

DOI: 10.12737/article_5b97a164e41782.20107217

УДК [630*232.318 +535.651 :(535.34+535-15 + 535.243.2)] : 630*651.72

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕМЕННОЙ КОЖУРЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

кандидат технических наук, доцент **А. И. Новиков**¹

кандидат физико-математических наук, доцент **В. В. Саушкин**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Выбор технологии и технических средств для тестирования семян формируется на основании аналитической информации об использовании новых неразрушающих методик оптического контроля при создании альтернативных технологий искусственного лесовосстановления. Основанием для проведения исследований является различная поглощающая способность семенной кожуры при воздействии инфракрасного излучения. Исследование проводили путем измерения фотометрических величин семенной кожуры и их спектров в диапазоне от 999,1373 до 4999,5440 см⁻¹ с шагом 1,929 см⁻¹. В качестве приборной базы использовали инфракрасный Фурье-спектрометр ФСМ-2201. Установлено, что в диапазоне от 2700 до 3700 см⁻¹ спектры семян имеют пологую характеристику, а срез древесины – ярко выраженный экстремум, объясняемый содержанием влаги. Основные тренды развития анализа лесосеменного материала биофизическими методами направлены на получение надежного протокола анализа и последующей сортировки семян по качественному признаку, учитывающему показатели жизнеспособности семян. Важным фактором таких методов является неразрушающий контроль качества семян для повышения посевных характеристик и возникновение предпосылок для проектирования мобильных устройств экспресс-анализа и аэросева, в совокупности снижающих материал- и энергоемкость высева, а также экологическую нагрузку на окружающую среду. Использование спектрометрии в инфракрасном диапазоне частот для изучения кожуры семян сосны обыкновенной выдвигает альтернативную гипотезу о существовании значимых различий ($p=0,05$) между цветосеменными партиями. При этом возможна более точная градация семян по цвету, которая позволяет выявлять нежизнеспособные семена по содержанию гидроксильных групп в кожуре. Полученные результаты позволяют скорректировать процесс проектирования экспресс-анализатора качества семян.

Ключевые слова: инфракрасная спектроскопия, спектр поглощения, биофизические методы, лесное хозяйство, лесовосстановление, семена сосны обыкновенной, цвет семенной кожуры, качественный признак, экспресс-анализатор.

STUDY OF SPECTROMETRIC PARAMETERS OF SCOTS PINE SEED COAT IN IR RANGE

PhD in Engineering, Associate Professor **A. I. Novikov**¹

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor **V. V. Saushkin**¹

1 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation

Abstract

The choice of technology and technical means for seed testing is formed on the basis of analytical information on the use of new non-destructive optical control techniques in the development of alternative technologies for artificial reforestation. The basis for research is different absorbing capacity of seed coat when it is exposed to infrared radiation. The study has been carried out by measuring the photometric values of the seed coat and their spectra in the range from 999.1373 to 4999.5440 cm⁻¹ with a step of 1.929 cm⁻¹. The infrared Fourier spectrometer FSM-2201 has been used as the instrument base. It has been established that the seed of spectra have flat characteristic, and the cut of wood has a pronounced extremum due to the moisture content in the range from 2700 to 3700 cm⁻¹. The main trends in the development of analysis of forest seed material by biophysical methods are aimed at obtaining a reliable protocol for analysis and subsequent sorting of seeds

according to a qualitative criterion that takes into account the viability of seeds. An important factor of such methods is nondestructive quality control of seeds to increase seeding characteristics and emergence of prerequisites for design of mobile express analysis devices and aerial lines that together reduce material and energy consumption of seeding, as well as environmental load on the environment. The use of spectrometry in the infrared frequency range to study the coat of *Pinus sylvestris* seeds suggests an alternative hypothesis about the existence of significant differences ($p = 0.05$) between the color-seeds batches. In this case, a more accurate gradation of seeds by color is possible, which enables to identify non-viable seeds by the content of hydroxyl groups in the coat. The obtained results allow correcting the designing process of express quality analyzer of seeds.

Keywords: infrared spectroscopy, absorption spectrum, biophysical methods, forestry, reforestation, pine seeds, seed coat color, qualitative character, express analyzer.

Введение. Качество лесосеменного материала (Hampton, 2002) определяет процесс онтогенеза на ювенильной стадии развития древесных растений в современном лесовосстановлении. Оптическое излучение играет важнейшую роль в оценке и подготовке репродуктивного материала для высева и хранения. Основным движущим фактором для проведения исследования (Новиков, 2000, 2015, 2017), имеющим определенное значение в генетическом разнообразии (Ivetic et al., 2017) ввиду высокой наследуемости фена окраски семян (Правдин, 1960; Черепнин, 1964; Видякин, 2001; Чернодубов, 2001; Тараканов, 2003; Рогозин, 2012), является различная способность поглощения последними излучения в видимом, инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах длин волн.

Отметим, что потомство сосны обыкновенной, полученное из семян со светлой окраской кожуры, резко «меняет ранги времени прорастания и колебания частоты лучших семей от 0 до 400 % от нормы» (Рогозин, 2012).

Изучением механизмов использования оптического излучения для диагностики и анализа биологических объектов (семян, растений, плодов, древесных композитов) занимались многие ученые, в том числе С. Müller-Olsen et al. (1956), М. Simak (1957), И.И. Свентицкий и Д.В. Свентицкая (1985), Н.-Ф. Linskens & J.F. Jackson (1992), С.Д. Тимченко (1993), Eila Tillman-Sutela и Anneli Kauppi (1995), Т.А. Lestander & P.C. Odén (2002), Т. Repo et al. (2002), W. Hugo & P. Dominguez (2004), М. Tigabu et al. (2005), А.В. Будаговский (2006), А.Н. Обыкновенный (2008), М. Farhadi et al. (2015), М.Н. Olesen et al. (2015), Н.Н. Матвеев и др. (2017).

