

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ЗРЕЛОЙ И ПОГРЕБЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

А. Э. Томсон, Т. Я. Царюк, Т. В. Соколова, В. С. Пехтерева,
Ю. Ю. Навоша, М. Г. Калантаров, А. С. Марзан, И. П. Фалюшина

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Исследован компонентный состав образцов зрелой и погребенной в торфяной залежи древесины. Показаны различия в компонентном составе образцов погребенной древесины, свидетельствующие о неоднородном характере участков залежи по ботаническому составу растений-торфообразователей, степени разложения, а также о разной глубине залегания извлеченных образцов. Образцы зрелой и погребенной древесины исследованы методом ИК-спектроскопии. Спектры исследуемых образцов погребенной древесины близки между собой как по набору полос поглощения, так и по их интенсивности, что свидетельствует о близком химическом составе исследованных образцов. Такой же факт наблюдается и в случае спектров образцов лиственных пород древесины (береза, дуб, ольха). Сравнительный анализ ИК-спектров погребенной и зрелой древесины показал различие в области поглощения карбонильных групп (полоса на 1732 см^{-1} , присутствующая в спектрах зрелой древесины хвойных пород (пеллеты)), не наблюдается в спектре погребенной, что может быть обусловлено взаимодействием указанных функциональных групп в погребенной древесине с ионами зольных элементов торфяной залежи. Установлено, что основные процессы термического разложения образцов протекают в достаточно узком по сравнению с торфом диапазоне температур – от 301 до $386\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом разлагается от 61 до 72% органической массы, максимум скорости термолиза находится в области $358\text{--}362\text{ }^{\circ}\text{C}$ как для зрелой, так и погребенной древесины, за исключением дуба, имеющего температурный максимум при $347\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: погребенная древесина; зрелая древесина; компонентный состав; целлюлоза; лигнин; ИК-спектрофотометрия; термический анализ.

Для цитирования. Томсон А. Э., Царюк Т. Я., Соколова Т. В., Пехтерева В. С., Навоша Ю. Ю., Калантаров М. Г., Марзан А. С., Фалюшина И. П. Сравнительный анализ компонентного состава зрелой и погребенной древесины // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 144–153.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COMPONENT COMPOSITION OF MATURE AND BURIED WOOD

A. E. Thomson, T. Ya. Tsaryuk, T. V. Sokolova, V. S. Pekhtereva,
Yu. Yu. Navosha, M. G. Kalantarov, A. S. Marzan, I. P. Falyushina

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The component composition of samples of mature and buried wood in peat deposits was studied. Differences in the component composition of buried wood samples are shown, indicating the heterogeneous nature of the deposit areas in terms of the botanical composition of peat-forming plants, the degree of decomposition, as well as different depths of the recovered samples. Samples of mature and buried wood were studied by IR spectroscopy. The spectra of the studied samples of buried wood are close to each other both in the set of absorption bands and in their intensity, which indicates similar chemical composition of the studied samples. The same fact is observed in case of the spectra of deciduous wood samples (birch, oak, alder). A comparative analysis of the IR spectra of buried and mature wood showed a difference in the absorption region of carbonyl groups (the band at 1732 cm^{-1} , present in the spectra of mature coniferous wood (pellets)), is not observed in the spectrum of buried, which may be due to the interaction of these functional groups in buried wood with ions of ash elements of a peat deposit, it was established that the main processes of samples thermal decomposition occur in a rather narrow temperature range compared to peat – from 301 to $386\text{ }^{\circ}\text{C}$, while 61 to 72% of the organic mass decomposes, the maximum rate of thermolysis, is in the range of $358\text{--}362\text{ }^{\circ}\text{C}$ for both mature and buried wood, with the exception of oak, which has a temperature maximum at $347\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Keywords: buried wood; mature wood; component composition; cellulose; lignin; IR spectrophotometry; thermal analysis.

For citation. Tomson A. E., Tsaryuk T. Ya., Sokolova T. V., Pekhtereva V. S., Navosha Yu. Yu., Kalantarov M. G., Marzan A. S., Falyushina I. P. Comparative analysis of the component composition of mature and buried wood. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 144–153.

Введение. По химическому составу древесина представляет собой сложный комплекс органических молекул и биополимеров с небольшой примесью минеральных веществ (рис. 1) [1].

Все вещества древесины разделяют на структурные и неструктурные. Основную массу древесины составляют *структурные* компоненты – строительные вещества стенки клеток древесной ткани. Они не извлекаются растворителями. Такими веществами являются три основных компонента древесины – целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин – относятся к природным полимерам.

К *неструктурным* компонентам относятся различные растворимые и нерастворимые вещества. Часть из них (растворимые) – до 5 % – можно извлекать (экстрагировать) из древесины водой или органическими растворителями. Это экстрактивные вещества, которые не входят в состав клеточных стенок (но могут их пропитывать).

Известно, что химический состав древесины лиственных и хвойных пород варьирует в широких пределах под влиянием ряда факторов, среди которых наиболее важными являются видовая принадлежность, ботанико-географическая зона произрастания деревьев и погодные условия вегетационного периода [2].

Изменение древесных остатков в торфогенном слое и в глубине торфяной залежи происходит под влиянием взаимно связанных физических и химических факторов окружающей среды. Влияние физических факторов сводится к воздействию в поверхностных слоях тепла, света и влаги, что является подготовительной стадией к более глубокому химическому изменению вещества древесины под влиянием ферментов растений, главным образом микроорганизмов. Решающую роль играют вид и химический состав древесины [3].

В погребенной древесине торфа верхового и низинного типов содержание смолистых веществ, извлекаемых органическими растворителями, возрастает с увеличением степени разложения торфа, при одинаковой степени разложения торфов оно уменьшается с увеличением глубины залегания. Содержание смолистых веществ в образцах хвойной древесины, отобранных с одинаковой глубины, из низинной торфяной залежи выше, чем из верховой. На увеличение содержания смолистых веществ оказывают влияние экологические, климатические и микроклиматические условия.

