

УДК 630*813.2+630*815

ВОЗРАСТНАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ЭФИРНОГО МАСЛА В КОРЕ *ABIES SIBIRICA*. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ

© С.В. Ушанов, В.М. Ушанова*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. имени Газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, (Россия), e-mail: ushanova_vm@mail.ru

Оценена изменчивость содержания эфирного масла в коре *Abies sibirica* восточной и западной части лесостепи Красноярского края в восьми возрастных группах. Получена адекватная экспериментальным данным модель возрастной динамики изменения содержания эфирного масла в коре *A. sibirica*. С увеличением возраста пихты содержание эфирного масла в коре увеличивается от $1.4 \pm 0.1\%$ от а.с.с. в 20–30-летнем возрасте до $2.8 \pm 0.2\%$ от а.с.с. в возрасте 70–80 лет с дальнейшим уменьшением до $0.4 \pm 0.1\%$ от а.с.с. у перестойных деревьев. Представлены результаты параметрической идентификации модели для пихты, произрастающей в лесостепи Красноярского края. Методом имитационного моделирования по результатам 50000 вычислительных экспериментов оценена статистика изменения коэффициентов модели и 95% границы прогнозных значений содержания эфирного масла в коре. Предложена трехкомпарментная модель, объясняющая возрастные особенности динамики содержания эфирного масла в древесной зелени и коре пихты сибирской. Полученное решение компарментной модели позволяет связать ее параметры с коэффициентами моделей изменения содержания эфирного масла в древесной зелени и коре пихты, полученными обработкой экспериментальных данных.

Ключевые слова: пихта сибирская, возраст, кора, эфирное масло, математическое моделирование, статистические испытания.

Введение

Пихта сибирская (*Abies sibirica* Ldb) – одна из главных лесообразующих пород Сибири. Ее ареал охватывает территорию около 3.8 млн км². На территории Красноярского края находится 67% пихтарников. Запасы коры – 129.7 млн м³ [1, 2]. Объем, занимаемый корой, составляет 11–19% в зависимости от условий произрастания, индивидуальной изменчивости и возраста дерева [2–4].

Содержащийся в древесной зелени и коре пихты сибирской комплекс веществ обладает высокой биологической активностью (витамины, ферменты, белки, жиры, эфирные и другие вещества) [2–9]. Хвойные масла в основном получают отгонкой острым водяным паром из древесной зелени и коры, которые являются значительной частью лесосечных отходов [10–13].

Продолжительность отгонки, степень измельчения сырья, температура и скорость подачи – основные технологические факторы, влияющие на его выход. Определение оптимальных условий его выделения рассмотрено в [2, 3, 7]. Продукты, получаемые из коры пихты, применяются в сельском хозяйстве, косметической, пищевой промышленности, медицине [2, 8–11, 13–18]. Стоимостный объем продаж эфирных масел в России в 2014 г. составил 2.3 млрд руб. [18].

Качественный и количественный состав эфирного масла из коры хвойных зависит от географического расположения [18–20], суточной [4, 18–20] и сезонной [4, 11, 18–20] составляющих годового цикла, продолжительности хранения растительного сырья [10, 11, 13, 18].

Ушанов Сергей Викторович – профессор кафедры высшей математики, кандидат технических наук,
e-mail: ushanov_sv@mail.ru

Ушанова Валентина Михайловна – профессор кафедры промышленной экологии, процессов и аппаратов химических производств, доктор технических наук,
e-mail: ushanova_vm@mail.ru

Одним из основных факторов, определяющих содержание эфирного масла в древесной зелени и коре пихты, является возраст деревьев [4, 18–22].

* Автор, с которым следует вести переписку.

Учет возрастной, сезонной и суточной составляющих содержания эфирного масла в коре пихты и времени хранения сырья позволяют определить технологический регламент получения продуктов, химический состав которых соответствует сертификационным требованиям [2, 18].

Цель работы – изучение влияния возраста на содержание эфирного масла в коре *A. sibirica* восточной и западной части лесостепи Красноярского края и разработка адекватной экспериментальным данным математической модели.

Экспериментальная часть

Образцы коры отбирались с десяти здоровых (без признаков ослабления) деревьев, относящихся к первой категории санитарного состояния древостоев, соответствующих по жердякам, средневозрастным, припевающим, спелым и перестойным древостоям (табл. 1) западной (около 80 км от Красноярска) и восточной (70 км) частей лесостепи Красноярского края. Отобранные пробы измельчали, усредняли и определяли влажность.

Эфирное масло из коры отгоняли в аппаратах Клевенджера в четырехкратной повторности. Его содержание находили волнометрическим способом [23]. Выход масла рассчитывали на абсолютно сухую массу сырья (а.с.с.).

Обработка экспериментальных данных проводилась стандартными методами математической статистики [24]. Оценки коэффициентов модели получены нелинейным методом наименьших квадратов [25]. Оценки доверительных интервалов изменения коэффициентов модели и прогнозных значений содержания эфирного масла в зависимости от возраста дерева получены методом статистических испытаний по результатам выполнения 50000 компьютерных экспериментов [26–28].