Ученые из Финского лесного научно-

исследовательского института, филиала Рованиеми (*Finnish Forest Research Institute – Rovaniemi Unit*), Eila Tillman-Sutela и Anneli Kauppi, изучая процессы впитывания жидкости семенами сосны обыкновенной (набухания *imbibition*) и рассматривая спектры поглощения экстрактов из оболочек темных (*dark*) и светлых (*light*) рас семян в видимом и ультрафиолетовом диапазонах, установили, что «окраска семян обусловливается количеством и локализацией фенолсодержащих пигментов в оболочке» (Tillman-Sutela & Kauppi, 1995).

А.В. Будаговский, изучая реакцию биологических объектов на лазерное облучение в спектральных интервалах поглощения 350-500 нм (криптохром) и 600-690 нм (фитохром), установил, что «максимумы стимуляционного эффекта варьируют в диапазоне от долей секунды до десятков минут» (Будаговский, 2006), что дает возможность предположить возникновение данного эффекта даже во время экспресс-диагностики семян.

Сотрудники Воронежского государственного лесотехнического университета под руководством Н.Н. Матвеева (2017), изучая особенности микроструктуры древесных композитов в ИК-диапазоне, получили характерную интерферограмму среза древесины сосны обыкновенной с малым содержанием влаги, имеющем в диапазоне 3300-3400 см⁻¹ резко выраженный минимум (рис. 5, зеленая кривая).

Рассмотрим известные сведения о взаимосвязи цвета кожуры семян с ростом и развитием лесных культур. Изменчивость фена цвета кожуры семян может быть связанас генетическим разнообразием, а также с признаками развития заболевания, которые, в свою очередь, в различных интерпретациях зависят от географического положения, почвенных условий и

других частных критериев. Возможность точного автоматического разделения семян по цвету семенной кожуры без травмирования последних привела бы к созданию новых мобильных устройств, работающих совсем по иному принципу, чем существующие сепараторы и сортировщики.

Допустим, что цвет семенной кожуры является определенным индикатором, позволяющим осуществлять экспресс-анализ репродуктивного материала на предмет жизнеспособности, всхожести, наследственности. Необходимо провести ряд исследований во всем спектральном диапазоне для определения оптимального способа анализа семян сосны обыкновенной и применения полученных результатов в новых конструкциях экспресс-анализатора.

За нулевую гипотезу принимаем отсутствие значимого различия в ИК-спектральном распределении у соседних цветосеменных партий.

Материалы и методы. Предметом исследования явились семена сосны обыкновенной (сбор 2014 года, Павловское лесничество – Павловский филиал казённого учреждения Воронежской области «Лесная охрана»), которые после хранения извлекали из стеклянных емкостей, выдерживали не менее 24 часов в комнатных условиях. Репродуктивный материал предварительно разделили на серийно выпускающемся фотосепараторе, затем отнесли визуально по шкале А.С. Бондарцева(1954) к трем партиям: имеющие желтовато-белый (рис. 1, а), охряный (рис. 1, б) и темно-бурый (рис. 1, в) окрас кожуры. Отметим, что использование данной шкалы ввиду индивидуальных особенностей человеческого глаза мы находим весьма спорным, однако преимущественно все предыдущие исследования в этой области были основаны на ней.

В качестве объекта исследования брали спектры поглощения семенной кожуры сосны обыкновенной. Спектры получали в 3- или 5-кратной повторности по стандартной методике на инфракрасном фурье-спектрометре модели ФСМ-2201 производства ООО «Инфраспек» (Санкт-Петербург) с отношением сигнал/шум > 60 000.

Принцип действия спектрометра заключается в прохождении оптического излучения, создаваемого гелий-неоновым лазером, через интерферометр, на выходе которого регистрируется интерферограмма,

представляющая собой зависимость интенсивности светового потока от оптической разности хода.



Рис. 1. Семена сосны обыкновенной, разделенные на партии по цвету кожуры:
а – желтовато-белый (Eburneus); б – охряный (Ochraceus); в – темно-бурый (Brunneus)

Спектр поглощения как зависимость интенсивности излучения от волнового числа получается путем обратного преобразования Фурье интерферограммы, выполняемого с использованием персонального компьютера с базовой версией прикладного программного обеспечения FSpec (Сикорский и Стельмах, 2014). По оси абсцисс традиционно откладывали волновое число k электромагнитного излучения в обратных сантиметрах, по оси ординат – значения пропускания T в процентах.

Перед каждым измерением определяли спектр среды (воздуха), затем фиксировали кожуру с помощью специального приспособления в кювете спек-

трометра. Измерение интенсивности оптического излучения, прошедшего сквозь каждую отобранную для исследований семенную кожуру, и его спектральных распределений проводили в диапазоне изменения волнового числа от 999,1373 до 4999,5440 см^{-1} с шагом 1,929 см^{-1} за период 30 с. Спектр среды вычитался из полученного экспериментального интегрального спектра образцов.

Результаты. Спектры поглощения всех цветковых групп семян разобьем на две зоны: деформационных (левая часть спектра) и валентных колебаний (правая часть). В области низких значений энергии падающего излучения полосы пропускания имеют скачкообразную форму от 1400 до 1700 см^{-1} и абсолютный максимум в районе 1900 см^{-1} (пропускание $T = 100\%$, поглощение излучения отсутствует). В области высоких значений энергии падающего излучения, вызывающих деформационные изменения между колеблющимися атомами в молекуле, полосы пропускания имеют изгиб с маленьким плато от 2200 нм до 2400 см^{-1} , пологую характеристику (площадку) от 2700 до 3700 см^{-1} .

Наименьшей вариаторностью колебаний спектральных полос внутри цветосеменных партий обладает кожура светлого окраса (рис. 2), средней – пестроокрашенные (рис. 3) и максимальной – темноокрашенные (рис. 4). Диапазоны валентных колебаний гидроксильной группы (3550-3720 см^{-1}) и групп СН (2850-3050 см^{-1}) присутствуют с разной степенью пропускания у кожуры семян всех цветовых групп. Однако среди светлых семян встречаются и такие, кожура которых при волновом числе 3030 см^{-1} имеет явно выраженный максимум (рис. 5, синяя линия), что, возможно, свидетельствует о присутствии ароматических структур. Более того, приближение спектра данной кожуры по характеру изменения пропускания в области 3400 см^{-1} к спектру высушенной древесины дает возможность высказать предположение о меньшем по сравнению с остальными образцами содержанием влаги и, соответственно, меньшей жизнеспособностью данного семени. Однако этот вопрос является достаточно дискуссионным и требует проведения дополнительных исследований.

Характер изменения интенсивности поглощения излучения в области деформационных колебаний гидроксильных групп указывает на возможность условного деления спектра кожуры на четыре интерва-

ла: от 0 до 10 %, от 11 до 20 %, от 21 до 30 %, от 31 до 40 %, которые характерно прослеживаются. При этом четко идентифицировать, например, наличие в диапазоне от 0 до 10 % семян только с светлым окрасом кожуры (рис. 2) не получится, так как на рис. 5 (фиолетовая линия) в этом диапазоне располагается спектральная линия семени с темным цветом кожуры. Предположительно, кожура семян сосны обыкновенной состоит из нескольких слоев, и разделение будет осуществляться не по внешнему, различимому глазом слою, а по одному из внутренних слоев.

Обсуждение. Основные тренды развития анализа лесосеменного материала биофизическими методами направлены на:

- создание надежного протокола анализа и последующей сортировки семян по качественному признаку, в достаточной мере учитывающего показатели жизнеспособности;
- создание методов неразрушающего контроля качества семян для повышения посевных качеств;
- создание предпосылок для проектирования мобильных устройств экспресс-анализа и аэросева, в совокупности снижающих материало- и энергоемкости высева и экологическую нагрузку на окружающую среду.

Заключение. Использование спектрометрии в инфракрасном диапазоне частот для изучения кожуры семян сосны обыкновенной дает возможность:

1. Опровергнуть нулевую гипотезу, выдвинув альтернативную, заключающуюся в существовании значимых различий ($p = 0,05$) между цветосеменными партиями. Наряду с этим необходимо разработать более точную градацию семян по цвету, обосновав выбор диапазона.
2. Прогнозировать возможность выявления нежизнеспособных семян по содержанию гидроксильных групп в кожуре.
3. Планировать очередной эксперимент, включающий дополнительное исследование спектров поглощения с учетом многослойности кожуры, а также диффузного отражения семян в инфракрасной и видимой областях спектра и с использованием люминесценции.
4. Проектировать экспресс-анализаторы качества семян с учетом полученных результатов.

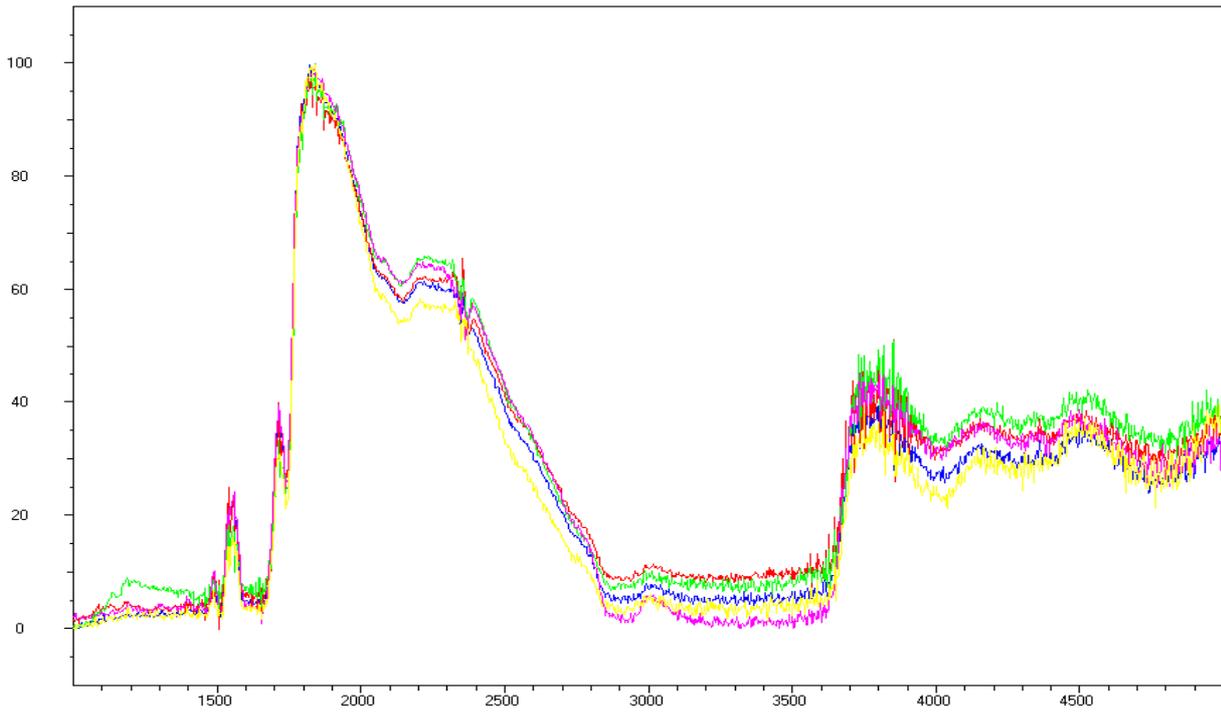


Рис. 2. ИК-спектр поглощения светлоокрашенной кожуры семян сосны обыкновенной

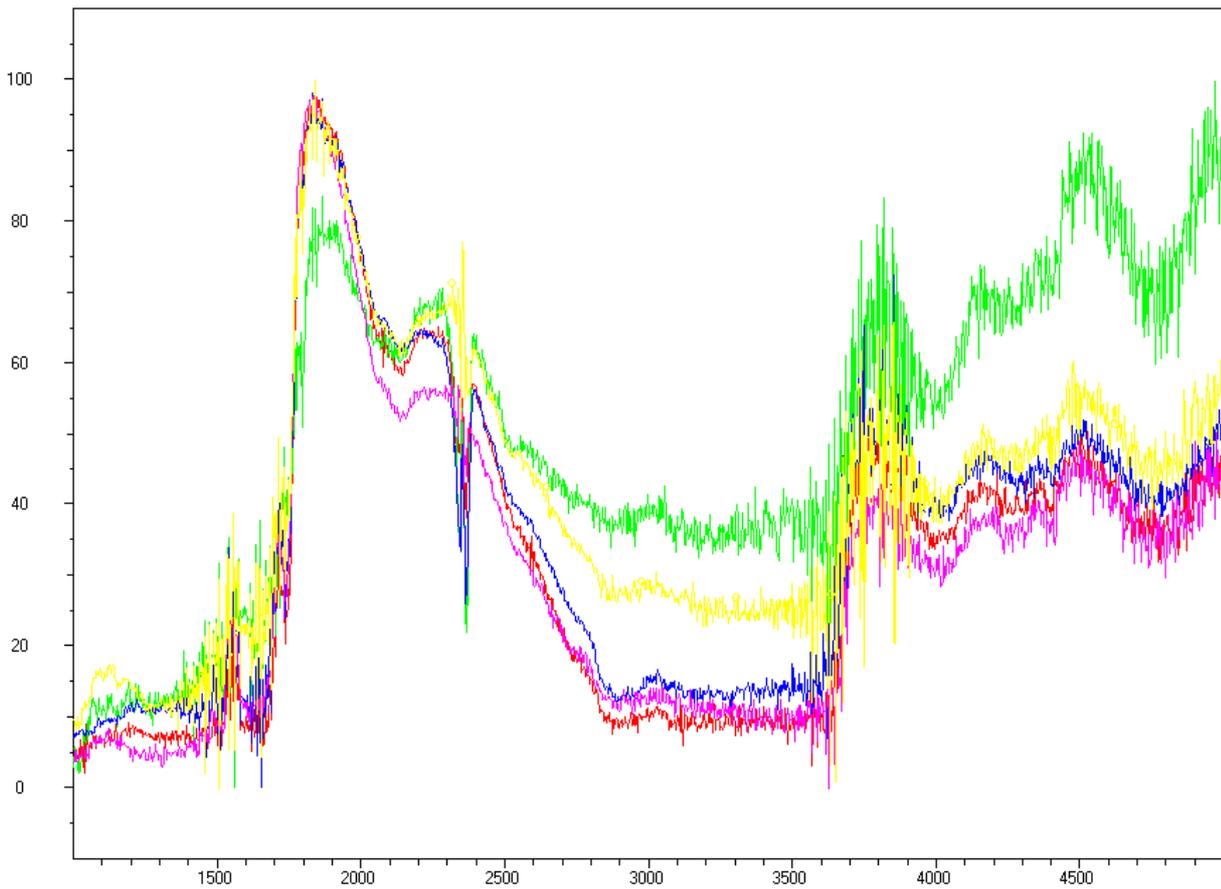


Рис. 3. ИК-спектр поглощения пестроокрашенной кожуры семян сосны обыкновенной

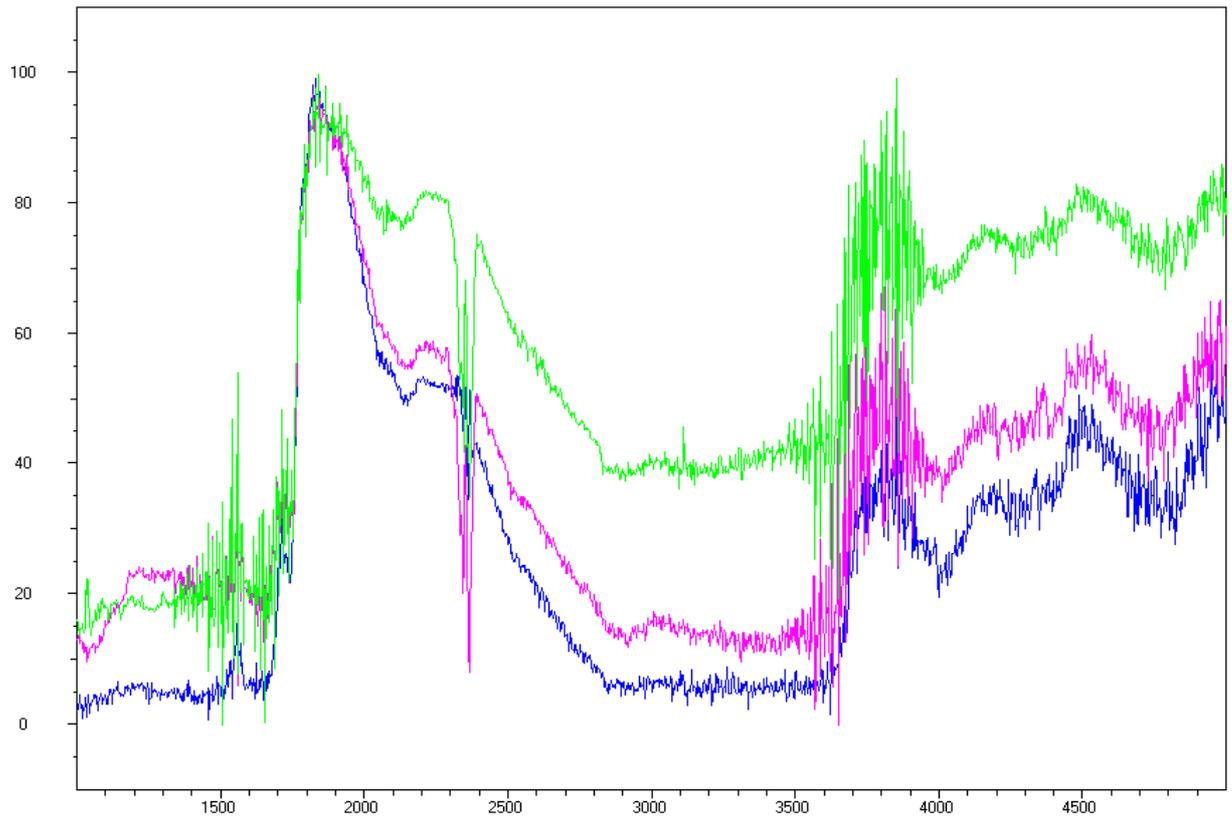


Рис. 4. ИК-спектр поглощения темноокрашенной кожуры семян сосны обыкновенной

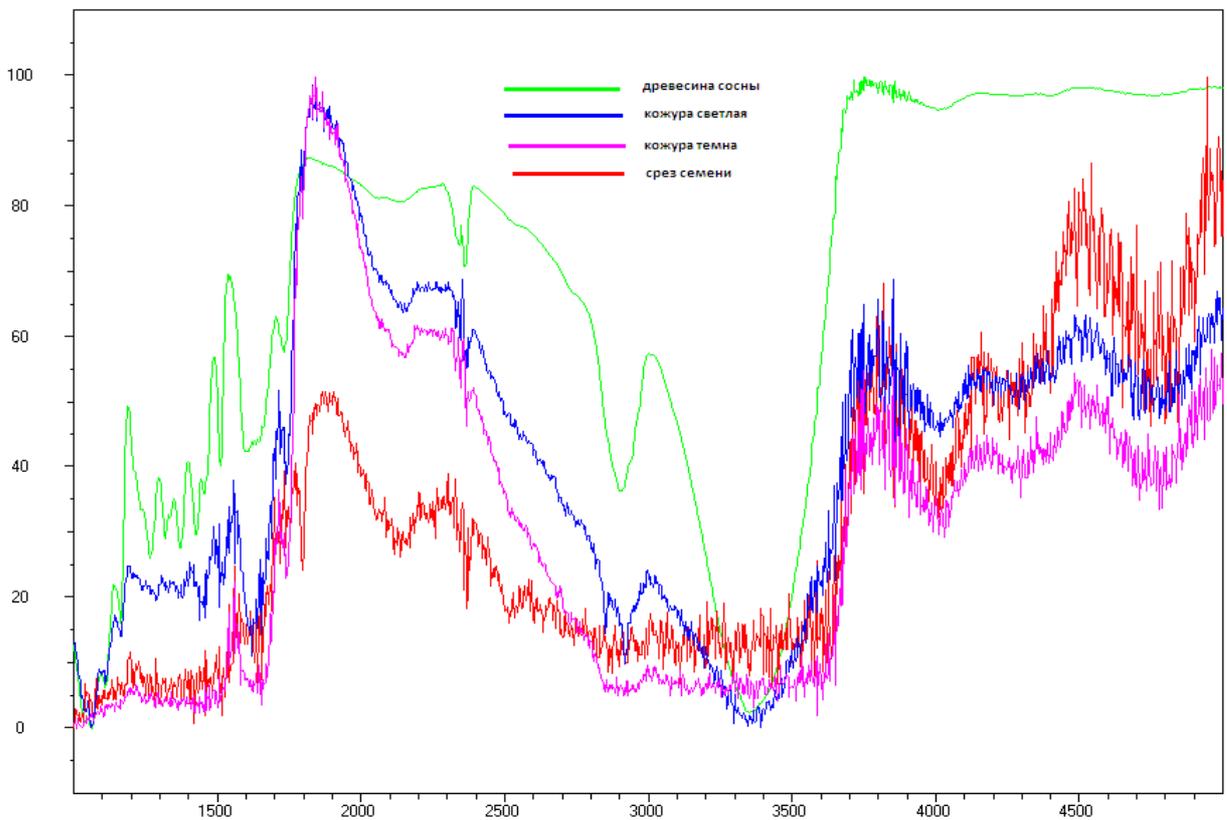


Рис. 5. ИК-спектр поглощения образцов кожуры семян, среза семени и среза древесины сосны обыкновенной

Благодарности

Работа выполнена при поддержке научного гранта ВГЛТУ им Г.Ф. Морозова.

Отдельную благодарность авторы выражают кафедре общей и прикладной физики ВГЛТУ в лице

зав. кафедрой профессора Н.Н. Матвеева за предоставленную возможность проводить исследования в лаборатории кафедры и ценные замечания в методических аспектах.

Библиографический список

1. Бондарцев, А. С. Шкала цветов (пособие для биологов при научных и научно-прикладных исследованиях) [Текст] / А. С. Бондарцев. – М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1954. – 28 с.
2. Будаговский, А. В. Совершенствование электротехнологических методов лазерной обработки растений и плодов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А. В. Будаговский. – М., 2006. – 25 с.
3. Видякин, А. И. Фены лесных древесных растений: выделение, масштабирование и использование в популяционных исследованиях (на примере *Pinus sylvestris* L.) [Текст] / А. И. Видякин // Экология. – 2001. – № 3. – С. 197-202.
4. Возможности ИК-спектроскопии при анализе микроструктуры композитов на основе древесины [Текст] / Н. Н. Матвеев, Н. Ю. Евсикова, Н. С. Камалова, В. В. Саушкин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5. № 5 (31). – С. 115-119.
5. Новиков, А. И. Некоторые технологические особенности сортировальных устройств и тенденции их развития [Текст] / А. И. Новиков // Лес и молодежь ВГЛТА - 2000 г. : матер. юбилейной научной конференции молодых ученых, посвящен. 70-летию образования Воронежской государственной лесотехнической академии: в 2 т. – Воронеж, 2000. – Т. 2. – С. 53-60.
6. Новиков, А. И. Роль качества лесосеменного материала в процессе повышения эффективности лесовосстановления [Текст] / А. И. Новиков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3., № 2-2 (13-2). – С. 61-63.
7. Новиков, А. И. Дисковые сепараторы семян в лесохозяйственном производстве [Текст] : моногр. / А. И. Новиков. – Воронеж, 2017. – 159 с.
8. Обычный, А. Н. Определение экзэргии оптического излучения в растениеводстве [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А. Н. Обычный. – М., 2008. – 25 с.
9. Правдин, Л. Ф. Основные закономерности географической изменчивости сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) [Текст] / Л. Ф. Правдин // Основы лесоведения и лесоводства : докл. на V лесн. конгрессе. – М., 1960. – С. 245-250.
10. Рогозин, М. В. Влияние окраски семян сосны обыкновенной на рост потомства [Текст] / М. В. Рогозин // Вестник ПГУ. Биология. – 2012. – № 3. – С. 18-22.
11. Сикорский, В. В. Методы спектрометрии и фотометрии [Текст] / В. В. Сикорский, Г. Ф. Стельмах. – Минск, 2014. – 99 с.
12. Свентицкий, И. И. Биофотометрия и анализ потоков энергии в растениеводстве [Текст] / И. И. Свентицкий, Д. В. Свентицкая. – М. : ВНИИТЭИСХ, 1985. – 61 с.
13. Тараканов, В. В. Структура изменчивости, селекция и семеноводство сосны обыкновенной в Сибири [Текст] : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.01 / В. В. Тараканов. – Новосибирск, 2003.
14. Тимченко, С. Д. Спектрально-оптические критерии определения всхожести семян [Текст] : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.05 / С. Д. Тимченко. – М., 1993.
15. Черепнин, В. Л. Селекционное значение происхождения семян сосны обыкновенной, их веса и цвета [Текст] / В. Л. Черепнин // Селекция древесных пород в Восточной Сибири. – М. : Наука, 1964. – С. 58-68.
16. Чернодубов, А. И. Наследование цвета семенной кожуры потомствами сосны обыкновенной [Текст] / А. И. Чернодубов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2001. – № 3. – С. 134-136.
17. Farhadi, M. Near Infrared Spectroscopy as non-destructive method for sorting viable, petrified and empty

- seeds of *Larix sibirica*. [Text] / M. Farhadi, M. Tigabu, P.C. Odén // *Silva Fennica*. – 2015. – Vol. 49. – Id 1340.
18. Hampton, J. G. What is seed quality? [Text] / J. G. Hampton // *Seed Science and Technology*. – 2002. – Vol. 30. – P. 1-10.
19. Hugo, W. Use of near infrared reflectance spectroscopy to identify seeds of noxious weeds, forage legume seeds and contamination [Text] / W. Hugo, P. Dominguez // *Proceedings of the “27th ISTA Congress Seed Symposium”*, Budapest, Hungary, 17-19 May 2004. International Seed Testing Association (ISTA). – 2004, Bassersdorf, Switzerland. – P. 7.
20. Ivetić, V. Concerns and evidence on genetic diversity in planted forests [Text] / V. Ivetić, J. Devetaković // *Reforesta*. – 2017. – Vol. 2. – No. 3. – P. 196-207.
21. Lestander, T. A. Separation of viable and non-viable filled Scots pine seeds by differentiating between drying rates using single seed near infrared transmittance spectroscopy [Text] / T. A. Lestander, P. C. Odén // *Seed Science and Technology*. – 2002. – Vol. 30. – No. 2. – P. 383-392.
22. Linskens, H.-F. *Seed Analysis* [Text] / H.-F. Linskens, J. F. Jackson. – Springer-Verlag Heidelberg, Berlin, Germany, 1992. – 381 p.
23. Müller-Olsen, C. Germination analyses by the X-ray method [Text] / C. Müller-Olsen, M. Simak, Å. Gustafsson // *Meddelanden från Statens skogsforsknings institut*. – 1956. – Vol. 46. – No. 1. – P. 12.
24. Novikov, A. I. Biometric features of Scots pine in the Voronezh nursery by size grading seeds [Text] / A. I. Novikov // *International Conference Reforestation Challenges: Book of Abstracts*. Eds.: V. Ivetić, J. Devetaković; University of Belgrade, Faculty of Forestry, 2018. – P. 54.
25. Viability Prediction of *Ricinus communis* L. [Text] / M. H. Olesen [et al.] // *Seeds Using Multispectral Imaging. Sensors*. – 2015. – Vol. 15. – P. 4592-4604.
26. Repo, T. Electrical impedance spectroscopy in relation to seed viability and moisture content in snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [Text] / T. Repo, D. H. Paine, A. G. Taylor // *Seed Science Research*. – 2002. – Vol. 12. – No. 1. – P. 17-29.
27. Simak, M. The X-ray contrast method for seed testing Scots Pine – *Pinus sylvestris* L. [Text] / M. Simak // *Swedish Institute for Forest Research, Sveriges lantbruksuniversitet, Meddelanden från Statens skogsforsknings institut*. – 1957. – Vol. 47. – No 4. – P. 1-22.
28. Tigabu, M. Identification of seed sources and parents of *Pinus sylvestris* L. using visible-near infrared reflectance spectra and multivariate analysis [Text] / M. Tigabu, P. C. Odén, D. Lindgren // *Trees*. – 2005. – Vol. 19. – P. 468-476.
29. Tillman-Sutela E. The morphological background to imbibition in seeds of *Pinus sylvestris* L. of different provenances [Text] / E. Tillman-Sutela, A. Kauppi // *Trees*. – 1995. – Vol. 9. – P. 123-133.

References

1. Bondartsev A.S. *Shkala cvetov (posobie dlya biologov pri nauchnyh i nauchno-prikladnyh issledovaniyah)* [Color scale (manual for biologists in scientific and applied research)]. Leningrad, 1954, 28 p. (In Russian).
2. Budagovskij, A.V. *Sovershenstvovanie jelectrotehnologicheskikh metodov lazernoj obrabotki rastenij i plodov*. Avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of electrotechnological methods of laser processing of plants and fruits. Cand. tech. sci. thesis abstract]. Moscow, 2006, 25 p. (In Russian).
3. Vidyakin A.I. *Feny lesnykh drevesnykh rasteniy: vydelenie, masshtabirovanie i ispol'zovanie v populyatsionnykh issledovaniyakh (na primere Pinus sylvestris L.)* [Forest woody plant hair dryers: isolation, scaling and use in population studies (for example, *Pinus sylvestris* L.)]. *Ekologiya* [Ecology], 2001, no. 3, pp. 197-202 (In Russian).
4. Matveev N.N., Evsikova N.Yu., Kamalova N.S., Saushkin V.V. *Vozmozhnosti IK-spektroskopii pri analize mikrostruktury kompozitov na osnove drevesiny* [Possibilities of IR spectroscopy in the analysis of the microstructure of wood-based composites]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Recent research trends of the XXI century: the theory and practice], 2017, vol. 5, no. 5 (31), pp. 115-119 (In Russian).

5. Novikov A. I. *Nekotorye tekhnologicheskie osobennosti sortiroval'nykh ustroystv I tendentsii ikh razvitiya* [Some technological features of the sorting devices and development trends]. *Les imolodezh' VGLTA - 2000 :materialy yubileynoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchen. 70-letiyu obrazovaniya Voronezhskoy gosudarstvennoy lesotekhnicheskoy akademii* [Forest and youth VSAFE – 2000: proceedings of the anniversary scientific conference of young scientists dedicated to 70-th anniversary of VSAFE]. Voronezh, 2000, pp. 53-60. (In Russian).

6. Novikov A. I. *Rol' kachestva lesosemennogo materiala v protsesse povysheniya effektivnosti lesovosstanovleniya* [The role of quality seed material in the process of improving the effectiveness of reforestation] / *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya I praktika* [Recent research trends of the XXI century: the theory and practice], 2015, vol. 3, no. 2-2 (13-2), pp. 61-63. (In Russian).

7. Novikov A. I. *Diskovye separatory semyan v lesohozyajstvennom proizvodstve* [Disc separators of seeds in forestry production]. Voronezh, 2017, 159 p. (In Russian).

8. Obnochnyy A.N. *Opredelenie eksergii opticheskogo izlucheniya v rastenievodstve*. Avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk [Determination of exergias of optical radiation in crop production. Cand. tech. sci. thesis abstract]. Moscow, 2008, 25 p. (In Russian).

9. Pravdin L. F. *Osnovnye zakonomernosti geograficheskoy izmenchivosti sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.)* [The main regularities of the geographical variability of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)]. *Osnovy lesovedeniya i lesovodstva :dokl. na V lesn. Kongresse* [Fundamentals of forest science and forestry : report on the 5-th forest Congress]. Moscow, 1960. pp. 245-250. (In Russian).

10. Rogozin M. V. *Vliyanie okraski semyan sosny obyknovennoy na rost potomstva* [The influence of seed colour in Scots pine in the growth offspring]. *Vestnik PGU. Biologiya* [Vestnik PGU. Biology], 2012, no. 3, pp. 18-22. (In Russian).

11. Sikorskiy V.V., Stel'makh G.F. *Metody spektrometrii i fotometrii* [Methods of spectrometry and photometry]. Minsk, 2014, 99 p. (In Russian).

12. Sventitskiy I. I. Sventitskaya D. V. *Biofotometriya i analiz potokov energii v rastenievodstve* [Biophotometry and analysis of energy flows in crop production]. Moscow, 1985, 61 p. (In Russian).

13. Tarakanov V. V. *Struktura izmenchivosti, selektsiya i semenovodstvo sosny obyknovennoy v Sibiri*. Avtoreferat dis. kand. s.-kh. nauk [Structure of variability, selection and seed production of Scots pine in Siberia. Cand. agricultural sci. thesis abstract]. Novosibirsk, 2003. (In Russian).

14. Timchenko S. D. *Spektral'no-opticheskie kriterii opredeleniya v skhozhesti semyan*. Avtoreferat dis. kand. s.-kh. nauk [Spectral-optical criteria for determining seed germination. Cand. agriculturalsci. thesis abstract]. Moscow, 1993. (In Russian).

15. Cherepnin V. L. *Selektsionnoe znachenie proiskhozhdeniya semyan sosny obyknovennoy, ikh vesa i tsveta* [Breeding value of the origin of ordinary pine seeds, their weight and color]. *Selektsiya drevesnykh porod v Vostochnoy Sibiri* [Selection of tree species in Eastern Siberia]. Moscow, 1964, pp. 58-68. (In Russian).

13. Farhadi M., Tigabu M., Odén P.C. Near Infrared Spectroscopy as non-destructive method for sorting viable, petrified and empty seeds of *Larix sibirica*. *Silva Fennica*, 2015, vol. 49, id 1340.

14. Hampton J.G. What is seed quality? *Seed Science and Technology*, 2002, vol. 30, pp. 1-10.

15. Hugo W., Dominguez P. Use of near infrared reflectance spectroscopy to identify seeds of noxious weeds, forage legume seeds and contamination. In: Proceedings of the "27th ISTA Congress Seed Symposium", Budapest, Hungary, 17-19 May 2004. International Seed Testing Association (ISTA), 2004, Bassersdorf, Switzerland, p. 7.

16. Ivetic V., Devetakovic J. Concerns and evidence on genetic diversity in planted forests. *Reforesta*, 2017, Vol. 2, no. 3, pp. 196-207. doi: 10.21750/REFOR.3.15.39.

17. Lestander T.A., Odén P.C. Separation of viable and non-viable filled Scots pine seeds by differentiating between drying rates using single seed near infrared transmittance spectroscopy. *Seed Science and Technology*, 2002, vol. 30, no. 2, pp. 383-392.

18. Linskens H.-F., Jackson J.F. Seed Analysis. Springer-Verlag Heidelberg, Berlin, Germany, 1992, 381 p. doi: 10.1007/978-3-662-01639-8.
19. Müller-Olsen C., Simak M., Gustafsson Å. Germination analyses by the X-ray method. Meddelanden från Statens skogsforsknings institut, 1956, vol. 46, no. 1, p. 12.
20. Novikov A.I. Biometric features of Scots pine in the Voronezh nursery by size grading seeds. International Conference Reforestation Challenges: Book of Abstracts. Editors: Vladan Ivetić, Jovana Devetaković; University of Belgrade, Faculty of Forestry, 2018, P. 54.
21. Olesen M.H. et al. Viability Prediction of *Ricinus communis* L. Seeds Using Multispectral Imaging. Sensors, 2015, vol. 15, pp. 4592-4604.
22. Repo T., Paine D.H., Taylor A.G. Electrical impedance spectroscopy in relation to seed viability and moisture content in snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Seed Science Research, 2002, vol. 12, no. 1, pp. 17-29.
23. Simak M. The X-ray contrast method for seed testing Scots Pine - *Pinus sylvestris* L. Swedish Institute for Forest Research, Sveriges lantbruksuniversitet, Meddelanden från Statens skogsforsknings institut, 1957, vol. 47, no 4, pp. 1-22.
24. Tigabu M., Odén P.C., Lindgren D. Identification of seed sources and parents of *Pinus sylvestris* L. using visible-near infrared reflectance spectra and multivariate analysis. Trees, 2005, vol. 19, pp. 468-476.
25. Tillman-Sutela E., Kauppi A. The morphological background to imbibition in seeds of *Pinus sylvestris* L. of different provenances. Trees, 1995, vol. 9, pp. 123-133.

Сведения об авторах

Новиков Артур Игоревич – доцент кафедры автомобилей и сервиса ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nvatdo@gmail.com.

Саушкин Виктор Васильевич – доцент кафедры общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат физико-математических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: vvs5@yandex.ru.

Information about authors

Novikov Arthur Igorevitch – Associate Professor of Car and Service Department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD in Engineering, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: nvatdo@gmail.com.

Saushkin Viktor Vasilevich – Associate Professor of the Department of General and Applied Physics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: vvs5@yandex.ru.