Содержание водорастворимых веществ в древесине увеличивается с ростом степени разложения торфа. Наличие целлюлозы является показателем сохранности торфа и погребенной в нем древесины. Содержание в древесине целлюлозы уменьшается с повышением степени разложения торфа. В древесине, расположенной на различной глубине, в верховых залежах при степени разложения торфа, равной 25 %, содержание целлюлозы практически одинаковое. Анаэробному бактериальному разрушению клетчатки препятствуют кислая реакция среды верховых торфяников, ее антисептические свойства, малая зольность.

Содержание в древесине торфяных залежей негидролизующего остатка, принимаемого за лигнин, находится в зависимости от типа и степени разложения торфа, а также глубины залегания древесины в залежи [4]. С увеличением степени разложения торфа содержание лигнина в древесине растет. На изменение состава негидролизующего остатка существенное влияние оказывает возраст торфяной залежи, в которой расположена древесина.

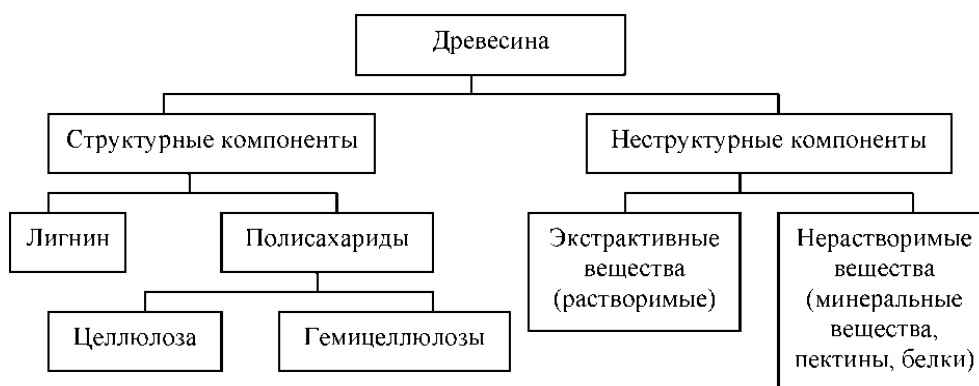


Рис. 1. Химический состав древесины

Fig. 1. Chemical composition of wood

Многочисленные исследования показали, что на изменение химического состава древесины влияют тип и степень разложения торфа в залежи. Кроме того, на химический состав древесины низинной залежи оказывает влияние и глубина залегания, или возраст. В древесине залежи верхового типа, обладающей антисептическими свойствами, эти изменения с возрастом незначительны.

В древесине хвойных пород низинных торфяных залежей происходят более глубокие химические изменения, чем в верховых. Эти изменения связаны с изменением ароматической части лигнина.

Сведения о составе древесины в пластах торфяных месторождений необходимы не только для расшифровки генезиса горючих ископаемых. Они представляют практический интерес и в связи с необходимостью освобождения площадей выработанных торфяных месторождений от пней. Кроме того, практически все вновь вырабатываемые торфяные месторождения являются верховыми и содержат большое количество малоразрушенной древесины, термическая переработка которой с получением активированных углей является актуальной [3].

Цель работы – провести сравнительные исследования химического (компонентного) состава образцов зрелой и погребенной древесины.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись образцы лиственной (дуб, ольха, береза) и хвойной древесины, представленной в виде пеллет производства Борисовского опытного лесхоза, а также образцы погребенной древесины (образец № 1 и № 2), отобранные из штабеля извлеченных из торфа древесных остатков, образовавшихся в результате подготовки участков месторождения «Туршовка-Чертово» ОАО «Туршовка» к последующей добыче торфа.

Исследование компонентного состава образцов погребенной древесины и древесных пеллет проведено по методу Инсторфа [5], определение золы – по ГОСТ Р 56881-2016 при температуре 600 °С, определение целлюлозы и экстрагируемых горячей водой веществ – по методикам, описанным в [1].

ИК-спектры образцов зрелой и погребенной древесины регистрировали на ИК-спектрофотометре с Фурье-преобразованием IPreStige-21 (Shimadzu) методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Порошки образцов измельчали на вибрационной мельнице до порошкообразного состояния и затем прессовали в тонкую гибкую таблетку (толщина ~0,1–0,2 мм) между двумя полированными стальными пластинами. Подготовленный таким способом образец позволял обеспечить хороший контакт между образцом и призмой ZnSe приставки НПВО. При исследовании использовали приставку однократного отражения MIRacle.

Термогравиметрический анализ проводили на синхронном термоанализаторе STA 2500 фирмы NETZSCH, работающем под управлением программного пакета NETZSCH Proteus Thermal Analysis. Условия проведения исследований: термопара – тип S; тигель – Pt; эталон – Al₂O₃; масса образца – 8–10 мг; скорость нагрева – 10 К/мин, диапазон температур – 30–1000 °С; газ-носитель, защитный газ – азот; расход: газа-носителя – 20 мл/мин, защитного газа – 30 мл/мин.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения компонентного состава отобранных образцов погребенной древесины и древесных пеллет приведены в табл. 1.

Таблица 1. Компонентный состав образцов погребенной древесины в торфяных залежах и древесных пеллет

Table 1. Component composition of samples of buried wood in peat deposits and wood pellets

Образец	Битум, %	Водорастворимые и легкогидролизуемые вещества, %	Гуминовые кислоты, %	Фульво-кислоты, %	Целлюлоза, %	Лигнин, %
Пеллеты	1,4	24,8	0,0	0,0	47,4	26,4
Погребенная древесина № 1	3,2	18,2	2,4	12,5	41,0	22,7
Погребенная древесина № 2	1,0	20,1	1,2	10,4	48,2	19,1

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что содержание лигнина, водорастворимых и легкогидролизуемых веществ в пеллетах (отходы хвойных пород) несколько выше по сравнению с содержанием указанных компонентов в образцах погребенной древесины. Гуминовые вещества также отсутствуют. В образцах погребенной древесины содержание гуминовых веществ составляет 11,6–14,9 %, что свидетельствует о протекании процесса гумификации.

Известно, что в погребенной древесине [4] содержание лигнина растет с увеличением степени разложения торфа в торфяной залежи. Содержание лигнина в образце № 1 (табл. 1) на 18,8 % больше по сравнению с содержанием лигнина в образце № 2. Это указывает на то, что образец № 1, возможно, извлечен из залежи, содержащий торф более высокой степени разложения. Содержание битумов (веществ, извлекаемых органическим растворителем) в образце № 1 в 3 раза больше, чем в образце № 2, и, возможно, это свидетельствует о том, что образец № 1 представляет собой погребенную древесину хвойной породы, когда-то произраставшей на данном участке торфяной залежи. Древесина хвойных пород содержит больше смолистых веществ, чем лиственная. В образце № 2 содержание гуминовых

веществ несколько ниже по сравнению с образцом № 1 (11,6 и 14,9 % соответственно), что соответствует менее интенсивному процессу гумификации в образце № 2. Отличия в количественном содержании компонентов в исследуемых образцах, возможно, связаны также и с разной глубиной их залегания в торфяном слое.

Результаты изучения физико-химических свойств и химического состава зрелой и погребенной древесины представлены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-химические свойства и компонентный состав образцов зрелой и погребенной древесины

Table 2. Physicochemical properties and component composition of samples of mature and buried wood

Материал	Влажность, %	Зольность, %	Целлюлоза, %	Экстрактивные вещества, %
Древесина дуба	9,98	0,4	45,8	9,9
Древесина ольхи	6,2	0,85	47,9	7,7
Древесина березы	10,3	1,1	53,0	4,4
Древесина хвойных пород (пеллеты)	6,8	0,3	65,2	3,7
Погребенная древесина № 1	3,1	1,7	48,0	9,4
Погребенная древесина № 2	6,5	0,7	59,9	3,2

В древесине хвойных пород содержание целлюлозы больше на 23,0 %, чем в древесине березы, а по сравнению с древесиной дуба и ольхи – на 42,4 и 36,1 % соответственно. Так как наличие целлюлозы является показателем сохранности погребенной в торфе древесины и ее содержание уменьшается с повышением степени разложения торфа в залежи, можно утверждать, что образец № 2, содержащий большее количество целлюлозы чем образец № 1, извлечен из залежи торфа меньшей степени разложения (гумификации).

Содержание экстрактивных веществ, извлекаемых горячей водой, в древесине березы, древесине хвойных пород, образце № 2 погребенной древесины примерно одинаковое – 4,4–3,7 %, в древесине дуба и ольхи, а также в погребенной древесине № 1 более высокое – 7,7–9,9 %.

Методом ИК-спектроскопии выполнено исследование образцов погребенной и зрелой древесины. На рис. 1 представлены ИК-спектры двух образцов погребенной древесины, а на рис. 2 – ИК-спектры древесины хвойных пород (пеллеты), древесины дуба, ольхи и березы.

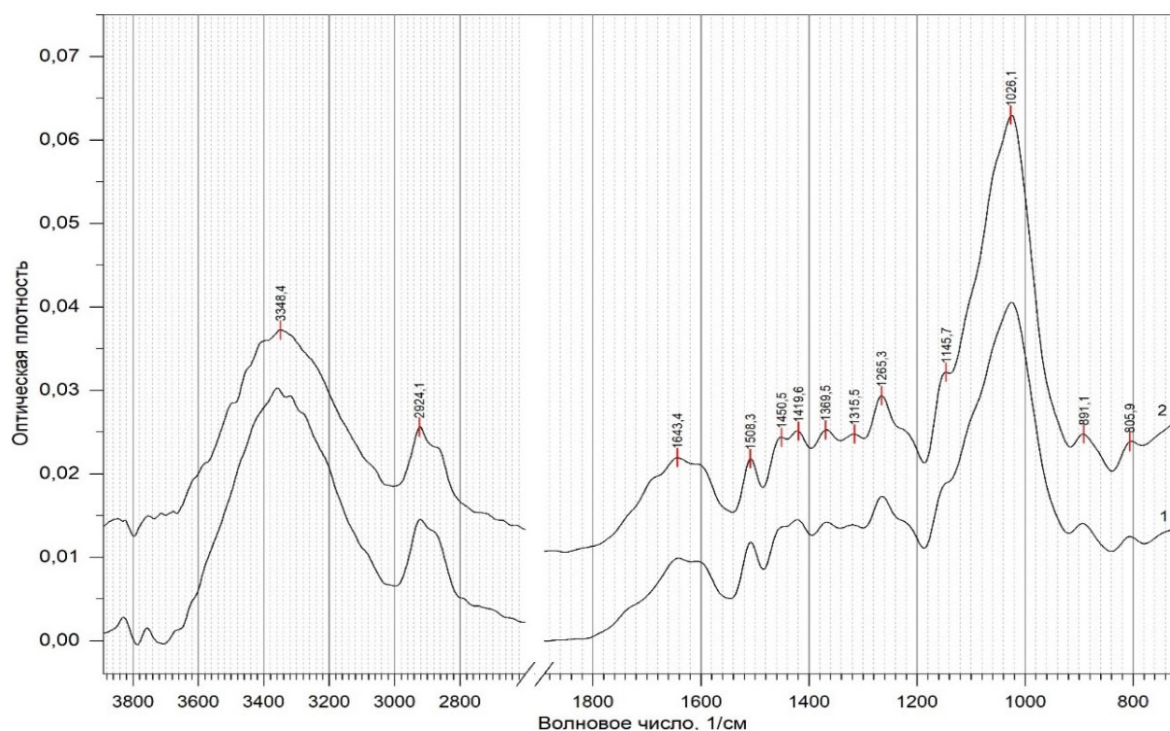


Рис. 1. ИК-спектры образцов № 1 (1) и № 2 (2) погребенной древесины

Fig. 1. IR spectra of samples № 1 (1) and № 2 (2) of buried wood

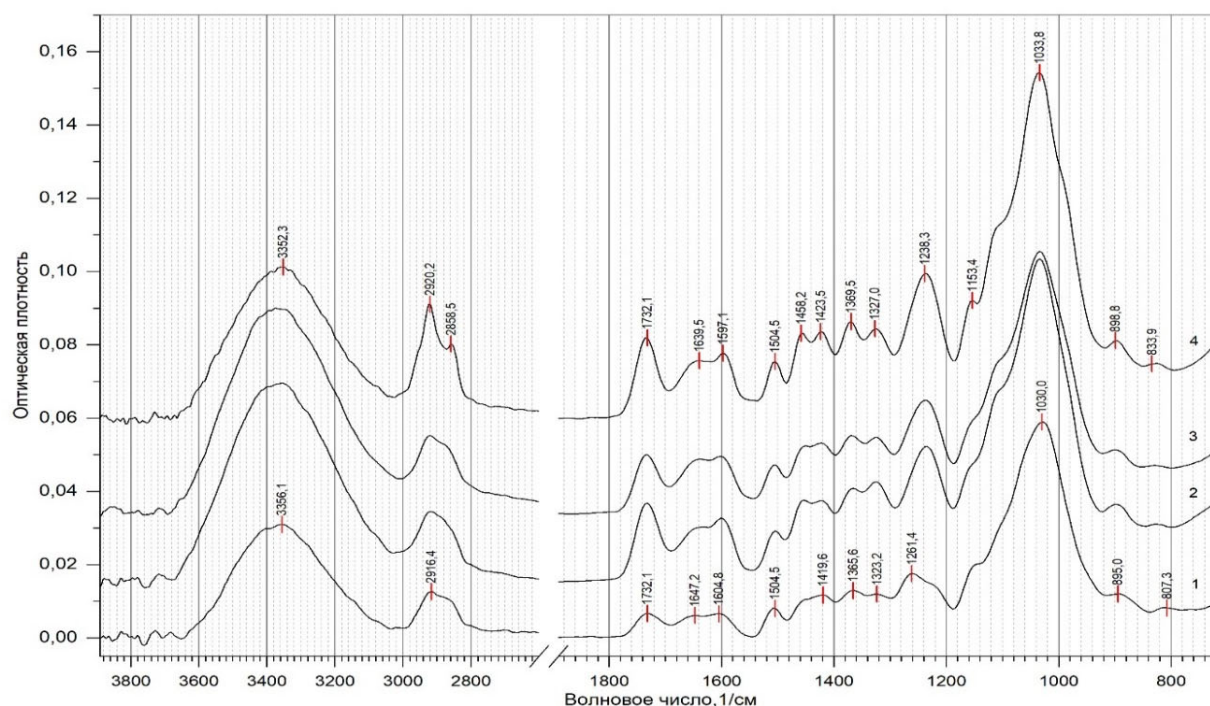


Рис. 2. ИК-спектры древесины хвойных пород (пеллеты) (1), дуба (2), ольхи (3) и березы (4)

Fig. 2. IR spectra of coniferous wood (pellets) (1), oak (2), alder (3) and birch (4)

На ИК-спектрах погребенной и зрелой древесины можно выделить несколько областей: область $3600\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ характеризует валентные колебания различных типов гидроксильных групп, связанных водородными связями; область $3000\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ – область симметричных и асимметричных валентных колебаний C–H групп метильных, метиленовых, метинных группировок компонентов древесного композита; область $1800\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ (область «отпечатков пальцев») – область валентных колебаний групп с кратными связями (C=O, C=C, CAr–CAr), валентных колебаний C–C и C–O связей, а также деформационных колебаний C–H связей и OH-групп компонентов древесины: лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз; область $1000\text{--}700\text{ см}^{-1}$ – область внеплоскостных деформационных колебаний C–H-связей ароматического кольца лигнина, колебаний глюкопиранозного кольца целлюлозы и гемицеллюлоз, внеплоскостных деформационных колебаний OH-групп целлюлозы и гемицеллюлоз.

Как показывает анализ полученного материала, спектры образцов погребенной древесины близки между собой как по набору полос поглощения, так и по их интенсивности, что свидетельствует о близком химическом составе исследованных образцов. Наблюдаемые различия в интенсивности отдельных полос и их положении могут быть обусловлены разным количественным компонентным составом образцов (табл. 2). Такая же закономерность наблюдается и в случае спектров образцов лиственных пород древесины – березы, дуба и ольхи (см. рис. 2). ИК-спектр образца хвойных пород древесины (пеллеты) отличается от спектров образцов лиственных пород древесины:

1) полоса поглощения валентных колебаний связей C=O в несопряженных кетонах, карбонильных соединениях и в сложноэфирных группах на 1732 см^{-1} менее интенсивна;

2) широкая полоса скелетных колебаний связей C–C S-колец лигнинов и валентных колебаний C–O в фенолах синрингильных структурных единиц на 1238 см^{-1} отсутствует на спектрах древесины хвойных пород: вместо нее появляется полоса на 1261 см^{-1} (деформационные колебания связей C–H HGS колец лигнинов и колебания связей C=O в сопряженных сложноэфирных группах) с плечом на 1220 см^{-1} (скелетные колебания связей C–C G-колец лигнинов и валентные колебания C–O в фенолах гваяцильных структурных единиц) [6, 7];

3) на ИК-спектрах появляется полоса на 807 см^{-1} (деформационные внеплоскостные колебания связей C–H в позициях 2, 5 и 6 ароматического G-кольца) [6, 7].

На рис. 3 представлены ИК-спектры погребенной древесины № 1 и древесины хвойных пород (пеллеты). Сравнительный анализ ИК-спектров погребенной и зрелой древесины показал, что они также близки между собой по набору полос поглощения и по их относительной интенсивности.

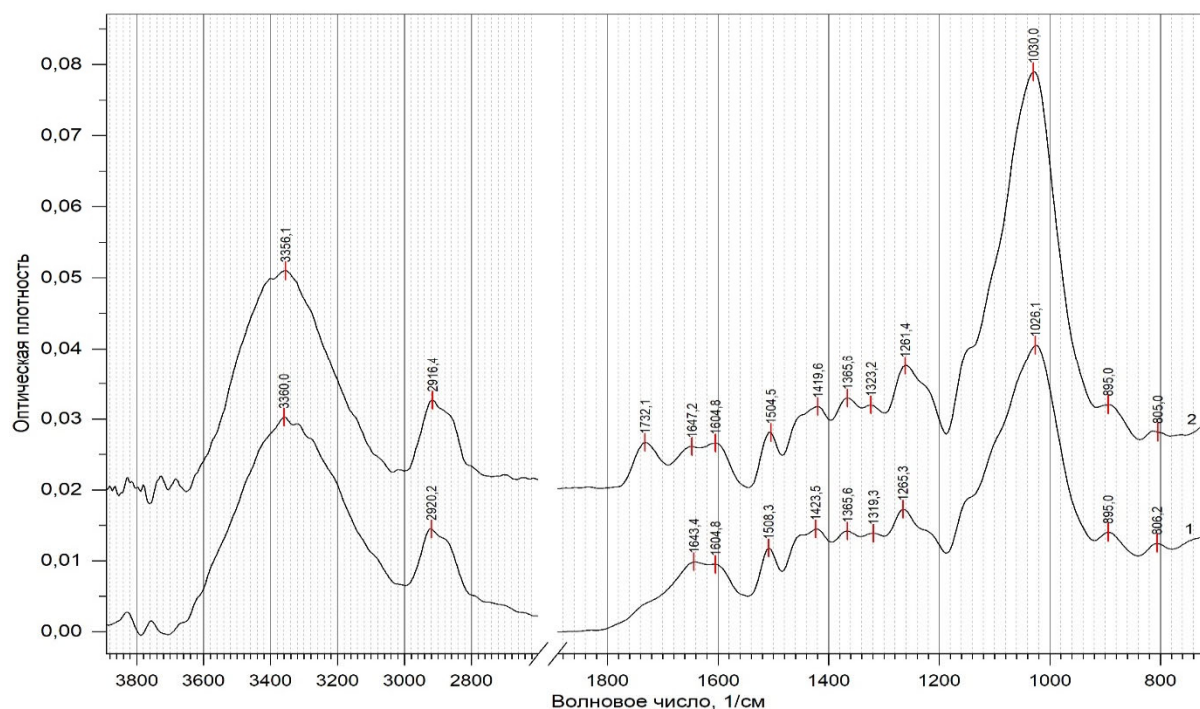


Рис. 3. ИК-спектры: 1 – погребенной древесины (образец № 1); 2 – древесины хвойных пород (пеллеты)

Fig. 3. IR spectra: 1 – buried wood (sample № 1); 2 – coniferous wood (pellets)

Различие отмечается в области поглощения карбонильных групп – полоса на 1732 см^{-1} , присутствующая в спектре древесины хвойных пород, не наблюдается в спектре погребенной древесины, что может быть обусловлено взаимодействием указанных функциональных групп в погребенной древесине с ионами зольных элементов торфяной залежи. Наличие на обоих ИК-спектрах полосы на 807 см^{-1} (деформационные внеплоскостные колебания связей C–H в позициях 2, 5 и 6 ароматического G-кольца) подтверждает предположение, что погребенная древесина относится к хвойной породе [6, 7].

Продуктами термического разложения древесины в инертной атмосфере являются неконденсируемые газы, тяжелые летучие вещества (в том числе древесная смола) и древесный уголь. В целом термическая деструкция древесины как в инертной, так и в окислительной среде может быть представлена суммой реакций термического разложения отдельных компонентов: гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина. При этом известно, что температурные интервалы термической деструкции этих компонентов частично перекрываются [8]. Термическое разложение гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина происходит в интервалах $225\text{--}325\text{ °C}$, $305\text{--}375\text{ °C}$ и $250\text{--}500\text{ °C}$ соответственно [9].

Разложение целлюлозы происходит через дегидратацию, гидролиз, окисление, декарбоксилирование. Гемицеллюлозы менее термически стабильны по сравнению с целлюлозой и лигнином, что обусловлено присутствием ацетильных групп [8].

Экстрактивные вещества, несмотря на небольшую долю ($\sim 2\text{--}5\%$) в составе древесины, значительно влияют как на механическую прочность и цвет, так и на термическую стабильность. Установлено, что экстрактивные вещества, извлекаемые этанолом, по-разному влияют на термическую стабильность древесины хвойных и лиственных пород. Экстрактивные вещества древесины хвойных пород разрушаются при более низкой температуре по сравнению с другими компонентами и не оказывают влияния на их термическую стабильность, а экстрактивные вещества лиственных пород способствуют термической деструкции древесины [10]. Другие исследователи [11] обнаружили, что удаление экстрактивных веществ вызывает снижение доли углерода в древесном веществе и уменьшение образования угля, возрастание скорости потери массы, а также смещение температурных интервалов термодеструкции компонентов древесины в область более высоких значений.

Результаты термолиза объектов исследования в инертной атмосфере представлены на рис. 4, 5 и в табл. 3, 4.

В интервале температур до 150 °C происходит некоторое снижение массы образцов, связанное с удалением физически адсорбированной влаги и легколетучих компонентов, при этом наибольшее их содержание наблюдается у погребенной древесины (см. табл. 3).

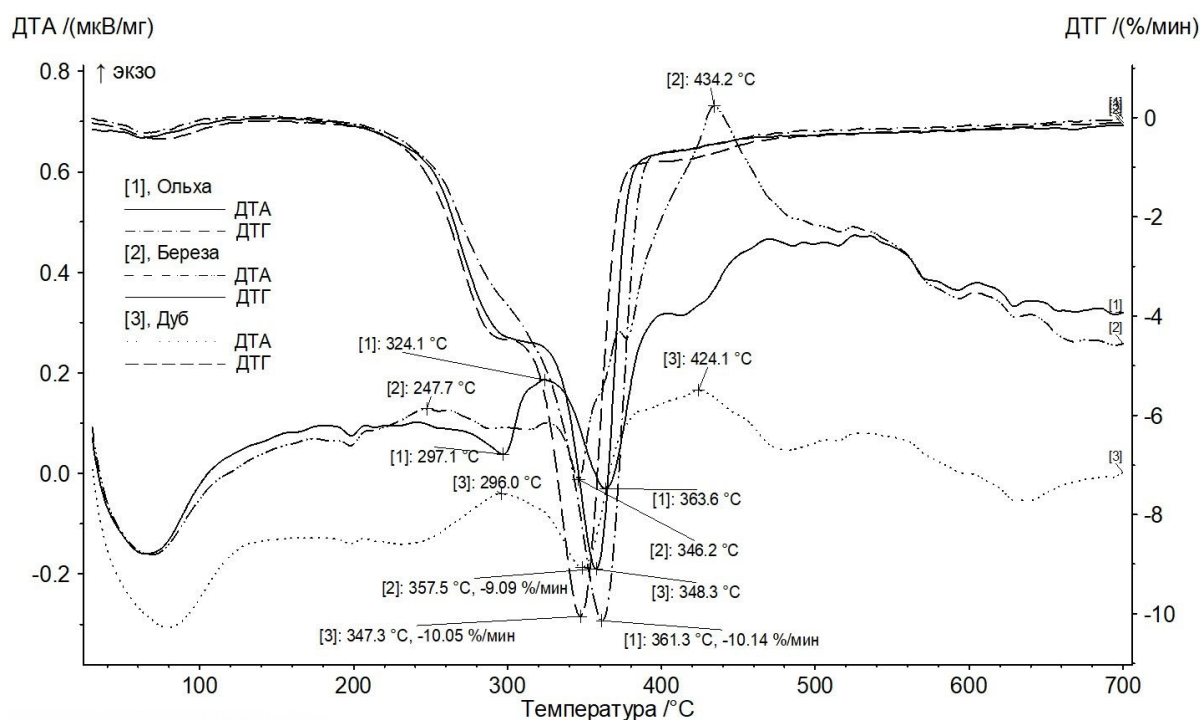


Рис. 4. Термограммы образцов древесины лиственных пород

Fig. 4. Thermograms of hardwood samples

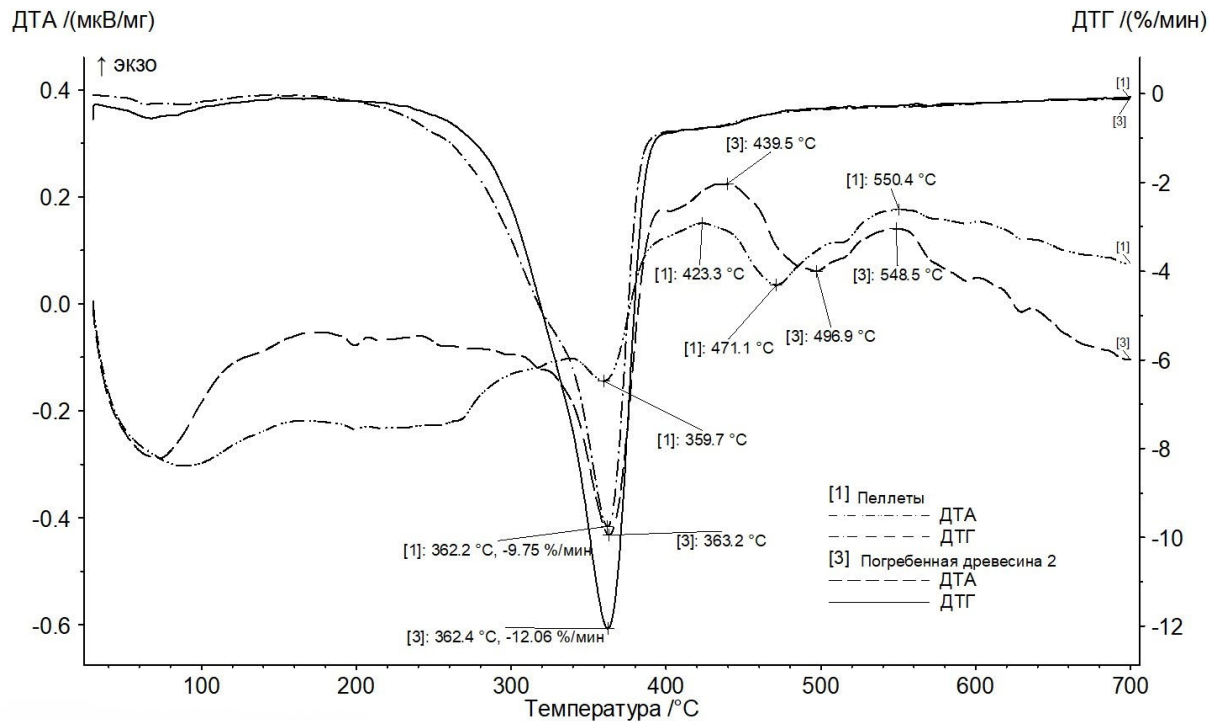


Рис. 5. Термограммы образцов пеллет и погребенной древесины

Fig. 5 Thermograms of pellet and buried wood samples

Таблица 3. Потеря массы объектов исследования в различных температурных диапазонах**Table 3. Mass loss of study objects in various temperature ranges**

Наименование	Температура и скорость максимума термолитиза, °C/% в мин	Потеря массы, %			Остаточная масса, %
		30–150 °C	150–600 °C	600–950 °C	
Зрелая древесина					
Древесина дуба	$\frac{347,3}{10,05}$	2,61	76,65	6,56	14,44
Древесина ольхи	$\frac{361,3}{10,14}$	1,14	75,69	1,38	21,77
Древесина березы	$\frac{357,5}{9,09}$	2,30	71,66	7,28	18,73
Древесина хвойных пород (пеллеты)	$\frac{362,2}{9,75}$	1,57	72,76	4,09	21,56
Погребенная древесина					
Образец № 1	$\frac{357,9}{9,64}$	2,35	72,86	5,12	19,61
Образец № 2	$\frac{362,4}{12,06}$	3,79	78,88	4,47	12,77

Расчет потери массы образцов в температурных диапазонах, соответствующих процессам коксования (до 600 °C) и активации (600–900 °C), позволил установить (см. табл. 3), что образцы теряют на первом этапе от 71,5 до 79 % массы, а на втором – от 1,3 до 7,3, а остаточная масса после нагрева до 1000 °C составляет от 12,8 до 21,8 %.

Установлено, что максимум скорости термолитиза находится в области 358–362 °C как для зрелой, так и для погребенной древесины. Исключение составляет древесина дуба, максимум термического разложения которой сдвинут в сторону более низких температур, что может быть связано, как указано в [10], с высоким содержанием экстрактивных веществ. Наибольшая скорость разложения органического вещества зафиксирована для образца погребенной древесины № 2 (12,06 % в мин), наименьшая – для березы (9,09 % в мин).

Наиболее полно процесс термического разложения происходит у погребенной древесины № 2 и дуба, остаточная масса которых составляет 12,8–14,5 %.

С помощью программного обеспечения NETZSCH Proteus Ternal Analysis рассчитана потеря массы по Маршу композитов в интервале температур 185–845 °C (табл. 4).

Таблица 4. Потеря массы образцов древесины**Table 4. Loss of mass of wood samples**

Наименование	Температура, °С				Потеря массы, %
	Начало	Середина	Перегиб	Конец	
Зрелая древесина					
Древесина дуба	301,7	337,9	347,3	373,1	67,57
Древесина ольхи	310,8	348,7	360,9	385,6	69,72
Древесина березы	304,7	340,9	358,1	379,0	61,29
Древесина хвойных пород (пеллеты)	313,6	350,3	362,2	386,5	64,08
Погребенная древесина					
Образец № 1	313,0	349,7	359,5	384,2	60,64
Образец № 2	321,5	354,2	361,3	385,9	72,03

Установлено, что основные процессы термического разложения образцов протекают в достаточно узком по сравнению с торфом диапазоне температур: от 301 °C до 386 °C, при этом разлагается от 61 до 72 % органической массы.

У всех исследованных образцов зафиксировано до шести тепловых эффектов, свидетельствующих о сложном характере трансформации вещества в процессе термической деструкции.

Заключение. На торфяном месторождении «Туршовка-Чертово» отобраны образцы погребенной древесины. Проведен анализ компонентного состава древесных пеллет и погребенной древесины по методу Инсторфа. Показано, что содержание химических компонентов (битумов, водорастворимых и легкогидролизуемых веществ, гуминовых веществ, лигнина) в образцах погребенной древесины различно. Это свидетельствует о том, что они извлечены из участков торфяной залежи, различающихся степенью разложения, ботаническим составом растений-торфообразователей, а также глубиной залегания древесины в залежи.

Определен компонентный состав (целлюлоза, экстрактивные вещества, зольные элементы) древесины лиственных пород (дуб, ольха, береза), хвойных пород (древесные пеллеты) и погребенной древесины. Показано, что содержание целлюлозы в древесине березы выше, чем в древесине дуба и ольхи, а экстрактивных веществ больше в древесине дуба. В погребенной древесине содержание целлюлозы в образце № 2 больше, чем в образце № 1. Высокое содержание целлюлозы в древесных пеллетах – 65,2 %. Высокое содержание экстрактивных веществ обнаружено в образце № 1 погребенной древесины и древесине дуба.

Образцы погребенной и зрелой древесины исследованы методом ИК-спектроскопии. Спектры исследуемых образцов погребенной древесины близки между собой как по набору полос поглощения, так и по их интенсивности, что свидетельствует о близком компонентном составе исследованных образцов. Такой же факт наблюдается и в случае спектров образцов зрелой древесины лиственных пород.

ИК-спектр образца древесины хвойных пород отличается от ИК-спектров древесины лиственных пород менее интенсивной полосой карбонильных групп на 1732 см^{-1} ; вместо широкой полосы скелетных колебаний связей С—С S-колец лигнинов и валентных колебаний С—О в фенолах сиригильных структурных единиц на 1238 см^{-1} наблюдается полоса на 1261 см^{-1} (деформационные колебания связей С—Н HGS колец лигнинов и колебания связей С=О в сопряженных сложнотерфенольных группах) с плечом на $\sim 1220\text{ см}^{-1}$ (скелетные колебания связей С—С G-колец лигнинов и валентные колебания С—О в фенолах гваяцильных структурных единиц); на ИК-спектрах появляется полоса на 807 см^{-1} (деформационные внеплоскостные колебания связей С—Н в позициях 2, 5 и 6 ароматического G-кольца).

Сравнительный анализ ИК-спектров погребенной и зрелой древесины показал различие в области поглощения карбонильных групп (полоса на 1732 см^{-1} , присутствующая в спектре древесины пеллет, не наблюдается в спектре погребенной), что может быть обусловлено взаимодействием указанных функциональных групп в погребенной древесине с ионами зольных элементов торфяной залежи. В погребенной древесине не наблюдается и полоса на 1238 см^{-1} . (Полосы в области $1248\text{--}1232\text{ см}^{-1}$ характеризуют колебания ароматического кольца сиригильного типа и колебания С—О-связи в лигнине и ксилане.)

Установлено, что основные процессы термического разложения образцов протекают в достаточно узком по сравнению с торфом диапазоне температур – от $301\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $386\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом разлагается от 61 до 72 % органической массы. У всех исследованных образцов зафиксировано до шести тепловых эффектов, свидетельствующих о сложном характере трансформации вещества в процессе термической деструкции. Наибольшая скорость разложения органического вещества зафиксирована для образца погребенной древесины № 2 (12,06 % в мин), наименьшая скорость – для березы (9,09 % в мин). Установлено, что максимум скорости термолитиза находится в области $358\text{--}362\text{ }^{\circ}\text{C}$ как для зрелой, так и для погребенной древесины, за исключением дуба, имеющего температурный максимум при $347\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Список использованных источников

1. Нуштаева А. В. Химия древесины : учеб. пособие / А. В. Нуштаева. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 100 с.
2. Fengel D. Chemische Zusammen von Nadel- und Laubholzern / D. Fengel, D. Grosser // HOLZ als Roh- und Werkstoff. – 1975. – Vol. 33, № 1. – P. 32–34.
3. Раковский, В. Е. Химия и генезис торфа / В. Е. Раковский, Л. В. Пигулевская. – М. : Недра, 1978. – 230 с.
4. Мурашкевич, Т. В. Изменение химических свойств лигнина, древесины торфяных залежей / Т. В. Мурашкевич // Сб. науч. тр. ИФох АН БССР. – Минск : АН БССР, 1961. – № 9. – С. 119.
5. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
6. Тюткова, Е. А. ИК-спектроскопия древесины индивидуальных годовичных слоев / Е. А. Тюткова, С. Р. Лоскутов, Н. П. Шестаков // Хвойные бореальные зоны. – 2017. – Т. XXXV, № 3–4. – С. 61–67.
7. Разработка метода идентификации породы древесины в археологических материалах методом ИК-спектроскопии / В. М. Пожидаева [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2019. – Т. 74, № 12. – С. 911–921.
8. Vichnevsky, S. Characterization of wood and non-wood mechanical pulps by differential thermal analysis / S. Vichnevsky, B. Fuhr, J. Melnichuk // J. Pulp & Paper Sci. – 2003. – Vol. 29, № 1. – P. 17–20.
9. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment / D. K. Shen [et al.] // Fuel. – 2009. – Vol. 88. – P. 1024–1030.
10. Sebio-Puna, I. T. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species / I. T. Sebio-Puna, S. Naya, J. Lopez-Beceiro // J. Therm. Anal. Calorim. – 2012. – Vol. 109, № 3. – P. 1163–1167.
11. Varhegyi, G. Effect of sample origin, extraction, and hot water washing on the devolatilization kinetics of chestnut wood / G. Varhegyi, M. G. Gronli, C. Di Blasi // Ind. Eng. Chem. Res. – 2004. – Vol. 43. – P. 2356–2367.

References

1. Nushtaeva A. V. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood]. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2013, 100 p. (in Russian)
2. Fengel D., Grosser D. Chemische Zusammen von Nadel- und Laubholzern. *HOLZ als Roh- und Werkstoff*, 1975. vol. 33, no. 1, pp. 32–34.

3. Rakovskiy V. E., Pigulevskaya L. V. *Khimiya i genezis torfa* [Chemistry and genesis of peat]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 230 p. (in Russian)
4. Murashkevich T. V. *Izmenenie khimicheskikh svoystv lignina, drevesiny torfyanykh zalezhey* [Changes in the chemical properties of lignin and peat wood]. *Sbornik Nauchnykh trudov IFOKh AN BSSR* [Proc. of the Institute of Organophysical Chemistry of the NAS of the BSSR]. Minsk, AN BSSR, 1961, no. 9, pp. 119. (in Russian)
5. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
6. Tyutkova E. A., Loskutov S. R., Shestakov N. P. *IK-spektroskopiya drevesiny individualnykh godichnykh sloev* [IR spectroscopy of wood of individual growth layers]. *Khvoynye borealnye zony = Coniferous boreal areas*, 2017, vol. XXXV, no. 3–4, pp. 61–67. (in Russian)
7. Pozhidaeva V. M., Retivov V. M., Panarina E. I., Sergeeva Ya. E., Zhdanovich O. A., Yatsishina E. B. *Razrabotka metoda identifikatsii porody drevesiny v arkheologicheskikh materialakh metodom IK-spektroskopii* [Development of a method for identifying wood species in archaeological materials using IR spectroscopy]. *Zhurnal analiticheskoy khimii = Journal of Analytical Chemistry*, 2019, vol. 74, no. 12, pp. 911–921. (in Russian)
8. Vichnevsky S., Fuhr B., Melnichuk J. Characterization of wood and non-wood mechanical pulps by differential thermal analysis. *J. Pulp & Paper Sci.*, 2003, vol. 29, no. 1, pp. 17–20.
9. Shen D. K., Gu S., Luo K. H., Bridgwater A. V., Fang M. X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 2009, vol. 88, pp. 1024–1030.
10. Sebio-Punal T., Naya S., Lopez-Beceiro J., Tarrio-Saaverda J., Artiaga R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2012, vol. 109, no. 3, pp. 1163–1167.
11. Varhegyi G., Gronli M. G., Di Blasi C. Effect of sample origin, extraction, and hot water washing on the devolatilization kinetics of chestnut wood. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, vol. 43, pp. 2356–2367.

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий Центром по торфу и сапропелям, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

Царюк Татьяна Яковлевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Пехтерева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@jandex.ru

Навоша Юльян Юльянович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navoscha@tut.by

Калантаров Михаил Георгиевич – кандидат биологических наук, ведущий инженер, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mkalantaroff@gmail.com

Марзан Анастасия Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marr_29@mail.ru

Фалюшина Ирина Петровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Information about the authors

Alexey E. Tomson – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of the Center of Peat and Sapropel, Head of Lab of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

Tatiana Ya. Tsaryuk – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Tamara V. Sokolova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tomsok49@tut.by

Victoriya S. Pekhtereva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@jandex.ru

Yulian Yu. Navosha – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: navoscha@tut.by

Mikhail G. Kalantarov – Ph. D. (Biology), Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mkalantaroff@gmail.com

Anastasiya S. Marzan – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: marr_29@mail.ru

Irina P. Falyushyna – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by