

УДК 630\*66.09

## ИЗВЛЕЧЕНИЕ СУБЕРИНОВЫХ КИСЛОТ ИЗ БЕРЕСТЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЧ-ПОЛЯ

© *А.В. Безумова\**, *С.И. Третьяков*, *Н.А. Кутакова*, *Е.Н. Коптелова*

*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002 (Россия),  
e-mail: maryann2608@mail.ru*

Настоящее исследование посвящено идентификации компонентов, входящих в состав суберина березовой коры, а также разработке метода интенсификации гидролиза бересты при выделении суберина.

Осуществлена идентификация суберина, полученного из технической бересты под воздействием электромагнитного поля СВЧ, методом ИК-спектроскопии (ИКС). При исследовании химического состава субериновых кислот методом газовой хроматомасс-спектрометрии (ГХ/МС) выявлены следующие доминирующие кислоты: докозандиовая (феллоеновая) и 22-гидроксидокозановая (феллоновая).

Установлено, что обработка бересты под воздействием СВЧ-поля позволяет в 2 раза сократить продолжительность процесса водно-щелочного гидролиза. Методом планированного эксперимента получено математическое описание процесса гидролиза бересты в условиях воздействия СВЧ-энергии; установлено влияние основных параметров и определены оптимальные условия выделения субериновых кислот. В качестве независимых переменных были выбраны: концентрация КОН, %; мощность, Вт; продолжительность, мин. Отмечено, что увеличение концентрации щелочи и продолжительности гидролиза приводит к положительному результату. Установлены оптимальные условия обработки для максимального выхода субериновых кислот: концентрация КОН – 5%, продолжительность – 15 мин, мощность – 600 Вт. Расход энергии составляет 37,5 кВт·ч/кг бересты.

*Ключевые слова:* березовая кора, береста, водно-щелочной гидролиз, суберин, СВЧ-поле.

### **Введение**

Суберин – нерастворимый компонент наружного слоя коры, концентрирующийся в клетках пробки, содержание которого зависит от породы дерева и составляет до 40% от а. с. б [1]. Он представляет собой высокомолекулярный полиэфир, при гидролизе которого образуются сложные смеси так называемых субериновых кислот. Получаемые смеси трудно разделить на индивидуальные компоненты, поэтому исследуются возможные направления их совместного практического использования.

По данным [2] основным компонентом смеси, полученной при омылении суберина березы (*Betula verrucosa*), является 9,10-эпокси-18-гидроксиоктадекановая кислота. В значительных количествах (не менее 10%) содержатся 22-гидроксидокозановая (феллоновая), 18-гидроксиоктадец-9-еновая и 9,10,18-триокси-

---

*Безумова Анна Викторовна* – магистрант,  
e-mail: maryann2608@mail.ru

*Третьяков Сергей Иванович* – кандидат технических наук, профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств,  
e-mail: s.tretyakov@narfu.ru

*Кутакова Наталья Алексеевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств,  
e-mail: n.kutakova@narfu.ru

*Коптелова Елена Николаевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий,  
e-mail: elen-koptelova@yandex.ru

октадекановая (флоиновая) кислоты. В настоящее время исследований, посвященных изучению химического состава суберина и разработке направлений его использования, недостаточно.

Известные способы выделения субериновых кислот основаны на использовании щелочного гидролиза. В работе [3] установлены оптимальные условия проведения традиционного процесса гидролиза бересты с максимальным выходом субериновых веществ: концентрация гидроксида натрия – 3%; температура 80–90 °С; продолжительность – 60 мин.

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

Гидролиз полиэфиров является одним из распространенных процессов, которые достаточно широко используются в различных областях промышленной и препаративной органической химии [4]. В связи с этим возникает необходимость в разработке эффективного способа гидролиза.

С целью интенсификации процессов химической переработки древесного сырья используются различные активирующие воздействия. В работах [5–7] показано, что одним из эффективных методов интенсификации экстракции древесного сырья является использование электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ). Главным достоинством данного метода является малая продолжительность температурного воздействия, а также возможность равномерного распределения температурного поля, что позволяет добиться практически полного извлечения целевых продуктов.

