва зеленого цвета; средний возраст 60 лет; средний диаметр 15 см; средняя высота 4,6 м. Датировка годичных слоев на взятых с деревьев спилах проводилась на измерительном комплексе LINTAB v6.0. Годичные кольца разделяли под микроскопом при десятикратном увеличении. Приготовленные экспериментальные образцы годичных колец с 1980 по 2015 гг. кондиционировали до равновесного водосодержания, при относительной влажности окружающей среды около 65% и температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Связь исследуемых физико-химических показателей годичных слоев у березы извилистой и климатических переменных оценивалась по величине коэффициента корреляции Спирмана. Динамику изменения показателей среднемесячных значений температуры воздуха и количества среднемесячных осадков и физико-химических показателей выявляли с помощью 5-летней скользящей средней для устранения влияния информационного шума [6]. ИК-спектры были получены с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра «VERTEX 80V» (Bruker Optics, Германия) в спектральном диапазоне $8000 - 350 \text{ см}^{-1}$. Спектральное разрешение $0,2 \text{ см}^{-1}$; воспроизводимость волнового числа $\pm 0,05 \text{ см}^{-1}$. Для снятия спектров использовали тонкие таблетки бромиды калия с запрессованными в них образцами древесины. Взвешивание образцов проводили на лабораторных весах XFR-125E. 1–2 мг древесины растирали в ступке с 100 мг KBr, измельченный материал помещали в пресс-форму, эвакуировали воздух, и прессовали. Анализ спектров осуществляли в программной среде «OPUS». Результаты исследования 35 годичных колец деревьев (1980–2015 гг.) методом ИКФС были представлены в виде ИК-спектров.

Основные результаты

Для выявления периодов в сезоне со значимым влиянием климатических факторов на радиальный прирост применяли расчет и анализ статистических связей спектральных показателей древесинного вещества *Betula tortuosa* L. с климатическими переменными – среднемесячной температурой воздуха и количеством месячных осадков в период 1989–2015 гг. Рассчитанные коэффициенты корреляции Спирмана представлены на рисунках 1 и 2. Связь спектральных показателей со среднемесячной температурой представлена на рисунке 1. Интенсивности полос при 1375 см^{-1} (C–H связей в целлюлозе) и при 1325 см^{-1} (лигнин S типа) показывают высокий значимый уровень отрицательной корреляции ($p < 0,001$) с температурой в мае (-0,59 и 0,66, соответственно). Кроме того, выявлены значимые при $p < 0,001$ отрицательные корреляции интенсивностей полосы при 1325 см^{-1} (лигнин S типа) с августовскими значениями температуры воздуха (-0,57) и полосы при 1268 см^{-1} (метоксильная группа лигнина) (0,64). Значения температуры воздуха в сентябре отрицательно связаны с интенсивностями полос при 1738 см^{-1} (C=O связи в гемицеллюлозах) и при 1506 см^{-1} (C=C связи в лигнине) (-0,61 и -0,73, соответственно). Значимые при $p < 0,001$ коэффициенты корреляции между уровнем среднемесячных осадков и спектральными показателями основных полимерных компонентов древесинного вещества у березы извилистой представлены на рисунке 6. Так, интенсивность полос при 1375 см^{-1} (C–H связей в целлюлозе) и при 1325 см^{-1} (лигнин S-типа) отрицательно связаны с осадками в июне (-0,61 и -0,64, соответственно). Кроме того, выявлена положительная связь интенсивности полосы при 1325 см^{-1} (лигнин S-типа) и июльскими осадками (0,60).

