

УДК 581.5:[561.5/9 + 582.47]

DOI 10.29039/2413-1725-2025-11-3-314-324

ОКСИГЕНИРОВАННЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЛЕТУЧИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ХВОЙНЫХ И ЦВЕТКОВЫХ РАСТЕНИЙ КРЫМСКОЙ ФЛОРЫ

Калеух А. В.¹, Ходаков Г. В.^{1, 2}, Гусев А. Н.²

¹ФГАОУ ВО «Херсонский технический университет», Генчешек, Россия

²ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет» имени В. И. Вернадского, Симферополь, Россия

E-mail: gennadii-hodakov@mail.ru

Выяснен компонентный состав БЛОС для растений вида *Pinus pallasiana*, собранных в виде эфирного масла. Эфирное масло разделили на компоненты масс-хроматографическим методом и установили их строение. Доминирующими компонентами являются два монотерпена α -, β -пинены (41,8 %, 11,1 % соответственно) и два сесквитерпена транс-кариофиллен, гермакрен Д (10,1 %, 20,8 % соответственно). Для хвойных растений вида *Pinus pallasiana*, а также для двух крымских видов рода *Juniperus* и цветковых растений рода *Artemisia* установлено содержание оксигенированных монотерпеновых БЛОС и выяснена потенциальная возможность растений к образованию вторичного органического аэрозоля (ВОА) по монотерпенам. Высокие значения степени оксигенирования монотерпенов наблюдаются у растений *Artemisia abrotanum*, *A. annua*, *A. balchanorum* и *A. taurica*, низкие – у исследованных хвойных растений, а также у *A. dracuncululus* и *A. scoparia*.

Ключевые слова: *Pinus pallasiana*, род *Juniperus*, род *Artemisia*, масс-хроматографический метод, оксигенированные БЛОС монотерпеновой природы, вторичные органические аэрозоли.

ВВЕДЕНИЕ

Качественное разнообразие компонентов растительных БЛОС терпеновой природы определяется в первую очередь их химической структурой. Наряду с карбоциклическими компонентами, БЛОС содержат гетероциклические структуры, где гетероатомом служит кислород (эпоксиды, лактоны). Кроме того, в молекулах терпенов существуют различные кислородсодержащие функциональные группировки, а именно, гидроксильные, карбонильные, карбоксильные в разнообразном сочетании [1]. Оксигенированность молекул БЛОС увеличивает их атмосферную активность (химическую и адсорбционную), способствуя формированию вторичного органического аэрозоля (ВОА). Моно- и сесквитерпеновые БЛОС активно участвуют в окислительных процессах атмосферы с образованием ВОА. Ключевыми реагентами, инициирующими ВОА, образующимися в результате окисления БЛОС в тропосфере, являются озон (O_3), гидроксильные (ОН) радикалы и оксиды азота NO_x (сумма NO и NO_2) [2, 3]. Во всем

мире в подавляющем большинстве случаев формирование ВОА происходит из окисленных биогенных монотерпенов, таких как α -пинен, β -пинен и лимонен [4].

Одним словом, ВОА образуется благодаря атмосферному окислению БЛОС с последовательным возникновением множества окисленных продуктов. Молекулярное преобразование оказывает важное воздействие на твердые частицы атмосферы, поскольку это влияет на общий состав ВОА и на его физико-химические свойства. К тому же сами растения выбрасывают в атмосферу огромное количество монотерпенов в оксигенированных формах, причем в процессах окисления участвуют пироксисомы клеток [5]. Продукты, образуемые окислением монотерпенов атмосферными агентами, а также состав генерируемого ВОА, зависят как от природы окислителя, так и от молекулярной структуры монотерпена [6, 7]. Более того, органические соединения с чрезвычайно низкой летучестью, образующиеся при окислении терпенов, играют решающую роль в образовании новых частиц [8].

Летучие органические кислоты (ЛОК) показали более высокие концентрации в атмосфере, чем терпеновые БЛОС [9]. Срок их жизни [10] намного длиннее и поэтому они могут накапливаться в атмосфере и переноситься на более дальние расстояния. Они также производятся в атмосфере за счет окислительных реакций других летучих органических соединений, а среднесуточные значения ЛОК для C3–C7 тесно коррелируют с суммой монотерпеновых БЛОС ($R = 0,6–0,85$) [9].

