

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОДУКТОВ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ТОРФОВ

**В. М. Крайко, В. М. Дударчик, Ю. Г. Янута,
Е. В. Ануфриева, Е. Ю. Дорожко, Ю. Ю. Навоша**

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Повышенный интерес к свойствам и способам получения фульвоподобных кислот из природных каустобиолитов, включая в первую очередь различные торфа, вызван появлением в их структуре композиций, обеспечивающих способность к комплексообразованию с редкоземельными и тяжелыми металлами, включая востребованные в атомной энергетике уранилы. Использование указанных фульвоподобных кислот в разрабатываемых новых технологиях добычи редких и тяжелых металлов рассматривается как очень перспективное. В предлагаемой статье приведен сравнительный анализ физико-химических свойств фульвоподобных кислот, полученных методом окислительной деструкции торфов и гуминовых веществ исходных торфов.

Анализ данных ИК-спектроскопии исходных торфов (низинного и верхового) и продуктов их окисления пероксидом водорода показал, что в процессе окислительной деструкции происходит разрушение полисопряженных структур торфа с образованием продуктов с высоким содержанием карбонильных групп, способствующих комплексообразованию.

Выявлено, что окислительная деструкция торфа приводит к уменьшению содержания углерода и повышению содержания водорода и кислорода, а также к снижению оптической плотности их растворов и повышению растворимости. Полученное молекулярно-массовое распределение на Sephadex G-50 исходных гуминовых кислот и фульвоподобных кислот показало, что процессы деструкции ведут к уменьшению молекулярных масс макромолекул фульвоподобных кислот по сравнению с исходными гуминовыми кислотами.

Ключевые слова: торф; гуминовые кислоты; фульвокислоты; фульвоподобные кислоты; окислительная деструкция; ИК-спектроскопия, гель-хроматография; элементный анализ.

Для цитирования. Крайко В. М., Дударчик В. М., Янута Ю. Г., Ануфриева Е. В., Дорожко Е. Ю., Навоша Ю. Ю. Физико-химическая характеристика продуктов окислительной деструкции торфов // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 172–181.

PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF PEAT OXIDATIVE DEGRADATION PRODUCTS

**V. M. Kraiko, V. M. Dudarchik, Yu. G. Yanuta,
E. V. Anufrieva, E. Yu. Dorozhko, Yu. Yu. Navosha**

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

Abstract. The increased interest in the properties and methods of producing of fulvic-like acids from natural caustobolites, including primarily various peat, is caused by the appearance in their structure of compositions that provide the ability to complex formation with rare earth and heavy metals, including uranium demanded in nuclear power. The use of these fulvic-like acids in developing new technologies for the extraction of rare and heavy metals is considered to be very promising. The proposed article provides a comparative analysis of the physical and chemical properties of fulvic-like acids obtained by oxidative decomposition of peat and the humic substances of the initial peat.

Analysis of IR spectroscopy data of the initial peat (lowland and upland) and products of their oxidation with hydrogen peroxide showed that in the process of oxidative destruction occurs the breakdown of the poly-stranded structures of the peat with the formation of products with high content of carbonyl groups, that promote complex formation.

It was found that the oxidative destruction of peat leads to a reduction in carbon content and an increase in hydrogen and oxygen, as well as a decrease in the optical density of their solutions and an increase in solubility. The obtained molecular-mass distribution on Sephadex G-50 of initial humic acids and fulvic-like acids showed that destruction processes lead to a decrease in molecular weights of macromolecules of fulvic-like acids compared to the original humic acids.

Keywords: peat; humic acid; fulvic acids; fulvic-like acids; oxidative degradation; IR spectroscopy, gel chromatography; elemental analysis.

For citation. Kraiko V. M., Dudarchik V. M., Yanuta Yu. G., Anufrieva E. V., Dorozhko E. Yu., Navosha Yu. Yu. Physico-chemical characteristics of peat oxidative degradation products. *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 172–181.

Введение. Интерес к гуминовым веществам (ГВ) как природным высокомолекулярным соединениям, обладающим рядом перспективных свойств, в настоящее время высок. При этом сравнительно новой областью применения таких соединений является их использование в качестве природных комплексообразователей [1–4]. В зависимости от структурных особенностей ГВ могут образовывать как нерастворимые комплексы с ионами металлов, включая тяжелые и редкоземельные, так и растворимые. В последнем случае речь идет о такой составляющей ГВ, как фульвокислоты (ФК).

Способность к избирательному выщелачиванию из минеральных пород тяжелых металлов (ТМ) и образованию устойчивых комплексов обуславливает важную роль ГВ в процессах «рудобразования». Известно участие их в формировании урансодержащих, золотоносных руд, а также бокситов [5]. Особую роль в этом процессе играют ФК. Меньшая молекулярная масса, менее конденсированное ароматическое ядро и высокое содержание полярных групп увеличивает растворимость и подвижность ФК и их комплексов по сравнению с гуминовыми кислотами (ГК). Ограничением в применении ФК является их невысокое содержание в природном сырье, составляющее порядка 5–15 %. С помощью метода окислительной деструкции торфа пероксидом водорода, описанного в работе [6], значительно увеличивается выход водорастворимых фульвоподобных кислот (ФПК). Получаемые ФПК должны по потребительским качествам быть не хуже натуральных, т. е. сохранять их свойства как по растворимости, так и по отношению к образованию комплексов с редкоземельными элементами и ТМ, что является определяющим при их использовании в качестве добавок в геотехнологические растворы в технологиях подземного скважинного, чанового либо кучного выщелачивания.

Цель работы – провести сравнительный анализ физико-химических свойств ГК исходных торфов и ФПК, образованных в процессе окислительной деструкции.