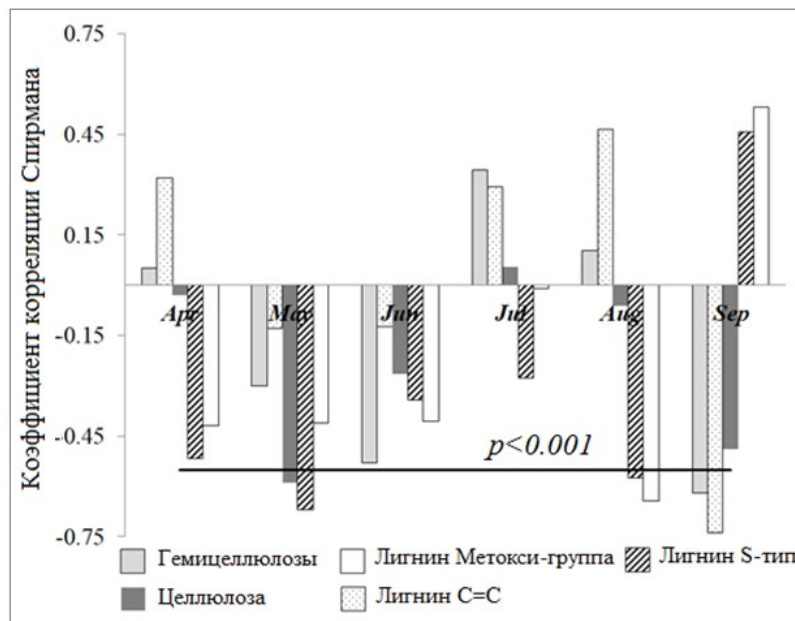


Рисунок 1 - Коэффициенты корреляции между среднемесячной температурой и ИК-спектральными показателями годовичных колец древесины *Betula tortuosa* L.
DOI: <https://doi.org/10.18454/BIO.2024.1.4.1>

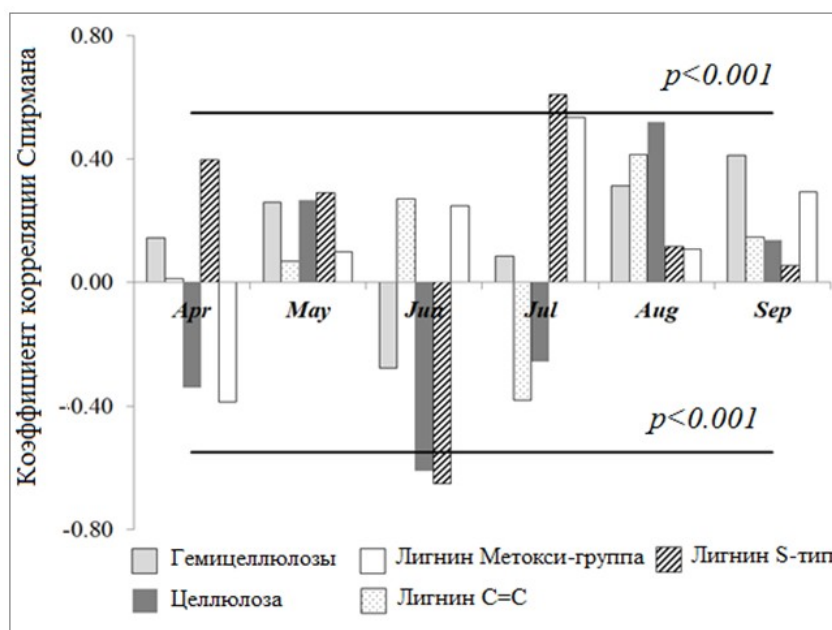


Рисунок 2 - Коэффициенты корреляции между среднемесячными осадками и ИК-спектральными показателями древесины годовичных колец *Betula tortuosa* L.
DOI: <https://doi.org/10.18454/BIO.2024.1.4.2>

Обсуждение

Экотон горной лесотундры является классическим полигоном для оценки влияния температуры на прирост древесных видов [7]. Наибольшее влияние на спектральные показатели лигноуглеводной матрицы оказала температура мая и сентября. В мае на территории экотона значения температуры воздуха становятся положительными и в растительной клетке активируются процессы, связанные с изменениями в составе полисахаридов, в активности ферментов, модифицирующих клеточную стенку, которые приводят к ослаблению межмолекулярных связей в лигноуглеводной матрице. В конце сезона вегетации (август-сентябрь) изменяется структура лигнина и этот процесс происходит во время незначительного понижения температуры в августе и достигает своего пика в сентябре, что влияет на синтез лигнина и как следствие на саму клеточную стенку путем ее укрепления, тем самым предотвращая повреждение от замерзания и коллапса клеток растения [8]. Упрочнение межмолекулярных связей в лигнине в этот

период может быть связан с накоплением фенольных соединений. Высокое содержание фенольных соединений отмечается в осенний период, что соответствовало периоду вхождения растений в покой [9].

На территории экотона Кузнецкого Алатау осадки угнетают прирост древесной растительности. Отрицательные корреляции спектральных характеристик лигнина и целлюлозы выявлены с июньскими осадками. Положительная корреляция спектральных характеристик лигнина с осадками найдена в июле. Так, выявлено, что при понижении количества осадков в мае межмолекулярные взаимодействия в целлюлозе усиливаются. Реакция инфракрасных спектров целлюлозы на дефицит влаги еще до конца не изучена, тем не менее, в ряде исследований сообщается, что **биосинтез целлюлозы** может изменяться в ответ на дефицит воды, о чем свидетельствует снижение содержания целлюлозы у нескольких различных видов растений [10]. Ориентация микрофибрилл целлюлозы и состав клеточной стенки являются важными факторами, которые определяют направление роста клеток, подразумевая, что целлюлоза может прямо или косвенно регулироваться доступностью воды [11]. Кроме того, в ряде исследований выявлено, что в ответ на водный стресс значение модуля упругости клеточных стенок, некоторых растений увеличивался и это указывает на тот факт, что жесткие стенки клеток могут быть необходимы для поддержания целостности клеток и тканей во время регидратации после периода стресса [12], [13]. В мае также выявлено влияние осадков на силу межмолекулярных взаимодействий в лигнине.

Лигнификация – это сложный процесс, который протекает при участии множества фенольных субстратов и ферментов [14]. Выявлено, что лигнификация может быть преждевременной: подобное явление происходит, когда активизируются процессы, которые связаны с подготовкой растительной клетки к холоду, чтобы избежать повреждения клеточной стенки в тот момент, когда растение подвергается водному стрессу [9], [16] что, по нашему мнению, могло способствовать упрочению связей в лигнине в июне. При некотором повышении количества осадков в июле интенсивность межмолекулярных связей в лигнине тоже увеличивается. В настоящее время доступно очень мало данных об активности ферментов и сигнальных процессах, которые регулируют ответ синтеза ароматической компоненты на повышение уровня влаги в процессах лигнификации.

Заключение

В настоящем исследовании с применением метода ИКФС получен новый фактический материал, характеризующий спектральные особенности годичных колец березы извилистой. Выявлено, что погодные условия сезона роста существенно влияют на силу межмолекулярных взаимодействий в лигноуглеводной матрице каждого годичного кольца:

- 1) в апрель-майский период предсезонной реактивации камбия и начала сезона роста при незначительном повышении температуры воздуха отмечено усиление межмолекулярных взаимодействий в лигноуглеводной матрице;
- 2) в конце сезона вегетации межмолекулярные взаимодействия в лигноуглеводной матрице ослабевают с понижением температуры;
- 3) обильные осадки определяют силу взаимодействий между основными полимерными компонентами в клеточной стенке древесинного вещества у березы извилистой;
- 4) ароматическая компонента годичных колец оказалась более чувствительной к изменяющимся климатическим факторам, чем углеводная;
- 5) основным фактором, лимитирующим формирование «уникальной» полимерной композиции клеточной стенки березы извилистой, произрастающей в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау, является дефицит тепла.

Исследование показало, что метод ИКФС эффективен для детализации характеристик годичных колец у *Betula tortuosa* L., полученных на основе их физико-химических параметров в зависимости от климатических условий вегетационного периода. Применение этого метода позволит, по-нашему мнению, количественно прогнозировать последствия современного климатического тренда.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, тема «Стратегия адаптивного управления бореальными лесами Сибири в условиях глобальных изменений», № 21-46-07002.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation, theme "Strategy of Adaptive Management of Siberian Boreal Forests under Global Changes", No. 21-46-07002.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Churakova (Sidorova) O. V. Heterogeneous Response of Siberian Tree-ring and Stable Isotope Proxies to the Largest Common Era Volcanic Eruptions / O. V. Churakova (Sidorova), M. V. Fonti, M. Saurer et al. // *Climate of the Past*. — 2019. — 15. — P. 685–700.
2. Locosselli G. M. Dendrochemistry, a Missing Link to Further Understand Carbon Allocation during Growth and Decline of Trees / G. M. Locosselli, M. S. Buckeridge // *Trees*. — 2017. — 6. — P. 1745–1758.

3. Hult E. L. Characterization of the Supermolecular Structure of Cellulose in Wood Pulp Fibres / E. L. Hult, T. Iversen, J. Sugiyama // *Cellulose*. — 2003. — 10. — P. 103–110.
4. Nada A. M. A. Thermal Behavior and Infrared Spectroscopy of Cellulose Carbamates / A. M. A. Nada, S. Kamal, M. El-Sakhawy // *Polymer Degradation and Stability*. — 2000. — 3. — P. 447–354.
5. Tyutkova E. A. Thermal Responses of Mountain Birch and Siberian Larch of an Alpine Forest-tundra Ecotone to Climate Change / E. A. Tyutkova, I. A. Petrov, S. R. Loskutov // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. — 2017. — 147. — P. 3625–3632.
6. Шиятов С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале / С. Г. Шиятов. — Москва : Наука, 1986. — 136 с.
7. Schweingruber F. H. Dendrochronology – an Extremely Exact Measuring Tool for the Study of Environmental and Human History / F. H. Schweingruber // *Naturwissenschaften*. — 1996. — 83. — P. 370–377.
8. Moura J. C. M. S. Abiotic and Biotic Stresses and Changes in the Lignin Content and Composition in Plants / J. C. M. S. Moura, C. A. V. Bonine, J. de Oliveira Fernandes Viana et al. // *Journal of Integrative Plant Biology*. — 2010. — 52. — P. 360–376.
9. Прусакова Л. Д. Роль фенольных соединений в растениях / Л. Д. Прусакова, В. И. Кефели, В. В. Вакуленко и др. // *Агрохимия*. — 2008. — 52. — С. 86–96.
10. Piro G. Exposure to Water Stress Causes Changes in the Biosynthesis of Cell Wall Polysaccharides in Roots of Wheat Cultivars Varying in Drought Tolerance / G. Piro, M. R. Leucci, K. Waldron et al. // *Plant Science*. — 2003. — 165. — P. 559–569.
11. Peaucelle A. The Control of Growth Symmetry Breaking in the Arabidopsis Hypocotyls / A. Peaucelle, R. Wightman, R. Hofte // *Current Biology*. — 2015. — 13. — P. 1746–1752.
12. Tardieu F. Any Trait or Trait-related Allele Can Confer Drought Tolerance: Just Design the Right Drought Scenario / F. Tardieu // *Journal of Experimental Botany*. — 2011. — 1. — P. 25–31.
13. Hessini K. Effect of Water Stress on Growth, Osmotic Adjustment, Cell Wall Elasticity and Water-use Efficiency in *Spartina Alterniflora* / K. Hessini, J. P. Martínez, M. Gandour et al. // *Environmental and Experimental Botany*. — 2009. — 67. — P. 312–319.
14. Wang Y. Plant Cell Wall Lignification and Monolignol Metabolism / Y. Wang, M. Chantreau, R. Sibout et al. // *Frontiers in Plant Science*. — 2013. — 4.
15. Thomashow M. F. Plant Cold Acclimation: Freezing Tolerance Genes and Regulatory Mechanisms / M. F. Thomashow // *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. — 1999. — 50. — P. 571–599.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Churakova (Sidorova) O. V. Heterogeneous Response of Siberian Tree-ring and Stable Isotope Proxies to the Largest Common Era Volcanic Eruptions / O. V. Churakova (Sidorova), M. V. Fonti, M. Saurer et al. // *Climate of the Past*. — 2019. — 15. — P. 685–700.
2. Locosselli G. M. Dendrobiochemistry, a Missing Link to Further Understand Carbon Allocation during Growth and Decline of Trees / G. M. Locosselli, M. S. Buckeridge // *Trees*. — 2017. — 6. — P. 1745–1758.
3. Hult E. L. Characterization of the Supermolecular Structure of Cellulose in Wood Pulp Fibres / E. L. Hult, T. Iversen, J. Sugiyama // *Cellulose*. — 2003. — 10. — P. 103–110.
4. Nada A. M. A. Thermal Behavior and Infrared Spectroscopy of Cellulose Carbamates / A. M. A. Nada, S. Kamal, M. El-Sakhawy // *Polymer Degradation and Stability*. — 2000. — 3. — P. 447–354.
5. Tyutkova E. A. Thermal Responses of Mountain Birch and Siberian Larch of an Alpine Forest-tundra Ecotone to Climate Change / E. A. Tyutkova, I. A. Petrov, S. R. Loskutov // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. — 2017. — 147. — P. 3625–3632.
6. Shijatov S. G. Dendrokhronologija verhnjej granitsy lesa na Urale [Dendrochronology of the Upper Forest Limit in the Urals] / S. G. Shijatov. — Moskva : Nauka, 1986. — 136 p. [in Russian]
7. Schweingruber F. H. Dendrochronology – an Extremely Exact Measuring Tool for the Study of Environmental and Human History / F. H. Schweingruber // *Naturwissenschaften*. — 1996. — 83. — P. 370–377.
8. Moura J. C. M. S. Abiotic and Biotic Stresses and Changes in the Lignin Content and Composition in Plants / J. C. M. S. Moura, C. A. V. Bonine, J. de Oliveira Fernandes Viana et al. // *Journal of Integrative Plant Biology*. — 2010. — 52. — P. 360–376.
9. Prusakova L. D. Rol' fenol'nyh soedinenij v rastenijah [The Role of Phenolic Compounds in Plants] / L. D. Prusakova, V. I. Kefeli, V. V. Vakulenko et al. // *Agrochemistry*. — 2008. — 52. — P. 86–96. [in Russian]
10. Piro G. Exposure to Water Stress Causes Changes in the Biosynthesis of Cell Wall Polysaccharides in Roots of Wheat Cultivars Varying in Drought Tolerance / G. Piro, M. R. Leucci, K. Waldron et al. // *Plant Science*. — 2003. — 165. — P. 559–569.
11. Peaucelle A. The Control of Growth Symmetry Breaking in the Arabidopsis Hypocotyls / A. Peaucelle, R. Wightman, R. Hofte // *Current Biology*. — 2015. — 13. — P. 1746–1752.
12. Tardieu F. Any Trait or Trait-related Allele Can Confer Drought Tolerance: Just Design the Right Drought Scenario / F. Tardieu // *Journal of Experimental Botany*. — 2011. — 1. — P. 25–31.
13. Hessini K. Effect of Water Stress on Growth, Osmotic Adjustment, Cell Wall Elasticity and Water-use Efficiency in *Spartina Alterniflora* / K. Hessini, J. P. Martínez, M. Gandour et al. // *Environmental and Experimental Botany*. — 2009. — 67. — P. 312–319.
14. Wang Y. Plant Cell Wall Lignification and Monolignol Metabolism / Y. Wang, M. Chantreau, R. Sibout et al. // *Frontiers in Plant Science*. — 2013. — 4.

15. Thomashow M. F. Plant Cold Acclimation: Freezing Tolerance Genes and Regulatory Mechanisms / M. F. Thomashow // *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. — 1999. — 50. — P. 571–599.