Обсуждение результатов

Известно, что с возрастом в ассимиляционном аппарате хвойных древесных растений протекают многочисленные превращения, существенно изменяющие соотношения компонентов [29–31]. С увеличением возраста *A. sibirica* содержание эфирного масла в коре увеличивается от $1.40 \pm 0.10\%$ от а.с.с. в 20–30-летнем возрасте до $2.79 \pm 0.16\%$ от а.с.с. в возрасте 70–80 лет с дальнейшим снижением до $0.42 \pm 0.07\%$ от а.с.с. у перестойных деревьев (табл. 1).

Основной причиной снижения содержания эфирного масла при старении является изменение условий протекания метаболизма в процессе роста растений. Такая закономерность в процессе онтогенеза свойственна и для древесной зелени *A. sibirica*, произрастающей в лесостепи Красноярского края и Лесосибирском регионе [21], кедра сибирского и сосны обыкновенной [2, 13]. Аналогичность характера возрастной динамики содержания эфирного масла свидетельствует о наличии общих закономерностей метаболизма хвойных древесных растений. Несмотря на индивидуальную изменчивость, имеется тесная корреляционная связь ($R = 0.98$) содержания эфирного масла в древесной зелени и коре пихты одного возраста [22].

Онтогенетическое развитие существенно сказывается на динамике всех компонентов растения, прежде всего ассимиляционного аппарата. Это относится и к сумме содержащихся в коре летучих терпеноидных соединений – эфирному маслу. Результаты определения его содержания в коре пихты исследованных возрастных групп приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные содержания пихтового масла в коре в зависимости от возраста *A. sibirica*

Возраст древостоя, лет		Содержание эфирного масла в коре, % от а.с.с.		
Возраст	Средний возраст, t	среднее значение, X_c	дисперсия эксперимента, S^2	стандартная ошибка среднего, S_c
20–30	25	1.40	0.041	0.10
35–45	40	1.92	0.143	0.19
50–60	55	2.50	0.078	0.14
70–80	75	2.79	0.088	0.15
120–130	125	1.74	0.070	0.13
140–160	150	1.11	0.025	0.08
170–190	180	0.84	0.026	0.08
200–230	215	0.42	0.020	0.07

На рисунке 1 представлены эмпирическая и теоретическая (нормальная) интегральные функции распределения ошибок экспериментов. Гипотеза нормальности эмпирического распределения проверялась по критериям согласия Фроцини, омега-квадрат, Колмогорова [24] при 5% уровне значимости. Статистика критериев согласия в условиях сложной гипотезы определения параметров распределения по эмпирическим данным оценивалась по результатам 150000 статистических испытаний [26–28].

Результаты расчетов представлены в таблице 2 и на рисунке 1. Гипотеза нормальности распределения ошибок модели не отвергается по всем трем критериям согласия.

Однородность дисперсий экспериментов подтверждена применением критерия Кохрена: при 5% уровне значимости расчетное значение критерия (0,292) меньше критического значения (0,403). Точность экспериментов оценивается дисперсией воспроизводимости $D_{вс} = 0.061$ с числом степеней свободы $f_{вс} = 24$ и ошибкой воспроизводимости $S_{вс} = 0.248$.

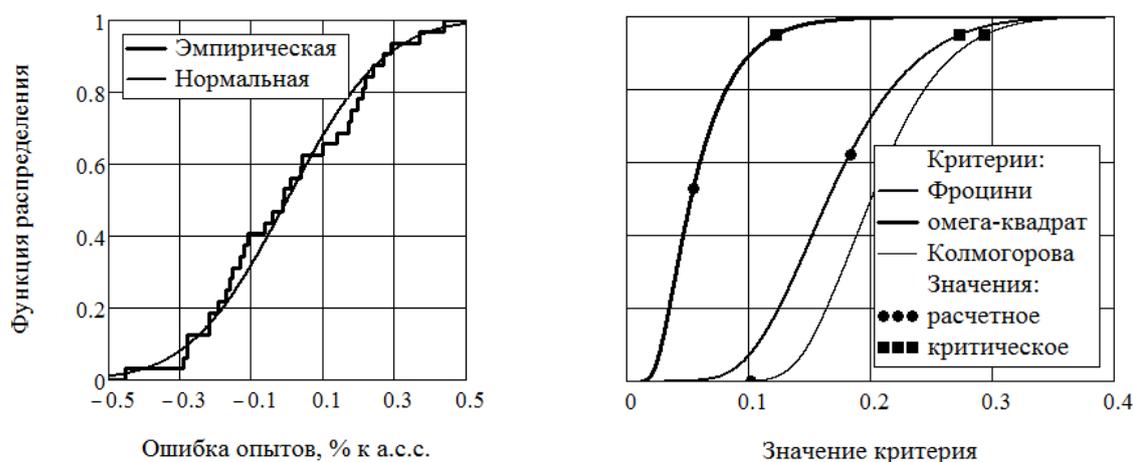


Рис. 1. Интегральная функция распределения ошибок экспериментов и результатов проверки гипотезы нормальности их распределения

Таблица 2. Результаты проверки гипотезы нормальности распределения ошибок опытов

Критерий согласия	Расчетное значение		Критическое значение		Результат проверки гипотезы
	$F_{рас}$	$\alpha_{рас}$	$F_{кр}$	$\alpha_{кр}$	
Фроцини	0.184	0.378	0.274	0.05	принимается
омега-квадрат	0.055	0.470	0.122	0.05	принимается
Колмогорова	0.102	0.294	0.998	0.05	принимается

Примечание. $F_{рас}$, $F_{кр}$ – расчетное и критическое значения; $\alpha_{рас}$, $\alpha_{кр}$ – уровни значимости для $F_{рас}$, $F_{кр}$

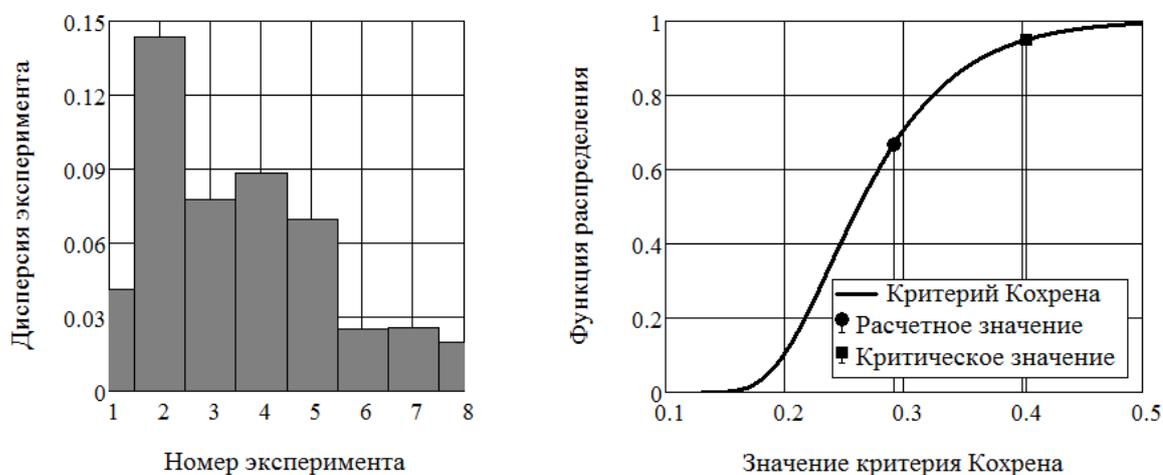


Рис. 2. Дисперсии экспериментов и результатов проверки гипотезы их однородности по критерию Кохрена

Для описания возрастной динамики содержания эфирного масла в коре принята модификация предложенной в [21] математической модели, соответствующая обыкновенному линейному дифференциальному уравнению третьего порядка:

$$Y'''(t) + 3 \times b \times Y''(t) + 3 \times b^2 \times Y'(t) = b^3 \times (A - Y(t)), \quad (1)$$

при начальных условиях $Y(0) = y_0$, $Y'(0) = y_1$, $Y''(0) = y_2$.

Решение дифференциального уравнения (1):

$$Y(t) = a_0 + (a_1 + a_2 \times t + a_3 \times t^2) \times \exp(-b \times t), \quad (2)$$

где $Y(t)$ – содержание пихтового масла, % к а.с.с.; t – возраст пихты, год; a , b – коэффициенты модели, $a_0 = A = \lim_{t \rightarrow \infty} Y(t)$; $a_1 = y_0 - A$; $a_2 = y_1 + a_1 \times b$; $a_3 = (y_2 + 2 \times a_2 \times b - a_1 \times b^2) / 2$; $y_0 = a_1 + a_0$; $y_1 = a_2 - a_1 \times b$; $y_2 = 2 \times a_3 - 2 \times a_2 \times b + a_1 \times b^2$.

Введя безразмерную переменную $\tau = \frac{t}{T}$, где $T = \frac{1}{b}$ – постоянная времени, получим:

$$Y'''(\tau) + 3 \times Y''(\tau) + 3 \times Y'(\tau) = (A - Y(\tau)), \quad (3)$$

решение которого определяется выражением

$$Y(\tau) = a_0 + (a_1 + a_2 \times \tau + a_3 \times \tau^2) \times \exp(-\tau). \quad (4)$$

Методом наименьших квадратов (МНК) [25] получены оценки коэффициентов модели (1)–(2), а оценки стандартных ошибок коэффициентов и прогнозных значений содержания эфирного масла в зависимости от возраста дерева получены методом статистических испытаний по результатам 50000 вычислительных экспериментов [26, 27].

Из требований адекватности модели экспериментальным данным и значимости отличия от нуля ее коэффициентов получены две альтернативные модели.

Модель 1: $A = a_0 = 0.183 \pm 0.071$; $a_1 = 0$; $a_2 = 0$; $a_3 = 0.0039 \pm 0.0003$; $b = 0.030 \pm 0.001$; $T = 33.94 \pm 1.11$; $y_0 = 0.183 \pm 0.071$; $y_1 = 0$; $y_2 = 0.0078 \pm 0.0006$; $\tau_{\max} = 2 \times T = 67.8 \pm 2.2$; $Y_{\max} = 2.6 \pm 0.2$.

Стандартная ошибка модели $S_m = 0.152$ % к а.с.с.; коэффициент детерминации модели $R^2 = 0,975$.

Модель 2: $A = 0$; $a_1 = 0.296 \pm 0.040$; $a_2 = 0$; $a_3 = 0.0039 \pm 0.0002$; $b = 0.028 \pm 0.001$; $T = 35.35 \pm 0.85$; $y_0 = 0.296 \pm 0.040$; $y_1 = 0$; $y_2 = 0.0079 \pm 0.0005$; $\tau_{\max} = T + \sqrt{T^2 - \frac{a_1}{a_3}} = 70.7 \pm 1.7$; $Y_{\max} = 2.64 \pm 0.14$.

Стандартная ошибка модели $S_m = 0.128$ % к а.с.с.; коэффициент детерминации модели $R^2 = 0,982$.

Гипотеза адекватности моделей экспериментальным данным не отвергается при 5%-ном уровне значимости (расчетное значение критерия Фишера для модели 1 (1.5) и модели 2 (1.1) меньше критического значения (2.6)).

Максимальное содержание эфирного масла в коре (2.6 ± 0.3 % к а.с.с.) соответствует *A. sibirica* 70-летнего возраста.

На рисунке 3 представлены результаты экспериментов, прогнозны МНК-оценки и 95% границы доверительных интервалов изменения средних и фактических значений содержания эфирного масла в коре пихты, произрастающей в восточной и западной части лесостепи Красноярского края в процессе онтогенеза.

Учитывая, что синтез терпеноидов происходит в хлоропластах [32–34]; содержание в коре пихты хлорофиллов в 6 раз, а каротиноидов в 10 раз меньше, чем в древесной зелени [3], содержание эфирного масла в коре только в 2 раза меньше, чем в древесной зелени [11], представляется обоснованным предположение [11] о связи содержания масла в коре с его перетеканием из ассимиляционного аппарата. Такое представление объясняет наблюдаемую корреляционную связь накопления масла в древесной зелени и коре индивидуальных деревьев [22]. Перемещению могут быть подвержены терпеноиды, находящиеся с другими компонентами в свободном, несвязанном состоянии [20].

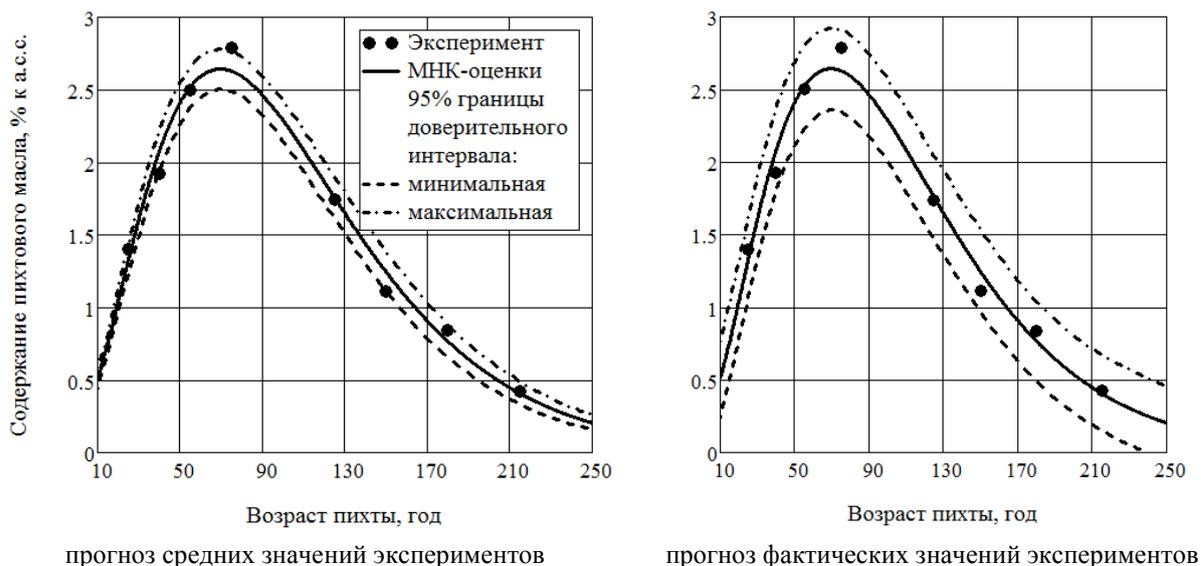


Рис. 3. Содержание эфирного масла в коре пихты, произрастающей в восточной и западной части лесостепи Красноярского края, в зависимости от возраста дерева

Сравнение полученной математической модели содержания эфирного масла в коре и полученных моделей содержания эфирного масла в древесной зелени пихты, произрастающей в восточной и западной части лесостепи Красноярского края и Лесосибирском регионе [21], показывает близкие по величине значения постоянных времени (34–35 лет для коры и 26–42 года для древесной зелени), важных характеристик динамических процессов онтогенеза.

При равенстве постоянных времени наблюдаемую в экспериментах динамику содержания эфирного масла в древесной зелени и коре можно объяснить трехкомпарментной моделью. Первый компармент, возможно, соответствует процессам в хлоропластах, второй – в древесной зелени, третий – в коре. Рассмотрим соответствующие модели.

Первый компармент: Модель: $Y_1'(t) + b \times Y_1(t) = b \times A_1$, $Y_1(0) = y_1$.

Решение: $Y_1(t) = a_{0,1} + a_{1,1} \times \exp(-b \times t)$, где $a_{0,1} = A_1$, $a_{1,1} = y_1 - A_1$.

Второй компармент: Модель: $Y_2'(t) + b \times Y_2(t) = b \times A_2 + c_2 \times Y_1(t)$, $Y_2(0) = y_2$,

Решение: $Y_2(t) = a_{0,2} + (a_{1,2} + a_{2,2} \times t) \times \exp(-b \times t)$,

где $a_{2,2} = c_2 \times (y_1 - A_1)$, $a_{1,2} = y_2 - A_2 - \frac{c_2 \times A_1}{b}$, $a_{0,2} = A_2 + \frac{c_2 \times A_1}{b}$.

Третий компармент: Модель: $Y_3'(t) + b \times Y_3(t) = b \times A_3 + c_3 \times Y_2(t)$, $Y_3(0) = y_3$,

Решение: $Y_3(t) = a_{0,3} + (a_{1,3} + a_{2,3} \times t + a_{3,3} \times t^2) \times \exp(-b \times t)$, где $a_{3,3} = \frac{c_3 \times c_2 \times (y_1 - A_1)}{2}$,

$a_{2,3} = c_3 \times (y_2 - A_2 - \frac{c_2 \times A_1}{b})$, $a_{1,3} = y_3 - A_3 - \frac{c_3 \times A_2 \times b + c_3 \times c_2 \times A_1}{b^2}$, $a_{0,3} = \frac{A_3 \times b^2 + A_2 \times c_3 \times b + c_3 \times c_2 \times A_1}{b^2}$.

Исследования интенсивности электронного транспорта в фотосистемах хлоропластов хвои сосны европейской от мощности потока внешней световой радиации показали ее снижение в 1.1 раза при увеличении возраста дерева с 8 до 23 лет и в 1.2 раза – с 8 до 72 лет [34, с. 35]. Обработка представленных в [34] экспериментальных данных методом наименьших квадратов показала, что возрастная составляющая интенсивности электронного транспорта в фотосистемах хлоропластов соответствует модели первого компармента ($R^2 = 0.995$).

Модель второго компармента соответствует модели динамики содержания эфирного масла в древесной зелени пихты [21]. Модель третьего компармента соответствует модели (1)–(2) динамики содержания эфирного масла в коре пихты.

Выводы

Проведенные исследования свидетельствуют о существенном варьировании в ходе онтогенеза содержания эфирного масла в коре *A. sibirica* восточной и западной части лесостепи Красноярского края: увеличением от $1.1 \pm 0.1\%$ в возрасте 20 лет до максимального значения $2.6 \pm 0.2\%$ в 60–80-летнем возрасте с последующим снижением до $2.2 \pm 0.2\%$ к 100-летнему возрасту, $1.1 \pm 0.2\%$ к 150-летнему и $0.6 \pm 0.1\%$ к 200-летнему

возрасту. Предложена адекватная экспериментальным данным математическая модель возрастной динамики изменения содержания эфирного масла в коре *A. sibirica*. Проведена параметрическая идентификация модели для пихты, произрастающей в восточной и западной части лесостепи Красноярского края. Предложена трех-компарментная модель, объясняющая особенности динамики содержания эфирного масла в древесной зелени и коре пихты в процессе онтогенеза.

Список литературы

1. Александрова Н., Нехочина Т., Посульный Р. ЛПК России: цифры, тенденции, прогнозы // Русские товары – Сибирь. Красноярск, 2007. №8. С. 18–23.
2. Ушанова В.М. Комплексная переработка древесной зелени и коры пихты сибирской с получением продуктов, обладающих биологической активностью: автореф. дис. ... докт. тех. наук. Красноярск, 2012. 34 с.
3. Ушанова В.М., Степень Р.А., Репях С.М. Переработка древесных отходов хвойных деревьев // Химия растительного сырья. 1998. №2. С. 17–23.
4. Степень Р.А., Черняева Г.Н., Сивовол Г.М. Влияние некоторых факторов на выход и состав эфирного масла коры пихты сибирской // Химия древесины. 1989. №4. С. 102–106.
5. Ягодин В.И. Основы безотходной технологии древесной зелени // Основы химической технологии древесного сырья. СПб., 2000. С. 50–58.
6. Рошин В.И. Состав, строение и биологическая активность терпеноидов из древесной зелени хвойных растений: автореф. дис. ... докт. хим. наук. СПб., 1995. 37 с.
7. Ушанов С.В., Ушанова В.М. Исследование процесса экстрагирования коры пихты сибирской сжиженным диоксидом углерода // Вестник КрасГАУ. 2009. №12. С. 39–44.
8. Ушанова В.М., Репях С.М. Углекислотные экстракты как источники биологически активных веществ. Красноярск, 2007. 156 с.
9. Кузнецов Б.Н., Левданский В.А., Кузнецова С.А. Химические продукты из древесной коры. Красноярск, 2012. 260 с.
10. Томчук Р.И., Томчук Г.Н. Древесная зелень и ее использование в народном хозяйстве. М., 1973. 360 с.
11. Степень Р.А. Утилизация древесных отходов. Пихтоварение. Красноярск, 2015. 162 с.
12. Степень Р.А., Репях С.М., Шелепков В.В. Повышение рентабельности лесозаготовительных предприятий в Сибири // Химия растительного сырья. 2002. №2. С. 143–146.
13. Ушанова В.М., Ушанов С.В., Репях С.М. Состав и переработка древесной зелени и коры пихты сибирской. Красноярск, 2008. 259 с.
14. Ушанова В.М., Заика Н.А., Громовых Т.И. Альтернативные пути использования коры хвойных в различных технологиях // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2006. Т. 49, №5. С. 72–77.
15. Патент 2067977С1 (РФ). Способ переработки коры хвойных деревьев / В.М. Ушанова, А.В. Зиганшин, С.М. Репях. 20.10.1996.
16. Ушанова В.М. Переработка древесной зелени и коры пихты сибирской с получением биологически активных продуктов // Хвойные бореальные зоны. 2013. Т. 30, №1–2. С. 138–142.
17. Ушанова В.М. Использование отходов пихты сибирской в альтернативных технологиях // Вестник Красноярского аграрного университета. 2010. №10. С. 182–186.
18. Петренко Е.В. Технология и товароведение продуктов малоотходной переработки хвойной древесной зелени. Красноярск, 2016. 149 с.
19. Мамаев С.А. Основные принципы методики исследования внутривидовой изменчивости древесных растений // Индивидуальная и эколого-географическая изменчивость растений. Свердловск, 1975. С. 3–15.
20. Степень Р.А., Репях С.М. Летучие терпеноиды сосновых лесов. Красноярск, 1998. 406 с.
21. Ушанов С.В., Степень Р.А., Ушанова В.М. Возрастная динамика содержания пихтового масла в древесной зелени *Abies sibirica*. Теоретические аспекты оценки // Химия растительного сырья. 2017. №1. С. 129–136. DOI: 10.14258/jcrpm.2017011448.
22. Степень Р.А., Ушанова В.М., Ушанов С.В. Моделирование содержания эфирного масла в древесной зелени и коре *Abies sibirica* различного возраста // Системы. Методы. Технологии. 2017. №3. С. 127–130. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-3-127-130.
23. Ушанова В.М., Лебедева О.И., Девятловская А.Н. Основы научных исследований. Красноярск, 2004. 360 с.
24. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М., 2006. 816 с.
25. Ушанов С.В. Применение многомерных статистических методов при принятии решений. Красноярск, 2003. 239 с.
26. Ushanov S.V., Ogurtsov D.A. Estimation of the Frocini criteria and omega square criteria statistics by the statistical tests method for a mixture of normal distributions // Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Vol. 20, no. 1. Pp. 28–34. DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-1-28-34.
27. Ушанов С.В., Огурцов Д.А. Оценка статистики критерия нормальности распределения Фроцини методом статистических испытаний в MathCad // Решетневские чтения. 2018. Т. 2. С. 171–173.
28. Lemeshko V. Yu. Errors when us using nonparametric fitting criteria // Measurement Techniques, 2004. Vol. 47, no. 2, Pp. 134–142.
29. Черняева Г.Н. Влияние различных факторов на качество сырья и выход пихтового масла // Производство и анализ пихтового масла. Красноярск, 1977. С. 3–28.