Материалы и методы исследований. Выбор торфяного сырья с целью его химической модификации осуществляли на основе исследований [7]. Проведенный согласно работе [8] групповой анализ показал, что наиболее перспективными для химической модификации являются такие торфа, как пушицевый верхового типа и осоковый низинного типа. В этой связи для дальнейших исследований нами был использован торф месторождения «Туршовка – Чертово»: низинный, осоковый ($R = 30 \%$, $W = 47,7 \%$, $A^c = 2,2 \%$) и верховой, пушицевый ($R = 35 \%$, $W = 43,2 \%$, $A^c = 1,2 \%$). Исследуемые образцы торфа являются типичными и широко распространены в Беларуси.

Элементный состав образцов определяли в Центре аналитических и спектральных измерений Института физики НАН Беларуси на CHNOS-анализаторе VARIO EL, а оптическую плотность растворов – на колориметре КФК-2МП.

Структурные изменения, протекающие при окислительной модификации, изучали методом ИК-спектроскопии. ИК-спектры исходных и окисленных торфов регистрировали на ИК-спектрофотометре с Фурье-преобразованием IRPrestige-21 (Shimadzu) методом нарушенного полного внутреннего отражения. При исследовании использовали приставку однократного отражения MIRacle с призмой ZnSe.

Оценку изменения молекулярной массы проводили методом гель-хроматографии с использованием Sephadex G-50 [9]. В качестве элюента использовали 0,01 М раствор LiOH, скорость элюации составила 0,026 г/с. Фракции отбирали через 5 мин объемом 4 см³ с помощью коллектора фракций Dombifrac D-003. Анализ проводили на спектрофотометре СФ-46 при длине волны 211 нм и толщине кюветы 10 мм. В качестве раствора сравнения применяли 0,01 М раствор LiOH.

Калибровку проводили с помощью лигносульфонатов (LS) с известной молекулярной массой (49 000 Да, 8500 Да, 3000 Да), содержание во фракциях LS определяли при длине волны 280 нм, характерной для светопоглощения ОН-фенольных групп. Для нахождения внешнего объема колонки использовали Dextran blue с молекулярной массой 2 000 000 Да, оптическую плотность (D) во фракциях определяли при длине волны 380 нм. Полный объем колонки получали с использованием водного раствора ванилина (молекулярная масса 152 Да) с концентрацией вещества 1 г/дм³. Содержание ванилина в пробе находили при длине волны 270 нм.

Результаты, необходимые для построения калибровочного графика, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Сводная таблица параметров, необходимых для построения калибровочной хроматограммы

Table 1. Summary table of parameters required for the calibration chromatogram

Вещество	Молекулярная масса вещества, Да	M_e , г	K_d	$\sqrt{M_w}$	$\sqrt[3]{K_d}$
Dextran blue	2 000 000	16,6	0	1414,2	0
LS	49 000	17,6	0,02	94,86	0,271
	8500	25,34	0,175	89,44	0,559
	3000	33,5	0,339	59,16	0,697
Ванилин	152	50	1	12,32	1,0

Примечание: M_e – масса выхода; K_d – коэффициент распределения; $\sqrt{M_w}$ – среднемассовая молекулярная масса; $\sqrt[3]{K_d}$ – среднемассовый коэффициент распределения.

На рис. 1 представлена калибровочная гель-хроматограмма для определения параметров гель-хроматографической колонки.

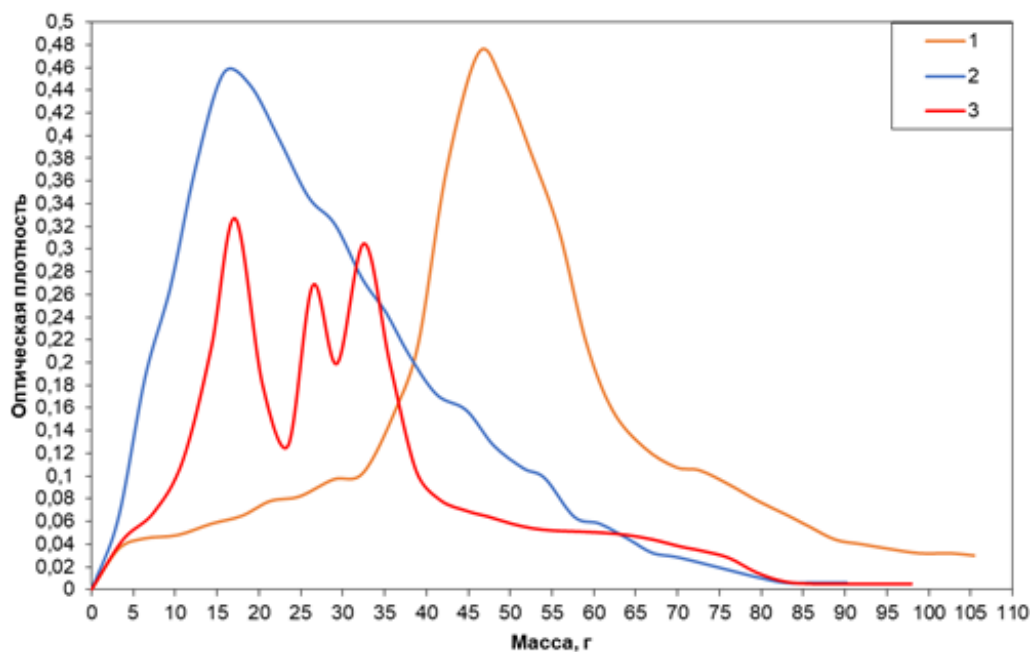


Рис. 1. Калибровочная гель-хроматограмма колонки:
1 – ванилин; 2 – Dextran blue; 3 – лигносульфонаты

Fig. 1. Calibration gel-chromatogram of column:
1 – vanillin; 2 – Dextran blue; 3 – lignosulfonates

Из данного рисунка следует, что внешний объем колонки (внешняя масса) по Dextran blue составил 16,6 г, а полный объем (полная масса) колонки по ванилину – 50 г.