Альдегиды C5–C10 могут выделяться непосредственно в атмосферу или образовываться в атмосфере за счет окисления других соединений. Поссанзини с сотрудниками [11] обнаружили, что цитрусовые растения при воздействии на них O_3 выделяют альдегиды (гептаналь, октаналь).

Хакола с сотрудниками [12] также измерили выбросы альдегидов C4–C10 от ели европейской и обнаружили, что их величины в конце лета аналогичны выбросам монотерпенов. Среднесуточные значения нонаняля и деканяля показали наибольшую корреляцию летом с β -фарнезеном (сесквитерпен). Поскольку выбросы β -фарнезена связаны со стрессом, это также помогло указать на источники выбросов и связать их со стрессовыми условиями.

Цель работы: произвести количественную оценку образования оксигенированных компонентов БЛОС растениями крымской флоры для выяснения потенциальной возможности к ВОА-образованию по монотерпенам хвойными растениями вида *Pinus palassiana* и двумя видами рода *Juniperus*, а также цветковыми растениями рода *Artemisia*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отобрано 240 г хвои крымского вида *Pinus palassiana* в районе пос. Сосняк. Образец обработали методом гидродистилляции с обратным холодильником и ловушкой Гинзберга. Разделение БЛОС на компоненты, собранные в виде эфирного масла в количестве 0,5 мл (выход: 0,25 %), проводили масс-хроматографическим методом на приборе Agilent Technologies 6890 (США) с 5973 масс-спектрометром и базой данных NIST 02. Условия хроматографии: кварцевая колонка (30 м x 0,25 мм). Газ-носитель гелий, расход газа-носителя 1 мл/мин, температура испарителя 249 °C, температурная программа с 50 до 230 °C (3 °C/мин), объем вводимой пробы 0,1 μ л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В летучих выделениях *Pinus pallasiana* обнаружено по 10 моно- и сесквитерпеновых компонентов (табл. 1). Общее содержание двух ациклических монотерпенов составляет 1,71 %, четырех моноциклических – 5,47 %, четырех бициклических – 55,4% и десяти сесквитерпенов – 37,4%. Доминирующими компонентами являются два монотерпена α -, β -пинены (41,8 %, 11,1 % соответственно) и два сесквитерпена транс-кариофиллен, гермакрин Д (10,1 %, 20,8 % соответственно).

Таблица 1
Компонентный состав БЛОС растений вида *Pinus pallasiana*

№ п/п	Компонент	w, %	t, мин	№ п/п	Компонент	w, %	t, мин
1	2	3	4	1	2	3	4
1	β -Мирцен	1,0	6,7	11	α -Копаен	0,2	17,9
2	цис-Оцимен	0,7	8,3	12	транс-Кариофиллен	10,1	19,9
	Сумма	1,7		13	Гермакрин Д	20,8	21,8
3	Лимонен	2,0	7,7	14	Кубебен	0,6	20,2
4	Терпинолен	0,5	9,4	15	α -Кариофиллен	1,5	20,9
5	p-Мента-1-ен-8-ол	1,5	12,6	16	Аморфен	0,4	22,1
6	α -Терпенилацетат	1,4	17,6	17	α -Мууролен	0,4	22,3
	Сумма	5,4		18	β -Кадинен	0,3	22,5
7	α -Пинен	41,8	5,4	19	γ -Кадинен	1,0	22,7
8	Камфен	1,2	5,6	20	δ -Кадинен	2,1	23,0
9	β -Пинен	11,1	6,3		Общая сумма	37,4	
10	Эндоборнилацетат	1,3	15,5				
	Сумма	55,4					
	Общая сумма	62,6					

В дальнейшем был проведен расчет количества оксигенированных монотерпеновых БЛОС и степени их оксигенирования для хвойных растений представленного вида *Pinus pallasiana* и по ранее опубликованным данным для двух видов рода *Juniperus* [13]. Общее количество оксигенированных монотерпеновых БЛОС вида *Pinus pallasiana* и рода *Juniperus* находятся на низком уровне (4,2 %; 4,7 % и 4,6 %) и меньше по количеству к неоксигенированным компонентам в 9–15 раз (табл. 2).