30. Лобанов В.В., Степень Р.А. Влияние биоценологических факторов на содержание и состав пихтового масла // Хвойные бореальные зоны. 2004. №2. С. 148–153.
31. Судачкова Н.Е., Гирс Г.И., Прокушкин С.Г. и др. Физиология сосны обыкновенной. Новосибирск, 1990. 248 с.
32. Bernhard-Dagan C., Paule G., Marpeau A. et al. Control and compartmentation of terpene biosynthesis in leaves of *Pinus Pinaster* // *Physiol. Veget.* 1982. Vol. 20, no 4. Pp. 775–795.
33. Рощина В.В., Рощина В.Д. Выделительная функция высших растений. Saarbrücken, LAPLAMBERT Academic Publishing GmbH. 2012. 476 с.
34. Luckner, M., Dietrich, B., Lerbs, W. Cellular compartmentation and channelling of secondary metabolism in microorganisms and higher plants // *Progress in Phytochemistry.* 1980. Vol. 6. Pp. 103–142.
35. Кашулин П.А., Калачева Н.В. Возрастные изменения функций фотосинтетического аппарата сосны европейской // Вестник Кольского научного центра РАН. 2011. №2. С. 34–40.

Поступила в редакцию 18 мая 2021 г.

После переработки 14 августа 2021 г.

Принята к публикации 24 августа 2021 г.

Для цитирования: Ушанов С.В., Ушанова В.М. Возрастная динамика содержания эфирного масла в коре *Abies Sibirica*. Теоретические аспекты оценки // Химия растительного сырья. 2021. №4. С. 175–182. DOI: 10.14258/jcrpm.2021049648.

*Ushanov S.V., Ushanova V.M.** AGE-SPECIFIC DYNAMICS OF ESSENTIAL OIL CONTENT IN *ABIES SIBIRICA* BARK. THEORETICAL ASPECTS OF EVALUATION

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, (Russia), e-mail: ushanova_vm@mail.ru

The variability of the essential oil content in *Abies Sibirica* bark in the Eastern and Western parts of the Krasnoyarsk forest-steppe was evaluated in eight age groups. The model of the age dynamics of changes in the essential oil content in the bark of *Abies Sibirica*, which is adequate to the experimental data, was obtained. With increasing age of fir, the content of fir oil in the bark increases from 1.4±0.1% of a. s. s. in 20–30 years of age to 2.8±0.2% of a.s.s. at the age of 70–80 years, with further decreases to 0.4±0.1% of a. s. s. in overmature trees.

The results of parametric identification of the model for *Abies Sibirica* growing in the Krasnoyarsk forest-steppe are presented. Based on the results of 50.000 computational experiments, the simulation method estimates the statistics of changes in the model coefficients and 95% of the boundary of the forecast values of the content of fir oil in the bark. A compartment model is proposed that explains the age-specific dynamics of essential oil content in tree greens and Siberian fir bark. The obtained solution compartment model allows us to associate its parameters with the coefficients of models of changes in the content of fir oil in tree greens and bark obtained by processing experimental data.

Keywords: Siberian fir, age, bark, ethereal oil, mathematical modeling, statistics testing.

References

1. Aleksandrova N., Nekhochina T., Posul'nyy R. *Russkiye tovary – Sibir*, Krasnoyarsk, 2007, no. 8, pp. 18–23. (in Russ.).
2. Ushanova V.M. *Kompleksnaya pererabotka drevesnoy zeleni i kory pikhty sibirskoy s polucheniym produktov, obladayushchikh biologicheskoy aktivnost'yu: avtoref. dis. ... dokt. tekh. nauk.* [Complex processing of tree greenery and bark of Siberian fir to obtain products with biological activity: author's abstract of the dissertation of Doctor of Technical Sciences]. Krasnoyarsk, 2012, 34 p. (in Russ.).

* Corresponding author.

3. Ushanova V.M., Stepen R.A., Repyakh S.M. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 1998, no. 2, pp. 17–23. (in Russ.).
4. Stepen' R.A., Chernyayeva G.N., Sivovol G.M. *Khimiya drevesiny*, 1989, no. 4, pp. 102–106. (in Russ.).
5. Yagodin V.I. *Osnovy khimicheskoy tekhnologii drevesnogo syr'ya*. [Fundamentals of chemical technology of wood raw materials]. St. Petersburg, 2000, pp. 50–58. (in Russ.).
6. Roshchin V.I. *Sostav, stroeniye i biologicheskaya aktivnost' terpenoidov iz drevesnoy zeleni khvoynykh rasteniy: avtoref. dis. ... dokt. khim. nauk*. [Composition, structure and biological activity of terpenoids from woody greenery of coniferous plants: abstract of the dissertation of Doctor of Chemical Sciences.]. St. Petersburg, 1995, 37 p. (in Russ.).
7. Ushanov S.V., Ushanova V.M. *Vestnik KrasGAU*, 2009, no. 12, pp. 39–44. (in Russ.).
8. Ushanova V.M., Repyakh S.M. *Uglekislotnyye ekstrakty kak istochniki biologicheski aktivnykh veshchestv*. [Carbon dioxide extracts as sources of biologically active substances]. Красноярск, 2007, 156 p. (in Russ.).
9. Kuznetsov B.N., Levdanskiy V.A., Kuznetsova S.A. *Khimicheskiye produkty iz drevesnoy kory*. [Chemical products from tree bark]. Krasnoyarsk, 2012, 260 p. (in Russ.).
10. Tomchuk R.I., Tomchuk G.N. *Drevesnaya zelen' i yeye ispol'zovaniye v narodnom khozyaystve*. [Woody greens and their use in the national economy]. Moscow, 1973, 360 p. (in Russ.).
11. Stepen' R.A. *Utilizatsiya drevesnykh otkhodov. Pikhovareniye*. [Utilization of wood waste. Fir making]. Krasnoyarsk, 2015, 162 p. (in Russ.).
12. Stepen' R.A., Repyakh S.M., Shelepkov V.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2002, no. 2, pp. 143–146. (in Russ.).
13. Ushanova V.M., Ushanov S.V., Repyakh S.M. *Sostav i pererabotka drevesnoy zeleni i kory pikhty sibirskoy*. [Composition and processing of woody greenery and bark of Siberian fir]. Krasnoyarsk, 2008, 259 p. (in Russ.).
14. Ushanova V.M., Zaika N.A., Gromovykh T.I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2006, vol. 49, no. 5, pp. 72–77. (in Russ.).
15. Patent 2067977C1 (RU). 20.10.1996. (in Russ.).
16. Ushanova V.M. *Khvoynyye boreal'nyye zony*, 2013, vol. 30, no. 1–2, pp. 138–142. (in Russ.).
17. Ushanova V.M. *Vestnik Krasnoyarskogo agrarnogo universiteta*, 2010, no. 10, pp. 182–186. (in Russ.).
18. Petrenko Ye.V. *Tekhnologiya i tovarovedeniye produktov malootkhodnoy pererabotki khvoynoy drevesnoy zeleni*. [Technology and commodity science of products of low-waste processing of coniferous tree greenery]. Krasnoyarsk, 2016, 149 p. (in Russ.).
19. Mamayev S.A. *Individual'naya i ekologo-geograficheskaya izmenchivost' rasteniy*. [Individual and ecological-geographical variability of plants]. Sverdlovsk, 1975, pp. 3–15. (in Russ.).
20. Stepen' R.A., Repyakh S.M. *Letuchiye terpenoidy sosnovykh lesov*. [Volatile terpenoids of pine forests]. Krasnoyarsk, 1998, 406 p. (in Russ.).
21. Ushanov S.V., Stepen' R.A., Ushanova V.M. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2017, no. 1, pp. 129–136. DOI: 10.14258/jcprm.2017011448. (in Russ.).
22. Stepen' R.A., Ushanova V.M., Ushanov S.V. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2017, no. 3, pp. 127–130. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-3-127-130. (in Russ.).
23. Ushanova V.M., Lebedeva O.I., Devyatlovskaya A.N. *Osnovy nauchnykh issledovaniy*. [Fundamentals of Scientific Research]. Krasnoyarsk, 2004, 360 p. (in Russ.).
24. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika*. [Applied Mathematical Statistics]. Moscow, 2006, 816 p. (in Russ.).
25. Ushanov S.V. *Primeneniye mnogomernykh statisticheskikh metodov pri prinyatii resheniy*. [Application of multivariate statistical methods in decision making]. Krasnoyarsk, 2003, 239 p. (in Russ.).
26. Ushanov S.V., Ogurtsov D.A. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 28–34. DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-1-28-34.
27. Ushanov S.V., Ogurtsov D.A. *Reshetnevskiy chteniye*, 2018, vol. 2, pp. 171–173.
28. Lemeshko B. Yu. *Measurement Techniques*, 2004, vol. 47, no. 2, pp. 134–142.
29. Chernyayeva G.N. *Proizvodstvo i analiz pikhtovogo masla*. [Fir oil production and analysis]. Krasnoyarsk, 1977, pp. 3–28. (in Russ.).
30. Lobanov V.V., Stepen' R.A. *Khvoynyye boreal'nyye zony*, 2004, no. 2, pp. 148–153. (in Russ.).
31. Sudachkova N.Ye., Girs G.I., Prokushkin S.G. et al. *Fiziologiya sosny obyknovennoy*. [Physiology of Scots pine]. Novosibirsk, 1990, 248 p. (in Russ.).
32. Bernhard-Dagan C., Paule G., Marpeau A. et al. *Physiol. Veget.*, 1982, vol. 20, no. 4, pp. 775–795.
33. Roshchina V.V., Roshchina V.D. *Vydelitel'naya funktsiya vysshikh rasteniy*. [The excretory function of higher plants]. Saarbrücken, LAPLAMBERT Academic Publishing GmbH. 2012, 476 p. (in Russ.).
34. Luckner, M., Dietrich, B., Lerbs, W. *Progress in Phytochemistry*, 1980, vol. 6, pp. 103–142.
35. Kashulin P.A., Kalacheva N.V. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, no. 2, pp. 34–40. (in Russ.).

Received May 18, 2021

Revised August 14, 2021

Accepted August 24, 2021