Результаты и их обсуждение. Исследуемые торфа являются типичными по элементному составу (табл. 2). Содержание углерода в пушицевом торфе выше, чем в осоковом, кислорода больше в осоковом торфе.

Таблица 2. Элементный состав торфов и продуктов их окислительной деструкции

Table 2. Elemental composition of peats and products of their oxidative degradation

Образец	Элементный состав, % на ОВ						
	C	H	N	S	O	C : H	C : O
<i>Осоковый торф (R = 30 %, A^c = 2,2 %)</i>							
Исходный торф	55,72	7,35	2,92	0,65	33,36	7,58	1,67
Окисленный торф	53,95	7,45	3,06	0,31	35,23	7,24	1,53
Водорастворимые вещества	37,60	6,62	3,24	0,48	52,06	5,68	0,72
<i>Пушицевый торф (R = 35 %, A^c = 1,2 %)</i>							
Исходный торф	60,90	6,90	1,16	0,27	30,77	8,83	1,98
Окисленный торф	57,64	7,37	1,21	0,21	33,57	7,82	1,72
Водорастворимые вещества	39,17	5,83	1,79	0,35	52,86	6,72	0,74

Окислительная деструкция торфа приводит к уменьшению содержания углерода и повышению водорода и кислорода. Так, отношение C : O для окисленных препаратов торфа по сравнению с исходными падает (см. табл. 2). Наиболее богаты кислородом водорастворимые продукты окислительной деструкции, отношение C : O для которых значительно ниже, чем у исходных торфов. Содержание в их составе углерода и водорода также низкое.

На рис. 2–4 приведены ИК-спектры поглощения исходных (верхового и низинного) торфов и их окисленных пероксидом водорода форм.

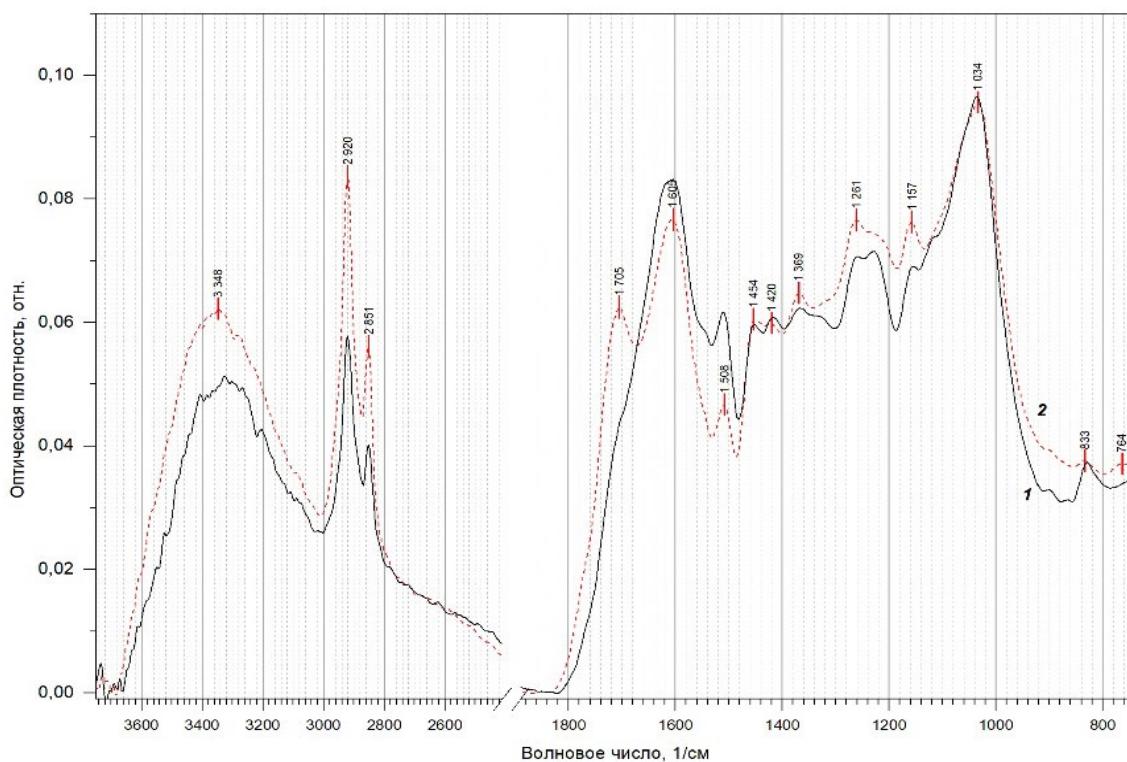


Рис. 2. ИК-спектры низинного (1) и верхового (2) торфа

Fig. 2. IR-spectra of lowland (1) and upland (2) peat

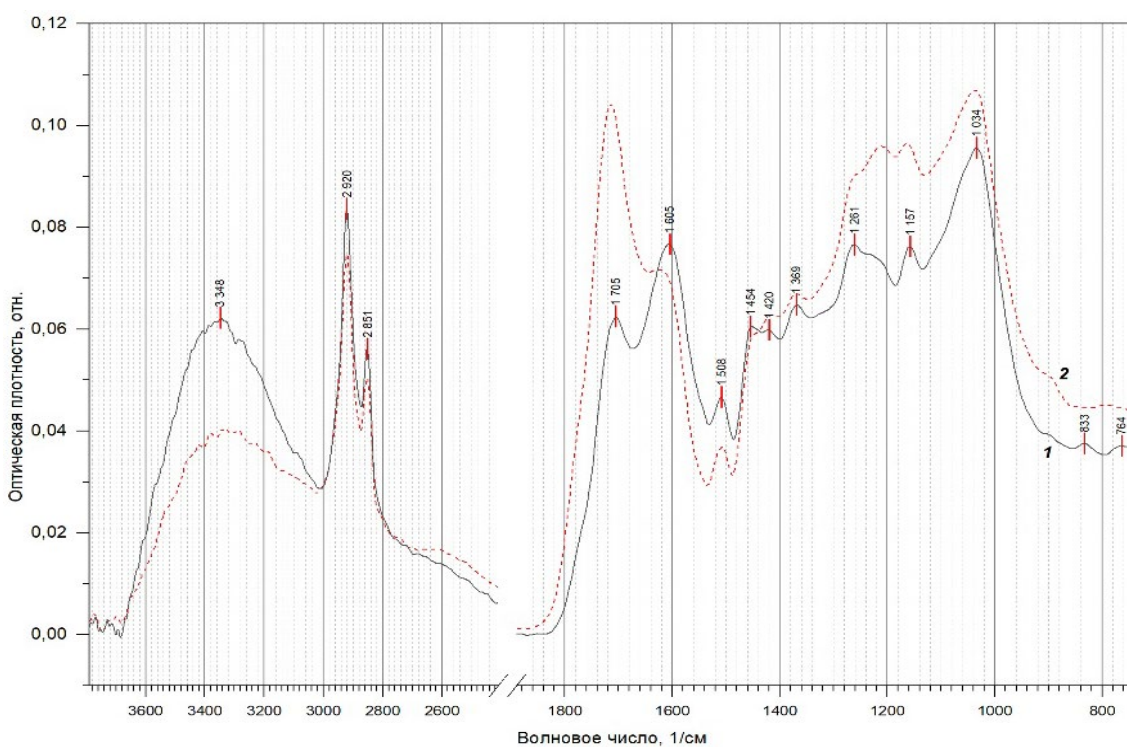


Рис. 3. ИК-спектры исходного верхового торфа (1) и продуктов его окислительной деструкции (2)

Fig. 3. IR-spectra of the initial upland peat (1) and its oxidative degradation products (2)

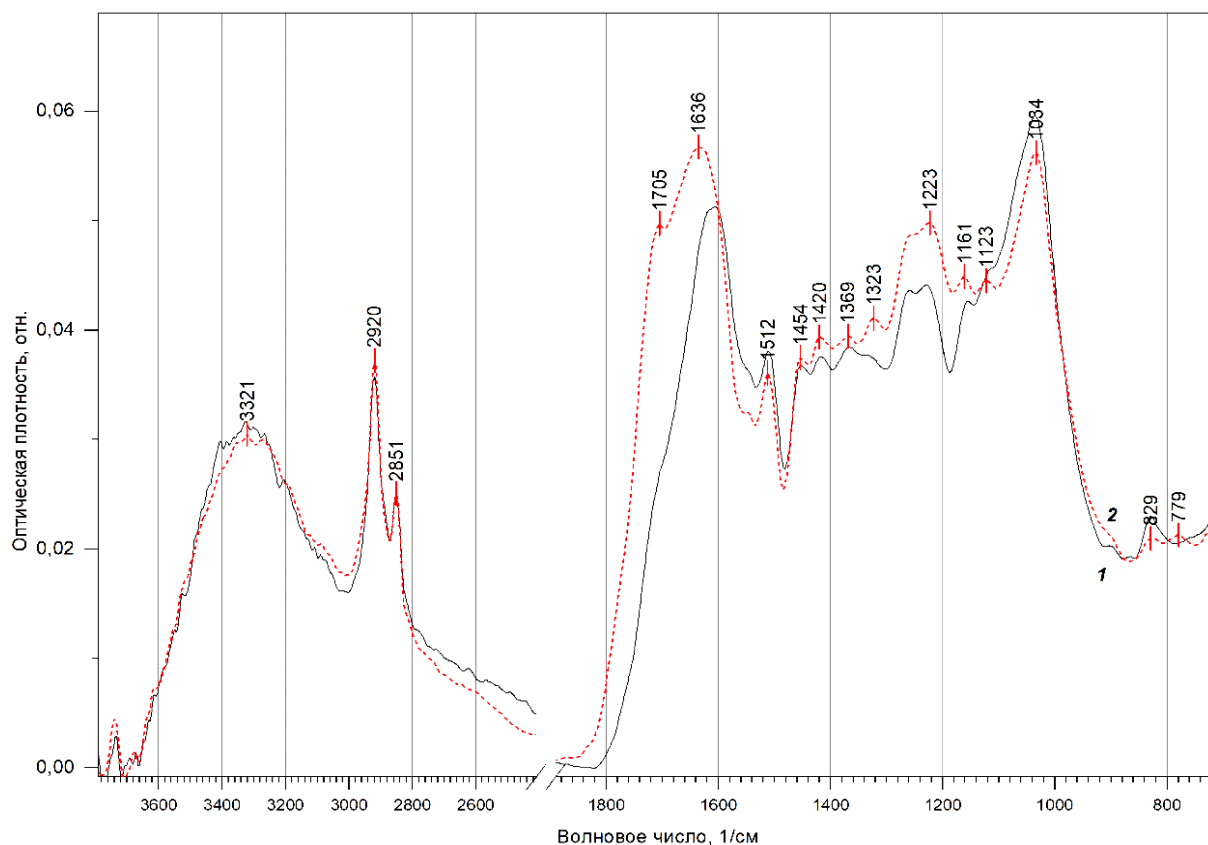


Рис. 4. ИК-спектры исходного низинного торфа (1) и продуктов его окислительной деструкции (2)

Fig. 4. IR-spectra of the initial lowland peat (1) and its oxidative degradation products (2)

Как следует из данных ИК-спектроскопии, спектры исследованных образцов торфов являются типичными для торфов сравнительно невысокой степени разложения и характеризуются полосами в следующих областях:

3300–3400 cm^{-1} – ν_{OH} – поглощение валентных колебаний гидроксильных групп углеводов, воды;

2920 и 2850 cm^{-1} – ν_{CH} – поглощение валентных колебаний CH_2 - и CH_3 -групп;

1705 cm^{-1} – $\nu_{\text{C=O}}$ – валентные колебания карбонильных групп кислот;

1600–1620 cm^{-1} – $\nu_{\text{C=C}}$ – валентные колебания углеродных C=C сопряженных двойных связей конденсированных ароматических структур, C=O первичных амидов;

1508 cm^{-1} – $\nu_{\text{C=C}}$ – валентные колебания C=C моноароматических структур;

1460–1390 cm^{-1} – плоскостные деформационные колебания CH_2 - и CH_3 -групп;

1270–1220 cm^{-1} – $\nu_{\text{C-O}}$ карбоксильных групп, $\delta_{\text{O-H}}$ фенолов;

1160–1040 cm^{-1} – $\nu_{\text{C-O}}$ углеводовных фрагментов;

1000–700 cm^{-1} – внеплоскостные деформационные колебания $=\text{C-H}$ -групп.

Сравнение спектров верхового и низинного торфов показывает, что верховой торф отличается от низинного более высоким содержанием CH_2 - и CH_3 -групп. Окисление торфов перекисью водорода практически не влияет на интенсивность полос валентных колебаний CH_2 - и CH_3 -групп в случае низинного торфа и приводит к незначительному уменьшению их интенсивности для верхового торфа.

С целью количественной оценки интенсивности накладывающихся полос поглощения в области 1490–1880 cm^{-1} было выполнено разложение этого участка спектра исследованных образцов на составляющие полосы и рассчитана их относительная интенсивность (табл. 3). На рис. 5 в качестве примера приведено разложение участка спектра окисленного образца верхового торфа.

Как следует из полученных данных (см. табл. 3), обработка торфов пероксидом водорода приводит к уменьшению интенсивности полос поглощения валентных колебаний C=C моноароматических структур (1508 cm^{-1}) и валентных колебаний углеродных C=C сопряженных двойных связей конденсированных ароматических структур (1600–1620 cm^{-1}). При этом снижение интенсивности указанных полос в большей степени проявляется в случае верхового торфа. Полученные результаты согласуются с данными элементного анализа: ароматичность ($\text{C} : \text{H}$) в большей степени снижается в окисленном верховом торфе, а в водорастворимых продуктах верхового торфа значение $\text{C} : \text{H}$ более высокое по сравнению с водорастворимыми соединениями низинного торфа.

Таблица 3. Относительная интенсивность полос поглощения исследованных образцов торфа в области 1880–1490 см⁻¹**Table 3. Relative intensity of absorption bands of the investigated peat samples in the 1880–1490 cm⁻¹ area**

Область спектра, см ⁻¹	Низинный торф			Верховой торф		
	$I_{исх}$, %	$I_{окисл}$, %	$I_{окисл} / I_{исх}$	$I_{исх}$, %	$I_{окисл}$, %	$I_{окисл} / I_{исх}$
1508–1512	15,0	13,5	0,9	8,7	4,8	0,5
1600–1640	69,0	48,5	0,7	60,2	44,2	0,7
1705	16,0	38,0	2,4	28,8	46,6	1,6
1780	–	–	–	2,3	4,4	2,0

Примечание: $I_{исх}$ и $I_{окисл}$ – интенсивность исходной и окисленной форм полос соответственно по отношению к общему поглощению в области 1880–1490 см⁻¹.

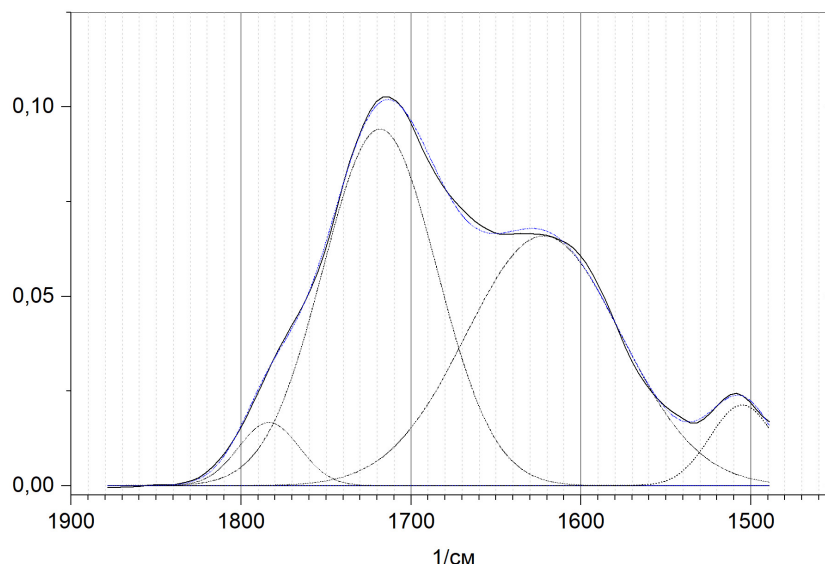


Рис. 5. Разложение участка спектра окисленного верхового торфа на составляющие полосы: — исходный спектр; --- кумулятивный спектр из составляющих

Fig. 5. Decomposition of the oxidized upland peat spectrum into component bands: — initial spectrum; --- cumulative spectrum of components

Для обоих торфов окислительная деструкция приводит к увеличению интенсивности полос поглощения валентных колебаний карбонильных групп кислот. В случае верхового торфа проявляется широкая полоса на 2600 см⁻¹ димеров кислот. Также наблюдается уменьшение полос внеплоскостных деформационных колебаний =C–H-групп на 1000–700 см⁻¹. Изменение интенсивности полосы поглощения свободных карбонильных групп торфов после окисления в большей степени происходит для низинного торфа, что может объясняться как образованием новых групп, так и удалением ионных связей с зольными элементами торфа.

Полученные данные позволяют предположить, что в процессе окислительной деструкции торфа происходят разрушение полисопряженных ароматических структур и образование продуктов с высоким содержанием кислородсодержащих групп.

На рис. 6 приведены электронные спектры поглощения ГК исходных торфов, водорастворимых продуктов окисления (ФПК) и ГК после окислительной деструкции осокового и пушицевого торфов. Навески высушенных вышеназванных продуктов растворяли в 0,1 н. растворе гидроксида натрия, концентрация составляла 0,02 %. Из данного рисунка видно, что все кривые сохраняют характерные для ГК особенности спектров поглощения. В то же время оптическая плотность ГК пушицевого торфа значительно выше, чем осокового. Причиной таких отличий является химический состав исходных растений-торфообразователей. Чем больше лигнина содержится в растениях-торфообразователях, тем больше ароматических структур участвует в построении молекул ГК [10].

Высокое значение величины оптической плотности ГК пушицевого торфа, свидетельствующее о значительном содержании полисопряженных структур в молекулах, можно объяснить условиями их образования. Кислая реакция среды верхового болота способствует гидролизу ГК, в результате которого происходят отщепление слабоокрашенных периферических цепей и конденсация отдельных фрагментов, что усиливает ароматический характер молекул ГК [8].

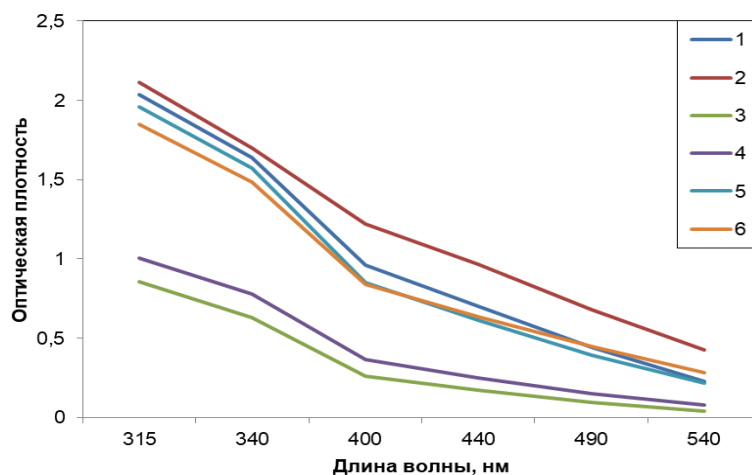


Рис. 6. Электронные спектры ГК и ФПК, концентрация 0,02 %:
 1 – ГК осокового торфа; 2 – ГК пушицевого торфа; 3 – ФПК осокового торфа;
 4 – ФПК пушицевого торфа; 5 – ГК остатка после выделения ФПК осокового торфа;
 6 – остатка после выделения ФПК пушицевого торфа

Fig. 6. Electronic spectra of HA and FLA, concentration 0.02%:
 1 – HA of sedge peat; 2 – HA of cottongrass peat; 3 – FLA of sedge peat;
 4 – FLA of cottongrass peat; 5 – HA of the residue after the extraction of FLA of sedge peat;
 6 – Residue after the extraction of FLA of cottongrass peat

Окисление молекул ГК пероксидом водорода приводит к резкому снижению оптической плотности их растворов. Так, значения величин оптических плотностей для ФПК значительно ниже, чем у исходных ГК во всей видимой области спектра. При длине волны 440 нм величина оптической плотности окисленных форм ГК по сравнению с таковой исходных ГК уменьшилась в 4,1 раза для осокового торфа и в 3,8 раза для пушицевого.

Оптическая плотность ГК после выделения ФПК занимает среднее положение. Светопоглощение макромолекул этих препаратов связано с устойчивыми хромофорами, незатронутыми в результате окислительной деструкции, при этом вклад систем полисопряжения в общее светопоглощение у этих веществ ниже, чем у исходных ГК, но выше, чем у ФПК (см. рис. 6).

Водорастворимые продукты, полученные в результате окислительной деструкции торфов, имеют небольшие величины оптической плотности при длине волны 440 нм – 0,17 и 0,25 для осокового и пушицевого торфов соответственно, что позволяет с большой вероятностью говорить о малой доле полисопряженных структур в их молекулах.

На рис. 7 и 8 представлены полученные гель-хроматограммы ГК и ФПК верхового и низинного торфа соответственно.

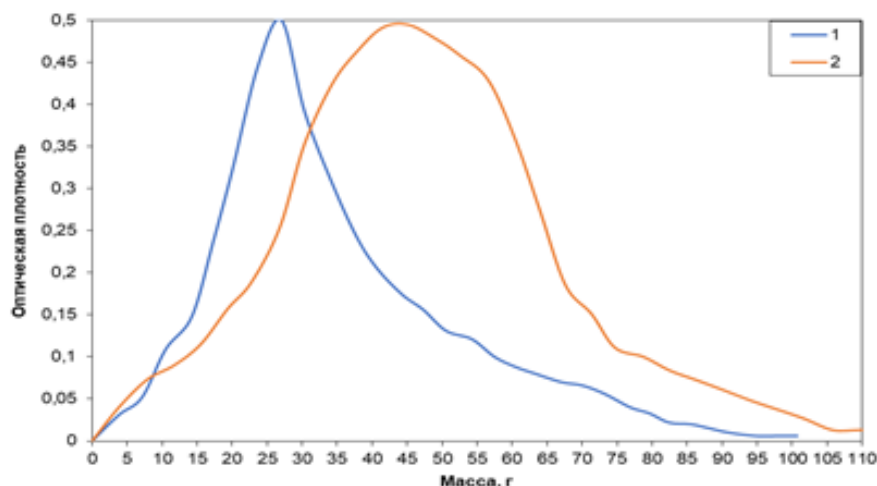


Рис. 7. Гель-хроматограмма полученных ФПК верхового торфа: 1 – ГК; 2 – ФПК

Fig. 7. Gel-chromatogram of the FLA of the upland peat: 1 – HA; 2 – FLA

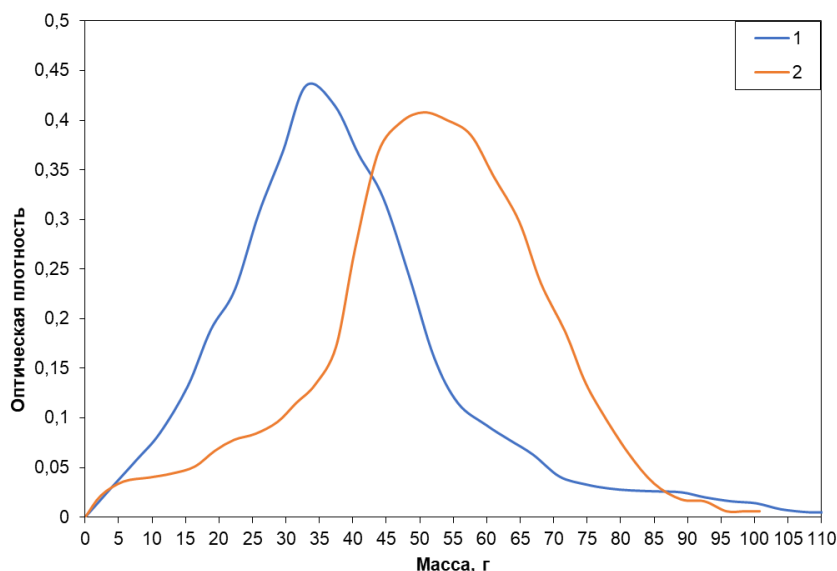


Рис. 8. Гель-хроматограмма полученных ФПК низинного торфа: 1 – ГК; 2 – ФПК

Fig. 8. Gel-chromatogram obtained by FLA of the lowland peat: 1 – HA; 2 – FLA

Данные, полученные в ходе расчетов с использованием гели-хроматограмм, приведены в табл. 4, из которой видно, что у всех исследованных объектов наблюдается значительное расхождение между среднemasовой и среднечисловой молекулярными массами. Это может являться результатом различной степени проведения окислительной деструкции исходного сырья. Sephadex G-50 позволяет эффективно разделять ФПК, но для оценки ГК применим в меньшей степени, что связано с более высокой молекулярной массой последних. На основании полученных данных можно заключить, что обработка перекисными соединениями торфяного сырья различного происхождения приводит к снижению молекулярной массы и получению окисленных алифатических фрагментов.

Таблица 4. Молекулярные массы и полидисперсность образцов

Table 4. Molecular weights and polydispersity of samples

Образец	M_w , Да	M_n , Да	n
ГК верхового торфа	2119	379,18	5,58
ФПК верхового торфа	779,99	174,63	4,46
ГК низинного торфа	1169,33	231,77	5,04
ФПК низинного торфа	1102,82	200,78	5,49

Примечание: M_w – среднemasовая молекулярная масса; M_n – среднечисловая молекулярная масса; n – полидисперсность образцов.

Заключение. Исследование элементного состава показало, что окислительная деструкция торфа приводит к уменьшению содержания углерода, увеличению водорода и обогащению препаратов кислородом. Так, отношение С : О для окисленных препаратов торфа падает по сравнению с исходными. Наиболее богаты кислородом водорастворимые продукты окислительной деструкции, отношение С : О для них значительно ниже, чем у исходных торфов, как и содержание в их составе углерода и водорода.

Данные ИК-спектроскопии исходных торфов (низинного и верхового) и продуктов их окисления пероксидом водорода свидетельствуют о том, что в процессе окислительной деструкции происходят разрушение полисопряженных ароматических структур и образование продуктов с высоким содержанием кислородсодержащих групп.

Деструкция молекул ГК пероксидом водорода приводит к снижению оптической плотности их растворов. Величина оптической плотности окисленных форм ГК при 440 нм по сравнению с таковой исходных ГК уменьшается в 4,1 раза для осокового торфа и в 3,8 раза для пушицевого.

Электронные спектры поглощения в видимой области ГК исходных торфов, водорастворимых продуктов окисления (ФПК) и ГК после окислительной деструкции осокового и пушицевого торфа показывают, что все кривые сохраняют характерные для ГК особенности спектров поглощения. В то же время значения величин оптических плотностей для ФПК значительно ниже, чем у исходных ГК во всей видимой области спектра. Оптические плотности ГК после выделения ФПК занимают среднее положение.

Водорастворимые продукты, полученные в результате окислительной деструкции торфов, имеют небольшие величины оптической плотности при длине волны 440 нм – 0,17 и 0,25 для осокового и пушицевого торфов соответственно, что свидетельствует о малой доле конденсированных полисопряженных структур в их молекулах.

Молекулярные массы экспериментальных препаратов составляют для ФПК верхового торфа 779,99 Да, низинного – 1102,82 Да, степень полидисперсности – 4,46 и 5,49 соответственно. Молекулярные массы исходных ГВ верхового торфа – 2119 Да, низинного – 1169,33 Да. Степень полидисперсности ГВ верхового торфа – 5,58, для низинного – 5,04. Процессы окислительной деструкции торфов приводят к уменьшению молекулярных масс макромолекул полученных ФК по сравнению с исходными ГК.

Список использованных источников

1. Волков, И. В. Реакции микроэлементов с гуминовыми кислотами как основа сорбционной дезактивации и очистки техногенных отходов : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.04 / Волков Илья Владимирович. – Екатеринбург, 2016. – 164 с.
2. Use of the ion exchange method for the determination of stability constants of trivalent metal complexes with humic and fulvic acids – part I: Eu^{3+} and Am^{3+} complexes in weakly acidic conditions / D. Wenming, Z. Hongxia, H. Meide, T. Zuyi // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2002. – Vol. 56. – P. 959–965.
3. Lanthanide-humic substances complexation. II. Calibration of humic ion-binding model V / J. E. Sonke // *Environmental Science & Technology*. – 2006. – Vol. 40. – P. 7481–7487.
4. Rare earth elements complexation with humic acid / O. Pourret, P. Davranche, G. Gruau, A. Dia // *Chemical Geology*. – 2007. – Vol. 243. – P. 128–141.
5. Усова, Т. Ю. Зарубежные технологии раздельного извлечения редкоземельных элементов / Т. Ю. Усова // *Редкие земли*. – 2018. – № 1 (9). – С. 137–148.
6. Получение фульвоподобных кислот методом окислительной деструкции торфа / В. М. Крайко, В. М. Дударчик, Е. В. Ануфриева, Е. Л. Дудникова // *Природопользование*. – 2025. – № 1. – С. 190–195.
7. Смычник, Т. П. Получение и свойства водорастворимых гуминовых препаратов из торфа : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07 / Смычник Татьяна Павловна. – Минск, 1992. – 175 с.
8. Лиштван И. И. Основные свойства торфа и методы его определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
9. Детерман, Г. Гель-хроматография / Г. Детерман. – М. : Мир, 1970. – 220 с.
10. Лукошко, Е. С. Диоксан-лигнин растений-торфообразователей / Е. С. Лукошко, Н. Н. Бамбалов, Л. А. Круковская // *Почвоведение*. – 1982. – № 2. – С. 40–44.

References

1. Volkov I. V. *Reakcii mikroelementov s guminovymi kislotami kak osnova sorbcionnoj dezaktivacii i ochistki tehnogennyh othodov*. Diss. kand. him. nauk [Reactions of trace elements with humic acids as a basis for sorption decontamination and purification of technological waste. PhD chem. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2016, 164 p. (in Russian)
2. Wenming D. Z., Hongxia H., Meide T., Zuyi T. Use of the ion exchange method for the determination of stability constants of trivalent metal complexes with humic and fulvic acids – part I: Eu^{3+} and Am^{3+} complexes in weakly acidic conditions. *Applied Radiation and Isotopes*, 2002, vol. 56, pp. 959–965.
3. Sonke J. E. Lanthanide-humic substances complexation. II. Calibration of humic ion-binding model V. *Environmental Science & Technology*, 2006, vol. 40, pp. 7481–7487.
4. Pourret O., Davranche P., Gruau G., Dia A. Rare earth elements complexation with humic acid. *Chemical Geology*, 2007, vol. 243, pp. 128–141.
5. Usova T. Yu. *Zarubezhnye tekhnologii razdel'nogo izvlecheniya redkozemel'nykh ehlementov* [Foreign technologies for separate extraction of rare earth elements]. *Redkie zemli = Rare Earths*, 2018, no. 1 (9), pp.137–148. (in Russian)
6. Krajko V. M., Dudarchik V. M., Anufrieva E. V., Dudnikova E. L. *Poluchenie ful'vopodobnykh kislot metodom oksislitel'noj destrucii torfa* [Obtaining fulvic acids by oxidative destruction of peat]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2025, no. 1, pp.190–195. (in Russian)
7. Smychnik T. P. *Poluchenie i svoystva vodorastvorimyykh guminovykh preparatov iz torfa*. Diss. kand. tekhn. nauk [Production and properties of water-soluble humic preparations from peat. PhD tech. sci. diss.]. Minsk, 1992, 175 p. (in Russian)
8. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ego opredeleniya* [The basic properties of peat and methods for determining it]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
9. Determan G. *Gel'-khromatografiya* [Gel chromatography]. Moscow, 1970, 220 p. (in Russian)
10. Lukoshko E. S., Bambalov N. N., Krukovskaya L. A., Smychnik T. P. *Dioksan-lignin rastenij-torfoobrazovatelej* [Dioxane-lignin of peat-forming plants]. *Pochvovedenie*, 1982, no. 2, pp. 40–44. (in Russian)

Информация об авторах

Крайко Валентина Михайловна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: vvkraiko@gmail.com

Дударчик Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dudwladm@gmail.com

Янута Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией физико-химической механики природных дисперсных систем, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanuta@tut.by

Ануфриева Елена Владимировна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

Дорошко Елизавета Юрьевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: elizaveta2002belstu@gmail.com

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

Information about the authors

Valiantsina M. Kraiko – 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: vvkraiko@gmail.com

Vladimir M. Dudarchik – 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: dudwladm@gmail.com

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Deputy Direktor, Head of Laboratory of physical and chemical mechanics of natural dispersed systems, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanuta@tut.by

Alena V. Anufrieva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

Elizaveta Yu. Dorozhko – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: elizaveta2002belstu@gmail.com

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