Воздействие СВЧ-поля на процесс гидролиза мало изучено. В работе [8] продемонстрирована возможность использования микроволнового излучения в процессе гидролиза целлюлозы. Установлено, что эффективность гидролиза целлюлозы под действием микроволнового излучения в 3–4 раза превышает эффективность гидролиза с классическим нагревом.

Цель настоящей работы заключается в исследовании различных методов выделения суберина из березовой коры и изучении его состава с разработкой способа интенсификации процесса гидролиза.

### **Экспериментальная часть**

В качестве образца растительного сырья послужила техническая березовая кора с Архангельского фанерного завода. Образцы коры перед использованием измельчали на роторно-ножевой мельнице режущего действия до частиц необходимого размера. Для эксперимента использовались образцы внешней части коры (бересты). Перед выделением субериновых кислот бересту предварительно экстрагировали спиртом [8] для извлечения экстрактивных веществ (ЭВ).

Остаток бересты после удаления ЭВ подвергали водно-щелочному гидролизу традиционным способом по методике, описанной в работе [3], при этом гидроксид натрия заменили на гидроксид калия. Это связано с тем, что после химической переработки бересты остается около 40% отходов в виде лигноуглеводного комплекса (целлолигнин), присутствие в котором биогенного элемента (калий) позволяет предложить его использование в качестве органико-минерального удобрения [10].

Бересту, освобожденную от ЭВ, загружали в колбу, заливали 3%-м водным раствором КОН в соотношении 1 : 15. Затем колбу устанавливали на песчаную баню и подсоединяли ее к обратному холодильнику. Гидролиз проводили в течение 60 мин от начала кипения. После завершения процесса гидролиза горячий раствор отфильтровывали через тканевый фильтр. Остаток (целлолигнин) сушили до постоянной массы. Фильтрат нейтрализовали 1 М раствором соляной кислоты до pH 4–6. Выделившийся осадок – субериновые кислоты (суберин) отфильтровывали, промывали водой до нейтральной реакции и сушили над прокаленным хлоридом кальция в вакууме при комнатной температуре до постоянной массы.

Аналогично выделяли суберин интенсивными методами: с одновременной обработкой ультразвуком (УЗ) или при воздействии СВЧ-поля. Для УЗ метода использовали УЗ ванну марки УМ-2, частота колебаний 25 кГц; температура 80 °С; продолжительность 60 мин. Гидролиз под воздействием СВЧ-поля проводили в СВЧ-камере, подробное описание которой представлено в работе [9] при расходе энергии 0,125 кВт·ч (мощность 300 Вт), продолжительность 25 мин. Данные условия выбраны по результатам проведенных ранее исследований, исходя из которых увеличение продолжительности более 25 мин при фиксированных значениях концентрации щелочи и расхода энергии не приводит к увеличению выхода суберина. Расход энергии выбран на уровне оптимального для первого этапа (выделение ЭВ) [9].

Идентификация полученного продукта проводилась с использованием методов ИКС и ГХ/МС. Исследование качественного состава проводилось на хроматомасс-спектрометре с использованием системы GC-MS QP2010Ultra (Shimadzu).

### **Обсуждение результатов**

*Гидролиз субериновых кислот. Идентификация полученных соединений.* С целью интенсификации процесса гидролиза бересты использована обработка ультразвуком (УЗ) и воздействие СВЧ-поля, для сравнения проведен гидролиз традиционным методом. Выход субериновых кислот по трем методам гидролиза приведен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение различных методов гидролиза

Метод	№ опыта	Продолжительность, мин	Выход субериновых кислот, % от а. с. б.
Традиционный (настаивание при температуре кипения)	1	60	44,5
	2		43,0
	Среднее		43,8
С обработкой ультразвуком ( $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	1	60	27,8
	2		23,3
	Среднее		25,6
Под воздействием СВЧ-поля (расход энергии 0,125 кВт·ч)		25	31,5

При сопоставлении методов гидролиза обнаружено, что традиционный вариант обеспечивает выход суберина в 1,7 раза больший, чем при использовании УЗ; воздействие СВЧ-энергии позволяет вдвое сократить продолжительность обработки при достаточно высоком выходе субериновых кислот.

Полученная нами смесь субериновых кислот представляет собой порошок шоколадного цвета с кислотным числом 122 мг КОН/г. По литературным источникам [11] кислотное число субериновых кислот близко к 160, следовательно, при выделении произошла нейтрализация кислот.

На ИК-спектре исследуемого вещества присутствуют все заместители, характерные для суберина (рис. 1).

Сильные полосы поглощения при 2915 и 2848  $\text{cm}^{-1}$  явно указывают на алифатический характер суберина. Интенсивная полоса поглощения при 3285  $\text{cm}^{-1}$  соответствует гидроксильным группам, связанным водородными связями. Полосы поглощения при 1701  $\text{cm}^{-1}$  относятся к колебаниям связей С=О в карбонильных и карбоксильных группах. Полосы при 1127–1023  $\text{cm}^{-1}$  соответствуют колебаниям С-О спиртовых групп, а в области 1256  $\text{cm}^{-1}$  – валентным колебаниям С-О карбоксильных групп. Полоса поглощения в области 1512  $\text{cm}^{-1}$  может говорить о присутствии в структуре бензольного кольца. Примерная структура суберина по литературным данным представлена на рисунке 2.

Для подробной идентификации полученных нами субериновых кислот проведены исследования методом ГХ/МС, при этом исследуемый образец предварительно метилировали. Результаты идентификации соединений, входящих в состав суберина, с использованием библиотек масс-спектров NIST-11 и Wiley-9 представлены в таблице 2. Степень совпадения большинства компонентов превышает 90%.

Из таблицы следует, что основу компонентного состава суберина из березовой коры составляют двух- и одноосновные жирные кислоты, гидроксикислоты, феруловая кислота; в следовых количествах соединения с более низкой молекулярной массой (кислоты, фенолы и циклические соединения). Преобладают докозандиовая (феллогеновая) кислота и 22-гидроксидокозановая (феллоновая) кислота.

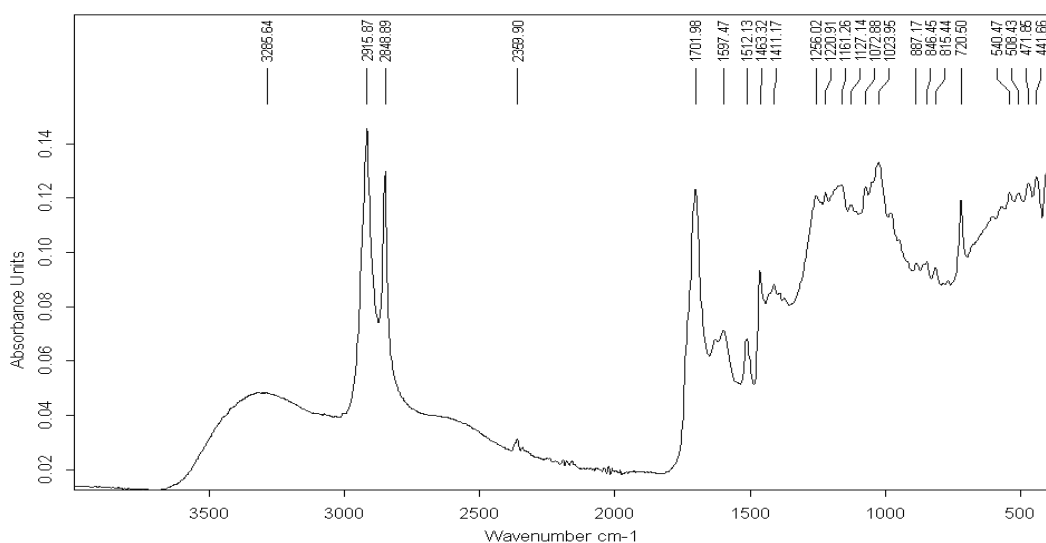


Рис. 1. ИК-спектр образца суберина, полученного под воздействием СВЧ-поля

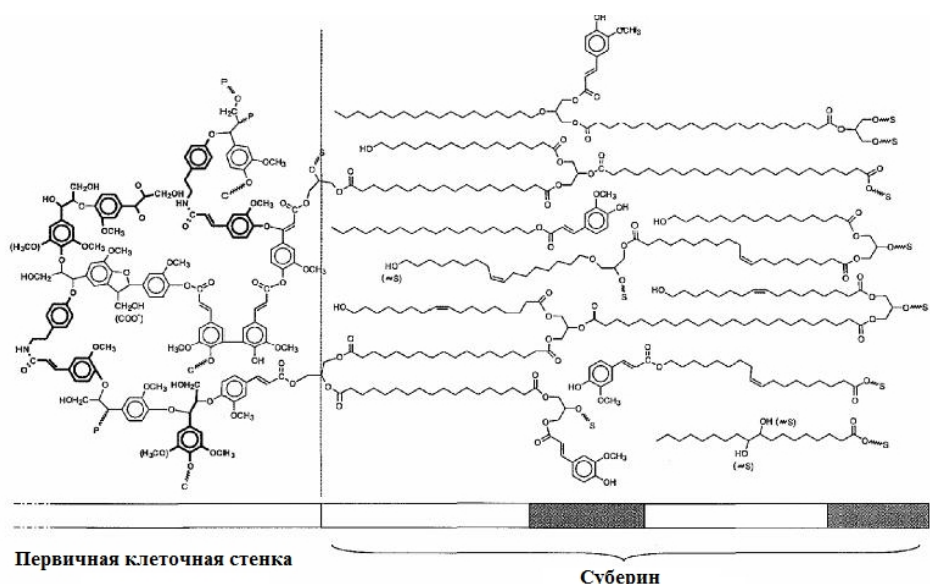


Рис. 2. Примерная структура суберина березовой коры [12]

Таблица 2. Состав смеси субериновых кислот по методу ГХ/МС

№ пика	Время выхода, мин	Площадь, %	Степень совпадения, %	Название
1	15–30	–	–	Соединения (кислоты, фенолы и циклические соединения) с C <sub>8</sub> -C <sub>11</sub> углеродным скелетом
2	31,473	0,57	97	Феруловая кислота, метиловый эфир
3	31,990	0,09	93	17-Октадеценовая кислота, метиловый эфир
4	32,309	0,05	96	9,12-Октадекадиеновая кислота, метиловый эфир (Линолевая кислота)
5	34,913	0,20	96	Оксациклогептадец-8-ен-2-он
6	35,590	0,14	96	18-Метилнонадекановая кислота, метиловый эфир
7	35,665	0,09	92	16-гидрокси-Гексадекановая кислота, метиловый эфир
8	36,308	1,44	95	Гексадекандиовая кислота, диметиловый эфир (Тапсиновая кислота)
9	38,931	0,65	96	Докозановая кислота, метиловый эфир (Бегеновая кислота)
10	39,124	5,66	88	Z,Z-3,13-Октадекадиен-1-ол
11	39,635	11,04	81	12-оксо-9-додеценовая кислота, метиловый эфир
12	39,881	0,37	84	цис-13-Октадеценал
13	40,535	0,36	90	10,13,16-Докозатриеновая кислота, метиловый эфир
14	40,648	1,89	75	9,10-дигидрокси-Октадекановая кислота, метиловый эфир
15	40,821	0,66	91	Эруковая кислота
17	42,985	6,89	91	Эйкозандиовая кислота, диметиловый эфир
18	43,964	5,23	89	9,10-эпокси-Октадекановая кислота, метиловый эфир
19	44,355	2,98	79	1,10-Циклоэйкозандион
20	44,503	0,63	83	Олеиновая кислота, метиловый эфир
21	44,904	0,51	78	9-оксо-Гептадекандиовая кислота, диметиловый эфир
22	46,215	0,34	93	Октадекановая кислота, метиловый эфир (Стеариновая кислота)
<b>23</b>	<b>47,066</b>	<b>26,30</b>	<b>94</b>	<b>22-гидрокси-Докозановая (феллоновая) кислота, диметиловый эфир</b>
<b>24</b>	<b>47,800</b>	<b>28,73</b>	<b>93</b>	<b>Докозандиовая кислота, диметиловый эфир (Феллогеновая кислота)</b>
25	54,945	0,44	90	Триаконтандиовая кислота, диметиловый эфир

Примечание: Жирным шрифтом выделены доминирующие компоненты.

*Математическое описание процесса гидролиза при воздействии СВЧ-поля.* Для получения математического описания процесса гидролиза бересты при воздействии СВЧ-поля в зависимости от выбранных переменных и определения оптимальных параметров выделения субериновых кислот нами был поставлен и реализован планированный эксперимент с построением ротатабельного композиционного равномерного плана второго порядка [13]. В качестве сырья использовалась фракция бересты 2–3 мм, освобожденная от ЭВ. В качестве независимых переменных были выбраны:  $x_1$  – концентрация щелочи (KOH), %;  $x_2$  – мощность, Вт;  $x_3$  – продолжительность, мин. Всего в процессе реализации эксперимента проведено 20 опытов, 6 из них в центре плана. В качестве выходного параметра (Y) послужил выход субериновых кислот, % от массы а. с. б. Условия планированного эксперимента и выходные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. Условия планированного эксперимента и его результаты

№ опыта	Концентрация КОН ( $x_1$ ), %	Мощность ( $x_2$ ), Вт	Продолжительность ( $x_3$ ), мин	Выход субериновых кислот (Y), %
1	3	300	10	18,9
2	7	300	10	44,7
3	3	600	10	22,3
4	7	600	10	43,0
5	3	300	20	27,6
6	7	300	20	47,1
7	3	600	20	38,4
8	7	600	20	45,9
9	1,64	450	15	17,5
10	8,36	450	15	49,0
11	5	200	15	36,2
12	5	700	15	47,6
13	5	450	6,6	24,5
14	5	450	23,4	44,0
15	5	450	15	37,9
16	5	450	15	41,5
17	5	450	15	38,6
18	5	450	15	39,3
19	5	450	15	33,0
20	5	450	15	35,2

Примечание. Опыты с 1 по 8 – основные; с 9 по 14 – звездные точки; с 15 по 20 – центр плана («0»).

В опытах отмечено варьирование выхода от 18,9 до 49,0% от а. с. б. Максимальный выход (49%) достигнут при увеличении концентрации щелочи до 8,4%. Это значительно превышает литературные данные и может быть объяснено тем, что при такой высокой концентрации щелочи происходит полный гидролиз бересты, и суберин осаждается совместно с лигнином.

В результате математической обработки [13] экспериментальных данных получено следующее уравнение регрессии:

$$Y = 37,55 + 9,26x_1 + 2,33x_2 + 4,60x_3 - 2,14x_1x_2 - 2,44x_1x_3 + 0,99x_2x_3 - 1,61x_1^2 + 1,45x_2^2 - 1,25x_3^2 \quad (1)$$

После исключения из данного уравнения эффектов с незначимыми коэффициентами по критерию Стьюдента получили уравнение, используемое нами для оценки адекватности модели:

$$Y = 37,55 + 9,26x_1 + 2,33x_2 + 4,60x_3 \quad (2)$$

Проверку полученного уравнения на адекватность проводили с помощью критерия Фишера. Для данного уравнения рассчитанное значение критерия Фишера  $F = 2,37$  меньше табличного, равного 4,74, для уровня значимости 0,05 (95%) и числа степеней свободы  $f_1 = 11$ ,  $f_2 = 5$ . Таким образом, можно считать, что полученное эмпирическое уравнение достаточно верно описывает опытные данные. Однако можно предположить, что некоторые из коэффициентов уравнения, не являясь значимыми, правильно прогнозируют изменения в условиях опытов. Для проверки данного предположения произвольно включаем в полученную модель какой-либо коэффициент и повторяем расчет. В нашем случае значения всех коэффициентов являются сопоставимыми. При вводе этих коэффициентов значение критерия Фишера уменьшилось с 2,37 до 0,722, что значительно меньше табличного. Значение коэффициента при  $x_2x_3$  незначительно влияет на изменение критерия, а значение критерия при  $x_3^2$  приводит к тому, что оптимальное значение первого фактора уходит далеко за область исследования, поэтому, данные коэффициенты необходимо исключить из уравнения. Уравнение регрессии с введенными коэффициентами выглядит следующим образом:

$$Y = 37,55 + 9,26x_1 + 2,33x_2 + 4,60x_3 - 2,14x_1x_2 - 2,44x_1x_3 - 1,61x_1^2 + 1,45x_2^2 \quad (3)$$

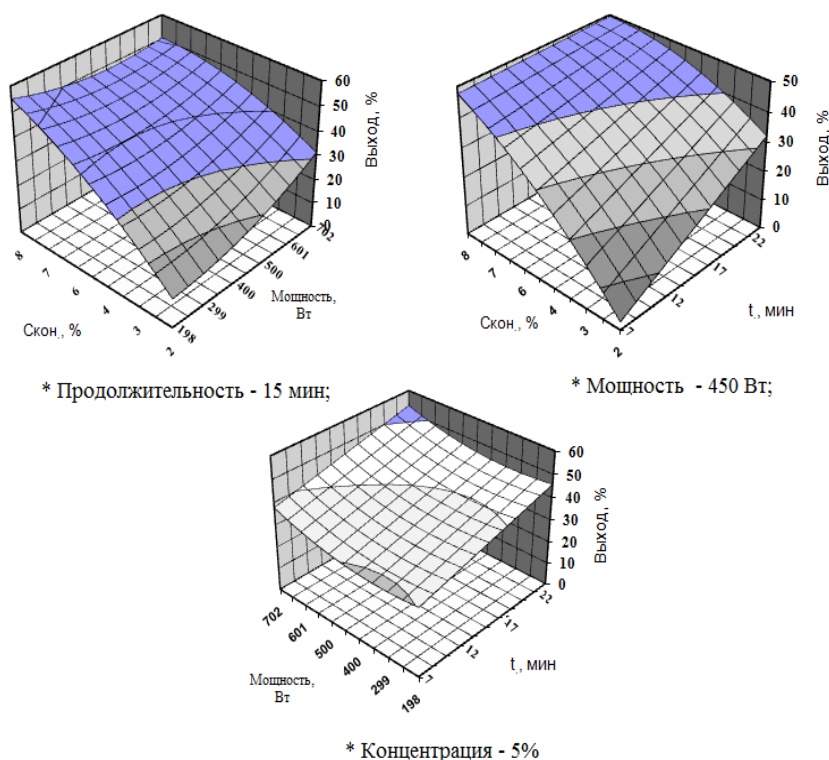
Проанализировав полученное уравнение регрессии, определили оптимальные значения факторов в кодированных и натуральных значениях (табл. 4.).

По уравнению регрессии построены поверхности отклика для выхода субериновых кислот (рис. 3). При этом один из параметров зафиксирован на значении, соответствующем центру плана. При увеличении концентрации КОН выход субериновых кислот существенно возрастает. При увеличении мощности от 200

до 450 Вт выход субериновых кислот практически не изменяется, однако увеличение мощности свыше 450 Вт, приводит к увеличению выхода. С увеличением продолжительности обработки выход субериновых кислот так же возрастает.

Таблица 4. Оптимальные значения факторов

Фактор	Обозначение	Кодированное значение	Натуральное значение
Концентрация, %	$X_1$	1,89	9
Мощность, Вт	$X_2$	0,62	543
Продолжительность, мин	$X_3$	0,76	19



\* – фактор, зафиксированный на одном уровне

Рис. 3. Поверхности отклика выхода субериновых кислот в зависимости от натуральных значений факторов: *a* – концентрация щелочи и мощность; *b* – концентрация щелочи и продолжительность; *в* – мощность и продолжительность

В результате планированного эксперимента основываясь на данных полученных в результате анализа уравнения регрессии, а так же в соответствии с характером поверхностей отклика определены оптимальные условия СВЧ-гидролиза для достижения максимального выхода субериновых кислот: концентрация КОН – 5%; мощность – 600 Вт; продолжительность гидролиза – 15 мин. Расход энергии в лабораторных условиях составляет 0,150 кВт·ч или 37,5 кВт·ч/кг проэкстрагированной бересты.

### Выводы

1. Исследованы различные методы выделения субериновых кислот из отходов окорки древесины, основанные на реакциях гидролиза полиэфиров. Установлено, что традиционный вариант обеспечивает выход суберина в 1,7 раз больший, чем при использовании ультразвука; применение СВЧ-воздействия позволяет вдвое сократить продолжительность обработки при достаточно высоком выходе субериновых кислот. Воздействие СВЧ-энергии предложено в качестве метода интенсификации процесса гидролиза.

2. Идентификация субериновых кислот, выделенных при воздействии СВЧ-энергии, осуществлена методом ИК-спектроскопии и газовой хроматомасс-спектрометрии. В составе суберина обнаружено 25 компонентов, преобладают докозандиовая (феллогеновая) кислота и 22-гидроксидокозановая (феллоновая) кислота.

3. Исследование влияния параметров гидролиза в условиях СВЧ-поля на выход суберина проведено методом планированного эксперимента. Получено уравнение регрессии, адекватное эксперименту, согласно которому факторы концентрации щелочи и продолжительности являются определяющими. Установлены оптимальные условия обработки для максимального выхода субериновых кислот: концентрация КОН – 5%, продолжительность – 15 мин, мощность – 600 Вт. Расход энергии составляет 37,5 кВт·ч/кг проэкстрагированной бересты.

*Работы с применением ИК-спектроскопии и газовой хромато-масс-спектрометрии выполнены с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» (САФУ).*

### **Список литературы**

1. Lopes M.H., Gil A.M., Silvestre A.J.D., Neto C.P. Composition of Suberin Extracted upon Gradual Alkaline Methanolysis of *Quercus suber* L. Cork. // J. Agric. Food Chem. 2000. Vol. 48 (2). Pp. 383–391.
2. Ekman R. The suberin monomers and triterpenoids from the outer bark of *Belula verrucosa* Ehth. // *Holzforschung*. 1983. Bd. 37. N4. S. 205–211.
3. Судакова И.Г., Кузнецов Б.Н., Гарынцева Н.В. Изучение процесса выделения субериновых веществ из бересты березовой коры // *Химия растительного сырья*. 2008. №1. С. 41–44.
4. Харичкин А.С. Кинетические закономерности основного гидролиза полиэтилентерефталата: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Москва, 2011. 16 с.
5. Коптелова Е.Н., Кузнецова Л.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И. Интенсификация процесса выделения бетулина из бересты с использованием СВЧ-поля // *Лесной журнал*. 2013. №5. С. 193–201.
6. Бадмацзыренов Б.В. Разработка оборудования и процесса экстракции кедрового масла в электромагнитном поле СВЧ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Улан-Удэ, 2004. 147 с.
7. Патент № 2280040 (РФ). Способ получения арабиногалактана / С.А. Кузнецова, Б.Н. Кузнецов, Г.П. Скворцова / 20.07.2006.
8. Кисуринов И.В., Арапов К.А., Гушин П.А., Иванов Е.В., Винокуров В.А. Перспективы использования микроволнового излучения в процессе переработки целлюлозосодержащего сырья // *Башкирский химический журнал*. 2010. №3. С. 167–170.
9. Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И. Извлечение экстрактивных веществ и бетулина из бересты при воздействии СВЧ-поля // *Химия растительного сырья*. 2013. №4. С. 159–164.
10. Кулагин Е.П., Кислицын А.Н., Рябков В.В. Использование отходов химической переработки коры в качестве удобрений // *Хвойные бореальной зоны*. 2003. Вып. 1. С. 128–129.
11. Кислицын А.Н. Экстрактивные вещества бересты: выделение, состав, свойства, применение // *Химия древесины*. 1994. №3. С. 3–28.
12. Bernards M.A. Demystifying suberin // *Canadian Journal of Botany*. 2002. Vol. 80. Pp. 227–240.
13. Богданович Н.И., Кузнецова Л.Н., Третьяков С.И., Жабин В.И. Планирование эксперимента в примерах и расчетах: учебное пособие. Архангельск, 2010. 126 с.

*Поступило в редакцию 24 июня 2017 г.*

*После переработки 14 ноября 2017 г.*

*Bezumova A.V.\**, *Tretyakov S.I.*, *Kutakova N.A.*, *Koptelova E.N.* EXTRACTING SUBERIN ACIDS FROM BIRCH BARK WHEN EXPOSED TO A MICROWAVE FIELD

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina Embankment, 17, Arkhangelsk, 163002 (Russia), e-mail: maryann2608@mail.ru*

The present study focuses on the identification of the components included in the suberin of birch bark, as well as the development of the method of intensification of hydrolysis of birch bark in the allocation of suberin.

Identification suberin derived from the technical of birch bark in conditions the microwave field was conducted the method of IR-spectroscopy (IRS). In the study of the chemical composition of suberin acids using gas chromatomass spectrometry (GC/MS) revealed the following dominant acid: docosanedioic (phellogenic) acid and 22-hydroxydocosanoic (phellonic) acid.

It is established that processing of birch bark in a microwave field allows 2 times to reduce the duration of process of water-alkaline hydrolysis. By the planned experiment, mathematical description of the process of hydrolysis of birch bark in conditions of microwave radiation was obtained; the influence of the main parameters was installed and the optimal conditions for suberin acids secretion were determined. Concentration of alkali, %; power, W; duration, min were selected. How were the independent variables. It is noted that the increase in alkali concentration and duration of hydrolysis leads to a positive result. On the basis of economic considerations, the optimum concentration of KOH for microwave hydrolysis is 5%, duration – 15 min, power – 600 W. The power consumption is 37,5 kWh/kg birch bark.

*Keywords:* birch bark, water-alkaline hydrolysis, suberin, a microwave field.

### References

1. Lopes M.H., Gil A.M., Silvestre A.J.D., Neto C.P. *J. Agric. Food Chem.*, 2000, vol. 48 (2), pp. 383–391.
2. Ekman R. *Holzforchung*, 1983, vol. 37, no. 4, pp. 205–211.
3. Sudakova I.G., Kuznetsov B.N., Garyntseva N.V. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2008, no. 1, pp. 41–44. (in Russ.).
4. Kharichkin A.S. *Kineticheskie zakonomernosti osnovnogo gidroliza polietilentereftalata: avtoref. dis. ... kand. khim. nauk.* [Kinetic regularities of the basic hydrolysis of polyethylene terephthalate: author's abstract. dis. ... cand. chem. sciences.]. Moskva, 2011, 16 p. (in Russ.).
5. Koptelova E.N., Kuznetsova L.N., Kutakova N.A., Tretyakov S.I. *Lesnoi zhurnal*, 2013, no. 5, pp. 193–201. (in Russ.).
6. Badmatsyrenov B.V. *Razrabotka oborudovaniia i protsessa ekstraktsii kedrovogo masla v elektromagnitnom pole SVCh: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Development of equipment and process of extraction of cedar oil in the electromagnetic field of microwave: author's abstract. dis. ... cand. tech. science]. Ulan-Ude, 2004, 147 p. (in Russ.).
7. Patent 2280040 (RU). 20.07.2006. (in Russ.).
8. Kisurin I.V., Arapov K.A., Gushchin P.A., Ivanov E.V., Vinokurov V.A. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal*, 2010, no. 3, pp. 167–170. (in Russ.).
9. Koptelova E.N., Kutakova N.A., Tretyakov S.I. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2013, no. 4, pp. 159–164. (in Russ.).
10. Kulagin E.P., Kislitsyn A.N., Riabkov V.V. *Khvoinye boreal'noi zony*, 2003, no. 1, pp. 128–129. (in Russ.).
11. Kislitsyn A.N. *Khimiia drevesiny*, 1994, no. 3, pp. 3–28. (in Russ.).
12. Bernards M.A. *Canadian Journal of Botany*, 2002, vol. 80, pp. 227–240.
13. Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N., Tretyakov S.I., Zhabin V.I. *Planirovanie eksperimenta v primerakh i raschetakh: uchebnoe posobie.* [Planning an experiment in examples and calculations: a tutorial]. Arkhangel'sk, 2010, 126 p. (in Russ.).

Received June 24, 2017

Revised November 14, 2017

---

\* Corresponding author.