В результате важное значение приобретает относительная оценка количества выбросов оксигенированных монотерпеновых компонентов БЛОС самими растениями. Для этой цели наиболее удобно использовать расчет степени оксигенирования (α) летучих выделений растениями как новый способ количественной оценки источника выбросов на способность формирования ВОА.

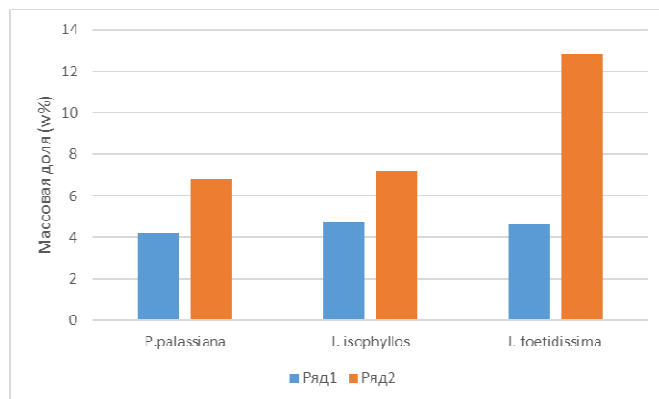
$$\alpha = \frac{\text{Сумма оксигенированных терпенов (\%)}}{\text{Общая сумма терпенов (\%)}} \cdot 100\%$$

Таблица 2

Содержание и степень оксигенирования монотерпеновых БЛОС растений вида *Pinus pallasiana* и рода *Juniperus* [13]

№ п/п	Компоненты	<i>Pinus pallasiana</i>	<i>Juniperus isophyllos</i>	<i>Juniperus foetidissima</i>
1	2	3	4	5
1	Оксигенированные	4,2	4,7	4,6
2	Неоксигенированные	58,4	61,0	31,3
3	Общая сумма	62,6	65,7	35,9
4	Степень оксигенирования (α)	6,7	7,2	12,8

Содержание оксигенированных монотерпеновых БЛОС к выбросам у всех растений находится примерно на одном уровне (рис. 1), при этом для растений *J. foetidissima* степень оксигенирования почти в два раза выше, чем для *P. pallasiana* и *J. isophyllos* (12,8 % по сравнению с 6,7 % или 7,2 % соответственно). Похоже, что степень оксигенирования имеет более объективное значение для оценки потенциала растений в образовании ВОА. Проведенные исследования показали, что растения *J. foetidissima* обладают почти в два раза большим потенциалом к ВОА-образованию, хотя все они имеют равные значения эмиссии оксигенированных продуктов. Однако источники выбросов в атмосферу оксигенированных монотерпеновых БЛОС не обладают высокими значениями, а сами растения обладают низким потенциалом ВОА-образования по монотерпенам.



Ряд 1 – Количество оксигенированных монотерпеновых БЛОС;
Ряд 2 – Степень оксигенирования.

Рис. 1. Диаграмма распределения оксигенированных монотерпеновых БЛОС в выбросах растений вида *Pinus pallasiana* и рода *Juniperus*.

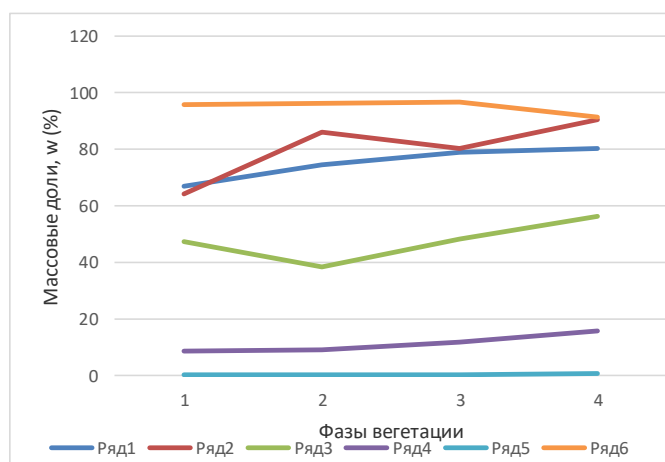
Для подтверждения были произведены расчеты количества неоксигенированных и оксигенированных монотерпенов в летучих выделениях цветковых растений рода *Artemisia* на протяжении всей вегетации по авторским работам [14–17]. Для летучих выделений произведен расчет степени оксигенирования, полученные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3

Количественное содержание и степень оксигенирования монотерпенов растений рода *Artemisia* на протяжении всей вегетации

№ п/п	Компоненты	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
<i>Artemisia abrotanum</i>					
1	Оксигенированные	66,8	74,2	79,0	80,0
2	Неоксигенированные	11,6	8,9	6,7	14,9
3	Общая сумма	78,4	83,1	85,7	94,9
4	<i>Степень оксигенирования (α)</i>	85,2	89,3	92,2	84,3
<i>Artemisia annua</i>					
5	Оксигенированные	64,0	86,0	80,0	90,5
6	Неоксигенированные	9,6	10,7	12,4	5,2
7	Общая сумма	73,6	96,7	92,4	95,7
8	<i>Степень оксигенирования (α)</i>	87,0	88,9	86,6	94,6
<i>Artemisia balchanorum</i>					
9	Оксигенированные	47,2	38,4	48,3	56,0
10	Неоксигенированные	0,4	6,9	3,1	13,3
11	Общая сумма	47,6	45,3	51,4	69,3
12	<i>Степень оксигенирования (α)</i>	99,2	84,8	94,0	80,8
<i>Artemisia dracunculus</i>					
13	Оксигенированные	8,4	9,1	11,8	15,8
14	Неоксигенированные	43,4	48,1	18,8	42,0
15	Общая сумма	51,8	57,2	30,6	57,8
16	<i>Степень оксигенирования (α)</i>	16,2	15,9	38,6	27,3
<i>Artemisia scoparia</i>					
17	Оксигенированные	0	0,3	0,3	0,5
18	Неоксигенированные	0,4	1,8	2,0	16,5
19	Общая сумма	0,4	2,1	2,3	17,0
20	<i>Степень оксигенирования (α)</i>	0	14,3	13,0	2,9
<i>Artemisia taurica</i>					
21	Оксигенированные	96,5	96,0	96,5	91,1
22	Неоксигенированные	1,0	2,6	2,0	2,3
23	Общая сумма	97,5	98,6	98,5	93,4
24	<i>Степень оксигенирования (α)</i>	99,0	97,4	98,0	97,5

Для наглядности на основании данных таблицы 3 сформированы две диаграммы (рис. 2, 3). В первой диаграмме представлена динамика выбросов оксигенированных монотерпенов БЛОС для каждого растения рода *Artemisia*. В этой диаграмме наблюдается распределение растений по уровню выбросов оксигенированных монотерпенов.



Ряд 1 – *A.abrotanum*; Ряд 2 – *A.annua*; Ряд 3 – *A.balchanorum*;
Ряд 4 – *A.dracunculus*; Ряд 5 – *A.scoparia*; Ряд 6 – *A.taurica*.

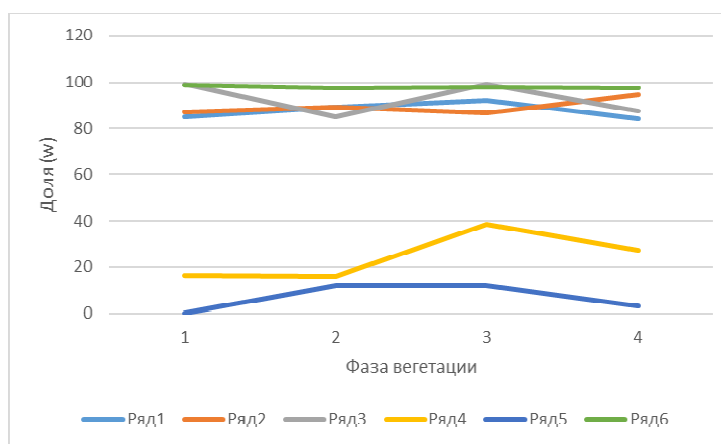
Рис. 2. Динамика распределения оксигенированных монотерпеновых БЛОС по фазам вегетации растений рода *Artemisia*

Для каждого растения существует некоторый диапазон, в рамках которого варьирует количество оксигенированных монотерпеновых БЛОС в течении вегетации. В результате анализа этих диапазонов растения можно разделить на четыре группы по содержанию оксигенированных монотерпеновых БЛОС:

1. очень высокое (90–100%);
2. высокое (60–90%);
3. среднее (40–60%);
4. низкое (0–40%).

Очень высоким содержанием оксигенированных монотерпенов выделяются растения вида *Artemisia taurica* (96,5 %; 96,0 %; 96,5 %; 91,1 %). Высокое содержание оксигенированных монотерпенов наблюдается у двух растений *Artemisia abrotanum* (66,8 %; 74,2 %; 79,0 %; 80,0 %) и *A. annua* (64,0 %; 86,0 %; 80,0 %; 90,5 %). Средние величины содержания оксигенированных монотерпенов имеют растения вида *Artemisia balchanorum* (47,2 %; 38,4 %; 48,3 %; 56,0 %). Низкими значениями содержания характеризуются два вида растений: *Artemisia dracunculus* (8,4 %; 9,1 %; 11,8 %; 15,8 %) и *Artemisia scoparia* (0 %; 0,3 %; 0,3 %; 0,5 %).

Во второй диаграмме (рис. 3) приводится такая же динамика, но уже распределения расчетной степеней окисигенирования БЛОС для тех же растений в течении вегетации.



Ряд 1 – *A.abrotanum*; Ряд 2 – *A.annua*; Ряд 3 – *A.balchanorum*;
Ряд 4 – *A.dracunculus*; Ряд 5 – *A.scoparia*; Ряд 6 – *A.taurica*.

Рис. 3. Динамика распределения степени окисигенирования монотерпеновых БЛОС по фазам вегетации растений рода *Artemisia*

Наблюдается такая же градация диапазонов значений для каждого растительного вида, однако величины в рамках диапазона стали выше, а для растений вида *Artemisia balchanorum* поменялся диапазон в сторону увеличения со среднего значения на такие значения, которые распределились между очень высоким (99,2 % и 94,0 % в первой и третьей фазах вегетации) и высокими (84,8 %; 80,8 % во второй и четвертой фазах соответственно).

Для остальных видов растений степень окисигенирования приобрела следующие значения: *Artemisia abrotanum* – 85,2 %; 89,3 %; 92,2 %; 84,3 % (высокий уровень, хотя одно значение в третьей фазе возрастает до очень высокого уровня), *Artemisia annua* – 87,0 %; 88,9 %; 86,6 %; 94,6 % (высокий уровень, хотя одно значение в четвертой фазе находится на очень высоком уровне), два вида растений обладают низким уровнем: *Artemisia dracunculus* – 16,2 %; 15,9 %; 38,4 %; 27,3 % и *Artemisia scoparia* – 0 %; 14,3 %; 13,0 %; 2,9 %. Растения вида *Artemisia taurica* остались на прежнем очень высоком уровне – 99,0 %; 97,4 %; 98,0 %; 97,5 %.

Растения исследованного вида *Pinus pallasiana* и двух видов рода *Juniperus* обладают собственным диапазоном выбросов окисигенированных монотерпеновых БЛОС, который определяет их потенциальный уровень ВОА-образования по монотерпенам. Для представленных растений наблюдается низкий уровень окисигенированных выбросов, который сохраняется и для разработанных нами расчетных степеней окисигенирования.

Цветковые растения видов *Artemisia taurica*, *A. abrotanum* и *A. annua* обладают высоким потенциалом образования ВОА. Их БЛОС включают уровень оксигенированных монотерпенов в количественном диапазоне от высокого до очень высокого. За ними стоит *A. balchanorum* в диапазоне со средним уровнем. *A. dracunculus* и *A. scoparia* обладают низким уровнем.

Расчетное значение степени оксигенирования для пяти растительных видов сохраняет диапазон значений такой же, как и диапазон значений по содержанию, к ним относятся растения *Artemisia taurica*, *A. abrotanum*, *A. annua*, *A. dracunculus* и *A. scoparia*. Для растений вида *A. balchanorum* диапазон сместился выше со среднего на высокий уровень и очень высокий.

Различия связаны с тем, что содержание оксигенированных монотерпеновых БЛОС приводится как количественная характеристика от общей эмиссии, а степень оксигенирования оценивает окислительную способность на уровне клетки (в пироксисомах). В результате эти две характеристики в полной мере оценивают способность растений к эмиссии оксигенированных БЛОС монотерпеновой природы и описывают важную потенциальную возможность растений к участию в образовании ВОА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлен компонентный состав БЛОС для растений вида *Pinus pallasiana*, собранных в виде эфирного масла (выход: 0,25 %). Доминирующими компонентами являются два монотерпена α -, β -пинены (41,8 %, 11,1 % соответственно) и два сесквитерпена транс-кариофиллен, гермакрин Д (10,1 %, 20,8 % соответственно).
2. Установлен диапазон эмиссии оксигенированных БЛОС и степеней оксигенирования для хвойных растений вида *Pinus pallasiana* и для двух видов рода *Juniperus*, а также цветковых растений рода *Artemisia* в течении вегетации.
3. Выявлена потенциальная способность исследованных растений к ВОА-образованию по монотерпенам на основании ранжирования их эмиссии по содержания оксигенированных БЛОС и величин степеней оксигенирования.

Список литературы

1. Ходаков Г. В. Биосферные вещества терпеновой природы / Г. В. Ходаков. – Симферополь: Полипринт, 2023. – 418 с.
2. Seinfeld J. H. Atmospheric composition, global cycles, and lifetimes. In: Atmospheric chemistry and physics. from air pollution to climate change / J. H. Seinfeld, S. N. Pandis. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. – P. 49–124.
3. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Supplement VI / R. Atkinson, D. L. Baulch, R. A. Cox [et al.] // Journal of Physical and Chemical Reference. – 1997. – Vol. 26. – P. 1329–1499.
4. Shexia Ma. Production of Secondary Organic Aerosol from Multiphase Monoterpenes / Ma Shexia // Atmospheric Aerosol-Regional Characteristics-Chemistry and Physics. – Kingsville: Texas A&M University, – 2012. – 492 p.
5. Ходаков Г. В. Влияние пластидной мембраны на кинетику образования монотерпеновых углеводородов растений рода *Artemisia* / Г. В. Ходаков, В. Н. Устименко // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2022. – № 142. – С. 26–36.

6. Camel V. Trace enrichment methods for the determination of organic pollutants in ambient air / V. Camel, M. Caude // *Journal of Chromatography A*. – 1995. – Vol. 710. – P. 3–19.
7. The atmospheric impacts of monoterpene ozonolysis on global stabilised Criegee intermediate budgets and SO₂ oxidation: experiment, theory and modelling / M. J. Newland, A. R. Rickard, T. Sherwen [at al.] // *Atmos. Chem. Phys.* – 2018. – Vol. 18. – P. 6095–6120.
8. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer / P. S. Monks, A. T. Archibald, A. Colette at all. // *Atmos. Chem. Phys.* – 2015. – Vol. 15. – P. 8889–8973.
9. Long-term measurements of volatile organic compounds highlight the importance of sesquiterpenes for the atmospheric chemistry of a boreal forest / H. Hellén, A. P. Praplan, T. Tykkä [at al.] // *Atmos. Chem. Phys.* – 2018. – Vol. 18. – P. 13839–13863.
10. Jacob D. J. Effect of rising Asian emissions on surface ozone in the United States / D. J. Jacob, A. L. Jennifer, P. M. Prashant // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – Vol. 26. – P. 2175–2178.
11. Possanzini M. A train of carbon and DNPH-coated catridges for the determination of carbonyls from C1 to C12 in air and emission samples / M. Possanzini, V. Di Palo, E. Brancaleoni // *Atmos. Environ.* – 2000. – Vol. 34. – P. 5311–2318.
12. Hakola H. Seasonal variation of mono- and sesquiterpene emission rates of Scots pine / H. Hakola, V. Tarvainen, J. Bäck [at al.] // *Biogeosciences*. – 2006. – Vol. 3. – P. 93–101.
13. Калеух А. В. Годовая термическая зависимость эмиссии летучих веществ растений рода *Juniperus* и их компонентный состав / А. В. Калеух, Г. В. Ходаков, А. Н. Гусев // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. – 2025. – