

УСТАНОВЛЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*Pinus sylvestris* L.) ПО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ В БИК-ДИАПАЗОНЕ

А.Н. Хох*, В.Б. Звягинцев**

*Государственное учреждение «Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь»

**Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

В представленной статье сделана попытка оценить потенциал метода молекулярной спектроскопии в ближней ИК-области для установления территориальной принадлежности сосновых лесоматериалов.

Цель исследования – разработать подходы для дифференциации образцов древесины *Pinus sylvestris* L. из разных мест Республики Беларусь.

Материал и методы. Для эксперимента были использованы буровые керны с 12 временных пробных площадей, заложенных в 2015–2016 гг. на территории Могилевской области в рамках выполнения задания 3.2.01 «Разработка новых подходов к судебно-экспертному исследованию объектов растительного происхождения» по государственной программе научных исследований «Научное обеспечение судебно-экспертной деятельности и защиты от чрезвычайных ситуаций». Исследования были проведены с помощью портативного БИК-спектрометра MicroNIR компании «VIAVI».

Результаты и их обсуждение. Показано, что БИК-спектры всех изученных образцов имеют схожий вид, однако применение хемометрических алгоритмов анализа позволяет осуществить их дифференциацию. С учетом скорректированных данных с использованием специализированного программного обеспечения The Unscrambler X Lite (CAMO, США) методом главных компонент построены предсказательные классификационные модели (выделено 8 однородных групп).

Заключение. Метод молекулярной спектроскопии в ближней ИК-области в сочетании со статистическими методами анализа многофакторных зависимостей может эффективно применяться для решения задач, связанных с установлением места произрастания древесины сосны. Однако для правильной интерпретации полученных результатов требуется корректная предварительная обработка спектрометрических данных.

Ключевые слова: древесина, ИК-спектроскопия в ближней области, место произрастания, хемометрические алгоритмы, метод главных компонент.

THE ESTABLISHMENT OF SCOTS PINE (*Pinus sylvestris* L.) GEORGAPHIC ORIGIN ACCORDING TO SPECTROMETRIC PARAMETERS IN THE NIR RANGE

A.N. Khokh*, V.B. Zvyagintsev**

*State Institution "Scientific and Practical Center

of the State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus"

**Educational Establishment "Belarusian State Technological University"

In the presented work, we have tried to estimate the potential of the method of near-infrared molecular spectroscopy to identify the territorial belonging of pine tree material.

The purpose of this work is to develop the approaches for the differentiation of wood samples of *Pinus sylvestris* L. from different places of the Republic of Belarus.

Material and methods. The experiment used drill cores from 12 temporary sample plots founded in 2015–2016 in the territory of Mogilev Region in the framework of the task 3.2.01 "The development of new approaches to the forensic investigation of objects of vegetable origin" under the state program of scientific researches "The scientific support of forensic activity and protection from emergencies". The studies were conducted using a MicroNIR portable NIR VIAVI spectrometer.

Findings and their discussion. It was shown that the NIR spectra of all the samples studied have a similar appearance, however the use of chemometric analysis algorithms allows their differentiation. Taking into account the adjusted data, predictive classification models were built using the method of principal components on the specialized software The Unscrambler X Lite (CAMO, USA) (8 homogeneous groups were selected).

Conclusion. The method of near-infrared molecular spectroscopy, in combination with statistical methods for analyzing multifactorial dependencies, can be efficiently used to solve problems related to the identification of the pine growing area. However, a key requirement for the correct interpretation of the findings is the adequate preliminary processing of spectrometric data.

Key words: wood, near infrared spectroscopy, growth place, chemometric algorithms, principal component analysis.

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – самая распространенная лесообразующая порода в Республике Беларусь. В силу высокого качества древесины и хорошей транспортной доступности сосновые леса являются частым объектом правонарушений в области лесного законодательства, в том числе незаконных рубок леса. При их расследовании в ряде случаев возникает необходимость установить местность произрастания дерева и/или отождествить локальный участок, на котором оно выросло. Во всем мире эти вопросы не являются до конца решенными, несмотря на то, что существует ряд независимых научных методов, которые позволяют обеспечить получение необходимой информации для проверки сомнительных лесоматериалов и подтверждения фактов незаконного получения древесины.

В настоящее время чаще всего используются методы отслеживания древесины, основанные на ее внешних особенностях [1, с. 790]. Эти методы включают в себя как проверку наличия соответствующих сертификатов и лицензий, так и применение систем идентификации, основанных на методе штрихового кодирования, а также использовании радиочастотных меток [2, с. 11].

Однако самые надежные результаты идентификации лесоматериалов обеспечиваются только при применении методов, основанных на внутренних характеристиках дерева. Так, согласно устоявшейся практике одним из самых известных среди них является дендрохронологический анализ (макроскопический уровень) [1, с. 793; 3, с. 122], базирующийся на том факте, что рисунок годичных колец каждого дерева строго индивидуален и коррелирует с почвенно-климатическими условиями на территории их произрастания. Перспективным направлением является и анатомо-экологическое исследование клеточных структур древесины (микроскопический уровень) [4], например, подсчет количества ранних и поздних трахеид в каждом годичном слое, измерение размеров их полостей в радиальном и тангенциальном направлениях, а также толщины и площади клеточных стенок.

Конечно, здесь нельзя не отметить и методы генетического анализа. Так, установление географической области происхождения осуществляется посредством анализа популяционной генетики или филогеографии, а определение на уровне отдельных растений может осуществляться с помощью ДНК-генотипоскопии [5].

В последние 10–15 лет для идентификации места происхождения древесины после ее вырубki начинают применяться химические методы анализа [1, с. 794–796]. Одним из таких методов, который приобрел большую популярность за рубежом, является молекулярная инфракрасная спектроскопия в ближней волновой области спектра (далее БИК-спектроскопия). Использование данного метода с целью установления места произрастания базируется на том, что древесина представляет собой сложный органический материал, состоящий из целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина и экстрактивных веществ. Эти соединения генерируют полосы поглощения в ближней инфракрасной области, в основном представляющие собой обертоны и полосы комбинации функциональных групп О-Н, N-H и C-H [6, с. 383].

Представленное экспериментальное исследование является попыткой оценить потенциал неразрушающих спектроскопических методов для оценки древесины различного географического происхождения.

Цель статьи – разработать подходы для дифференциации образцов древесины *Pinus sylvestris* L. из разных мест Республики Беларусь (на примере Могилевской области).

Рабочая гипотеза базировалась на предположении о том, что если будут обнаружены значительные различия между спектрами, то это даст возможность связать подобные различия с происхождением образцов.

Материал и методы. В исследовании использован экспериментальный материал (буровые керны), полученный с 12 временных пробных площадей (далее ВПП), заложенных в сосняках мшистых (*Pinetum pleuroziosum*) в соответствии с принятыми в лесной таксации методиками [7]. Древесно-кольцевые хронологии для данных ВПП образуют один дендрохронологически однородный регион, а потому представляет практический интерес выявить его гетерогенность на основании спектрометрических параметров древесины сосны обыкновенной в БИК-диапазоне.

У всех деревьев на пробной площади измерялись диаметр стволов на высоте 1,3 м и общая высота. Каждому дереву присваивался класс Крафта. Краткая характеристика исследованных древостоев приведена в табл. 1.

Таксационные показатели древостоев сосны обыкновенной на временных пробных площадях

№ ВПП	Координаты		Средний d, см	Средняя h, м	Состав древостоя	Средний возраст, лет	Класс бонитета	Полнота
	широта	долгота						
MR01	53°00'22.3"N	29°23'13.6"E	32,6	26,3	10С	120	II	0,6
MR02	53°21'29.9"N	28°37'27.2"E	40,8	27,0	10С	115	I	0,8
MR03	53°23'16.4"N	30°14'17.0"E	37,7	28,9	8С1Д1Е	130	I	0,8
MR04	53°18'35.8"N	31°07'31.2"E	37,2	26,8	9С1Е+Д	120	II	0,8
MR05	53°15'29.8"N	32°07'09.7"E	38,1	29,1	10С	105	II	0,6
MR06	53°20'52.8"N	32°35'54.6"E	39,2	27,4	9С1Е	125	I	0,7
MR07	53°25'23.2"N	32°34'16.5"E	38,5	26,9	10С	115	I	0,9
MR08	53°31'54.8"N	31°24'55.5"E	27,9	23,2	10С	135	I	0,7
MR09	53°55'09.5"N	29°34'47.0"E	26,3	22,1	10С	95	I	0,8
MR10	53°53'30.0"N	29°43'30.1"E	21,3	20,5	10С	85	I	0,8
MR11	53°43'55.0"N	31°46'29.6"E	28,4	27,6	9С1Е	90	II	0,7
MR12	53°13'20.5"N	28°41'52.4"E	31,0	27,3	10С	90	I	0,8

На каждой ВПП у 20 деревьев возрастным буром «Haglof» с противоположных сторон перпендикулярно продольной оси ствола на высоте 1,0–1,3 м от поверхности земли отбиралось по 2 буровых керна с каждого дерева. Всего в совокупности было проанализировано 200 деревьев сосны.

Перед непосредственной записью БИК-спектров с буровыми кернами осуществлялась процедура специальной пробоподготовки. Вначале керны замачивались на 10–15 минут в горячей воде. Затем ножом с трапециевидным лезвием в поперечном направлении срезалась верхняя часть толщиной 1–1,5 мм, при этом старались добиться максимально ровной поверхности без царапин и других изъянов, поскольку рассеянный свет может существенно изменяться в зависимости от степени шероховатости.

В дальнейшем керны высушивались до постоянной массы, т.к. наличие в них воды может кардинальным образом влиять на внешний вид спектров (вода имеет довольно интенсивные полосы [8, с. 32] поглощения в БИК-области электромагнитного излучения).

Спектры NIR были получены с использованием портативного БИК-спектрометра MicroNIR OnSite с диодно-матричным детектором (VIAVI, США) в диапазоне 950–1650 нм в режиме диффузного отражения. Все измерения проводились в контролируемой влажности (<60%) и при 20°C. Для каждого образца древесины проводили 20 последовательных измерений.

Для обработки сигналов и анализа данных использовался пакет программного обеспечения The Unscrambler X компании CAMO [9]. Для оценки полученных результатов были применены методы главных компонент (PCA), дискриминантного анализа с помощью регрессии на латентные структуры (PLS-DA).

Результаты и их обсуждение. С целью изучения различий между образцами древесины с разных ВПП Могилевской области Республики Беларусь для каждого местоположения были рассчитаны средние БИК-спектры. Перед этим с ними была проведена предварительная обработка из-за содержания большого количества избыточной («шумовой») информации, посредством которой могут быть устранены или, по крайней мере, будут сведены к минимуму вариации, касающиеся изменений базовой линии вследствие аддитивного и мультипликативного рассеяния [10, с. 63], а также значительно снижена погрешность анализа. В нашем случае обработка заключалась в вычислении производной второго порядка по методу Савицкого–Голея (с использованием 7 сглаживающих точек). Вторая производная БИК-спектров показывает резкие полосы с большей разностью величин среди переменных [11, с. 139].

Вторые производные полученных спектров представлены на рис. 1.

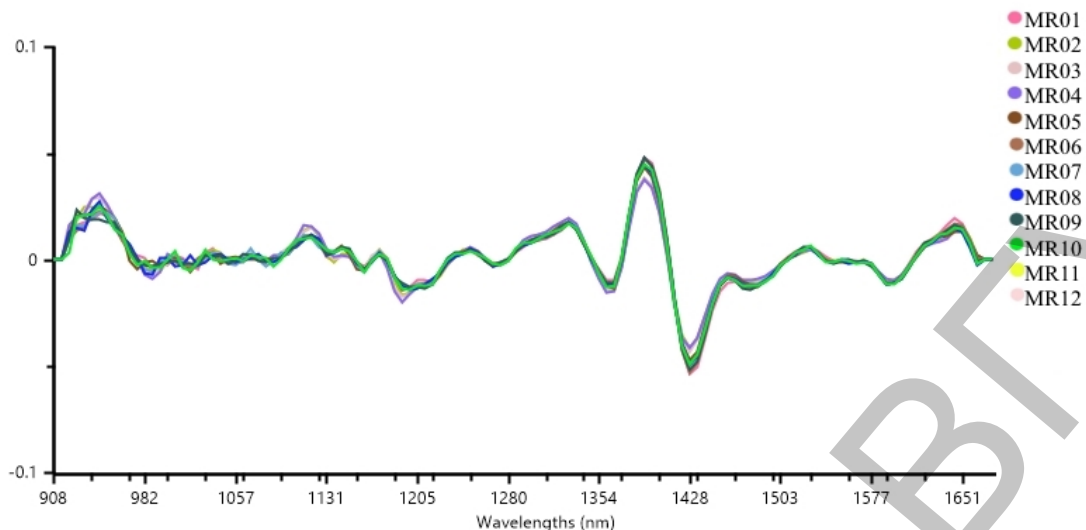


Рис. 1. Вторая производная усредненных спектров для образцов древесины с исследованных временных пробных площадей

Следует отметить, что кривые очень похожи, однако более тщательное изучение некоторых характерных спектральных полос свидетельствует о том, что видимые различия в каждом месте отбора образцов все-таки наблюдаются, т.е. для спектров с каждой ВПП свойственны свои особенности химического состава. Но из-за перекрытия между полосами в БИК-спектрах представляется затруднительным сделать вывод о тех химических соединениях, которые ответственны за эти различия.

В табл. 2 суммированы основные характеристические полосы и их положение для БИК-спектров (т.е. полосы, которые представляют наибольший интерес с точки зрения статистического анализа).

Таблица 2

Происхождение пиков в БИК-спектре исследуемых образцов

№	Длина волны, нм	Происхождение пика
1	1143	лигнин (СН ₃ - и ароматические группы)
2	1171	гемицеллюлоза (СН ₃ -группы в ацетиловых эфирных группах)
3	1188–1195	лигнин/(целлюлоза) (СН ₃ -группы)
4	1366	целлюлоза
5	1410	лигнин (фенольные гидроксильные группы)
6	1417	лигнин (ароматические, связанные С-Н)
7	1447	лигнин/экстр. (фенольные ОН-группы)
8	1471	гемицеллюлоза (водородные связи О(6)–Н(6) глюкоманнана)
9	1473, 1476, 1480, 1484–1493	целлюлоза (полукристаллические области)
10	1489	целлюлоза (внутримолекулярная водородная связь)
11	1493	гемицеллюлоза (О(3)–Н(3)...О(5) внутримолекулярные водородные связи глюкоманнана)
12	1580	целлюлоза (кристаллический регион в С ₂)
13	1586–1596	целлюлоза (кристаллический регион в С ₂)
14	1592	кристаллическая целлюлоза (С _{II})
15	1666	гемицеллюлоза (СН ₃ -группы)

С учетом отличающегося химического состава древесины на каждой ВПП был проведен анализ всех полученных нами спектров (всего 480) с применением метода главных компонент. В результате было обнаружено, что спектры образцов с ВПП MR01–MR03, MR09, MR10 и MR12 образуют шесть обособленных групп. Так, на рис. 2 видно, что все образцы древесины с данных ВПП четко отделены друг от друга и не перекрываются между собой. В то же время записанные для ВПП MR04–MR07 спектры образуют одну частично перекрывающуюся сферу. Та же ситуация наблюдается для ВПП MR08 и MR11.

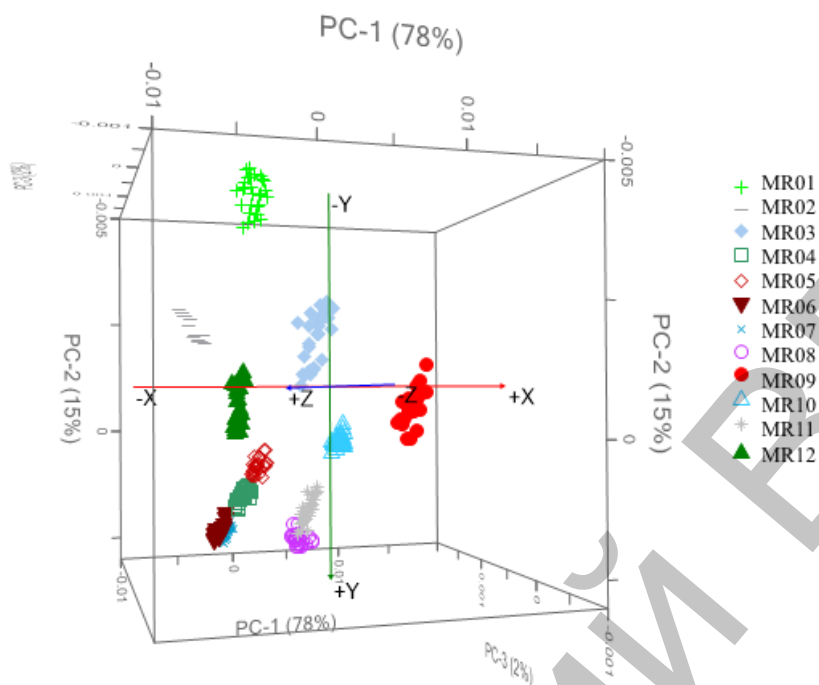


Рис. 2. Проекция наблюдений на факторную плоскость БИК-спектров: вторая производная, 7 точек сглаживания, 3 фактора

Смешивание и перекрытие некоторых спектров характерно для образцов из восточной части Могилевской области, произрастающих в сходных почвенно-экологических условиях. Так, деревья на ВПП MR01–MR03, MR09, MR10 и MR12 произрастают в Быховско-Хотимско-Ветковском районе, для которого характерно преимущественное преобладание дерново-подзолистых супесчаных, иногда заболоченных почв, а ВПП MR08 и MR11 находятся в Оршанско-Мстиславском районе с дерново-подзолистыми слабо- и среднеэродированными почвами. Кроме того, образцы с данных ВПП химически схожи и расположены очень близко друг к другу на диаграмме PCA. Отдельно следует отметить ВПП MR01, которая отделена от других проб на значительное расстояние.

В дальнейшем нами для 6 неперекрывающихся между собой групп была предпринята попытка проверить правильность классификации полученных спектров известного происхождения.

В табл. 3 представлены результаты по количеству скрытых/латентных переменных (LV), необходимых для различения образцов с каждой ВПП по отношению к другим, а также количество спектров, исключенных как выбросы на этапе обучения и на этапе проверки. Количество скрытых переменных определялось путем перекрестной проверки [12].

Таблица 3

Скрытые переменные и выбросы, идентифицированные в каждой из моделей PLS дискриминации

№ ВПП	LV	Выбросы исключены в тренировочном наборе	Выбросы исключают из проверки
MR01	12	9	6
MR02	13	6	4
MR03	20	6	4
MR09	21	8	4
MR10	10	10	5
MR12	20	16	12

Отметим, что в каждой классификационной модели две трети выборки (выбранные случайным образом) становились частью учебной группы. Остальные образцы использовались как проверочные, т.е. это были те образцы, с помощью которых оценивалась эффективность созданной модели. Спектры каждого образца находились только в одной из групп, чтобы исключить проверку «самого себя».

В результате объясненная дисперсия составила 99,2% для MR01; 99,4% для MR02; 99,9 для MR03; 98,8% для MR09; 99,8% для MR10 и 99,9% для MR12. За исключением MR01 и MR02 для остальных четырех ВПП требуется большое количество скрытых переменных (больше 19), что может указывать на то, что сосновые насаждения на данных территориях в большей степени схожи между собой или же в исследованных выборках наблюдается высокий разброс спектральной информации. Количество выбросов варьируется от 4 до 16. Наибольшее число выбросов характерно для MR09. Однако необходимо подчеркнуть тот факт, что идентификация образца как выброса еще не означает неправильный результат, а только указывает на то, что образец обладает некоторыми характеристиками, которые отличают его от тех, которые включены в тренировочный набор.

Далее для оценки работоспособности моделей образцы из тренировочного набора были использованы для определения следующих показателей качества модели:

- 1) FNR – доля ложноотрицательных результатов, т.е. процент выборки определенного вида, идентифицированный как принадлежащий к другим видам;
 - 2) FPR – доля ложноположительных результатов, т.е. процент выборок других видов, идентифицированных как принадлежащие к определенному виду;
 - 3) STR – показатель чувствительности, т.е. процент правильно идентифицированных образцов, принадлежащих к определенному виду;
 - 4) SPR – коэффициент специфичности, т.е. процент выборок, принадлежащих другим видам, правильно идентифицированных как другие виды;
 - 5) EFR – коэффициент эффективности, рассчитываемый как разность (100% минус FNR и FPR).
- Рассчитанные значения перечисленных выше показателей приведены в табл. 4.

Таблица 4

Показатели качества моделей PLS дискриминации

Показатель	Временная пробная площадь					
	MR01	MR02	MR03	MR09	MR10	MR12
FNR (%)	0	9,2	1,1	0	0	11,1
FPR (%)	0	0	2,5	2,4	1,7	7,3
STR (%)	98,6	82,7	100	100	100	88,9
SPR (%)	100	96,2	98,6	97,5	97,8	90,8
EFR (%)	98,4	82,6	97,3	97,2	97,2	79,8

Как видно из табл. 4, модель для образцов с ВПП MR01 показывает самый высокий коэффициент эффективности (EFR = 98,4%), в то время как модель MR12 – самый низкий (EFR = 79,8%). Эти результаты свидетельствуют о том, что изменение химических характеристик для деревьев сосны обыкновенной на данной территории больше, чем у других исследованных образцов. Однако даже модель с самым низким показателем эффективности показывает высокий уровень правильной классификации исследованных образцов.

Заключение. В целом полученные для проанализированных с применением хемометрических алгоритмов классификации БИК-спектров результаты продемонстрировали, что насаждения сосны обыкновенной, произрастающие на временных пробных площадях MR01, MR02, MR03, MR09, MR10 и MR12, могут быть успешно классифицированы с использованием алгоритма PLS дискриминации.

Для выявленных двух перекрывающихся групп: 1) ВПП MR04–MR07 и 2) MR08 и MR11 – потребуются проведение дополнительных исследований и разработка соответствующих классификационных моделей с применением различных способов коррекции рассеяния и обработки спектрометрических данных, которые позволили бы осуществить их разделение.

Однако даже с учетом имеющейся на данный момент информации мы смогли разделить дендрохронологически однородный регион на 8 подрегионов, что помогло сузить групповую принадлежность исследуемых образцов и провести отождествление местности, на которой они выросли (т.е. установить источник происхождения).

Таким образом, БИК-спектроскопия – это инструментальный экспресс-метод, позволяющий производить исследования без разрушения объекта и не требующий использования дорогостоящих расходных материалов, который подходит для установления места произрастания растительных объектов, а потому может быть рекомендован для отслеживания происхождения древесины и обнаружения фактов незаконных рубок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dormontt, E.E. Forensic timber identification: It's time to integrate disciplines to combat illegal logging / E.E. Dormontt [et al.] // *Biological Conservation*. – 2015. – Vol. 191. – P. 790–798.
2. Tzoulis, I.K. Wood tracking information systems to confront illegal logging / I.K. Tzoulis, Z.S. Andreopoulou, E. Voulgaridis // *Agrárinformatika*. – 2014. – Vol. 5, № 1. – P. 9–17.
3. Yaman, B. The use of dendrochronological method in dating of illegal tree cuttings in Turkey: a case study / B. Yaman, U. Akkemik // *Baltic Forestry*. – 2009. – Vol. 15, № 1. – P. 122–126.
4. Хох, А.Н. Изучение анатомических параметров годичных слоев сосны обыкновенной для установления места произрастания / А.Н. Хох, В.Б. Звягинцев // *Вестн. Мазыр. дзярж. пед. ун-та імя І.П. Шамякіна*. – 2019. – № 1(53). – С. 55–63.
5. Tereba, A. Analysis of DNA profiles of ash (*Fraxinus excelsior* L.) to provide evidence of illegal logging / A. Tereba [et al.] // *Wood science and technology*. – 2017. – Vol. 51, № 6. – P. 1377–1387.
6. Shenk, J.S. Handbook of Near-infrared analysis / J.S. Shenk [et al.] // *Application of NIR spectroscopy to agricultural products*. – 1992. – Vol. 27. – P. 383–431.
7. Мелехов, И.С. Лесоведение: учебник для вузов / И.С. Мелехов. – 3-е изд., стер. – М.: МГУЛ, 2004. – 398 с.
8. Lazarescu, C. Wood species identification by near-infrared spectroscopy / C. Lazarescu, F. Hart, Z. Pirouz // *International Wood Products Journal*. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 32–35.
9. Kessler, W. A Handy Tool for Chemometrics: The Unscrambler X / W. Kessler, R. Kessler // *Scientific Computing*. – 2010. – Vol. 27, № 4. – 13 p.
10. Li, S. A model-based fault detection and diagnostic methodology based on PCA method and wavelet transform / S. Li, J. Wen // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 68. – P. 63–71.
11. Xu, L. Ensemble preprocessing of near infrared (NIR) spectra for multivariate calibration / L. Xu [et al.] // *Analitica Chimica Acta*. – 2008. – № 616. – P. 138–142.
12. Soares, L.F. Evaluation of a NIR handheld device and PLS-DA for discrimination of six similar Amazonian wood species / L.F. Soares [et al.] // *Química Nova*. – 2017. – Vol. 40, № 4. – P. 418–426.

REFERENCES

1. Dormontt, E.E. Forensic timber identification: It's time to integrate disciplines to combat illegal logging / E.E. Dormontt [et al.] // *Biological Conservation*. – 2015. – Vol. 191. – P. 790–798.
2. Tzoulis, I.K. Wood tracking information systems to confront illegal logging / I.K. Tzoulis, Z.S. Andreopoulou, E. Voulgaridis // *Agrárinformatika*. – 2014. – Vol. 5(1). – P. 9–17.
3. Yaman, B. The use of dendrochronological method in dating of illegal tree cuttings in Turkey: a case study / B. Yaman, U. Akkemik // *Baltic Forestry*. – 2009. – Vol. 15(1). – P. 122–126.
4. Khokh A.N., Zvyagintsev V.B. *Vesnik MDPU imya I.P. Shamyakina* [Journal of Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin], 2019, 1(53), p. 55–63.
5. Tereba, A. Analysis of DNA profiles of ash (*Fraxinus excelsior* L.) to provide evidence of illegal logging / A. Tereba [et al.] // *Wood science and technology*. – 2017. – Vol. 51(6). – P. 1377–1387.
6. Shenk, J. S. Handbook of Near-infrared analysis / J. S. Shenk [et al.] // *Application of NIR spectroscopy to agricultural products*. – 1992. – Vol. 27. – P. 383–431.
7. Melekhov I.S. *Lesovedeniye: uchebnik dlya vuzov* [Silvics: University Textbook], M.: MSFU, 2004, 398 p.
8. Lazarescu, C. Wood species identification by near-infrared spectroscopy / C. Lazarescu, F. Hart, Z. Pirouz // *International Wood Products Journal*. – 2017. – Vol. 8(1). – P. 32–35.
9. Kessler, W. A Handy Tool for Chemometrics: The Unscrambler X / W. Kessler, R. Kessler // *Scientific Computing*. – 2010. – Vol. 27(4). – 13 p.
10. Li, S. A model-based fault detection and diagnostic methodology based on PCA method and wavelet transform / S. Li, J. Wen // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 68. – P. 63–71.
11. Xu, L. Ensemble preprocessing of near infrared (NIR) spectra for multivariate calibration / L. Xu [et al.] // *Analitica Chimica Acta*. – 2008. – № 616. – P. 138–142.
12. Soares, L.F. Evaluation of a NIR handheld device and PLS-DA for discrimination of six similar Amazonian wood species / L.F. Soares [et al.] // *Química Nova*. – 2017. – Vol. 40(4). – P. 418–426.

Поступила в редакцию 10.07.2019

Адрес для корреспонденции: e-mail: 1ann1hoh@gmail.com – Хох А.Н.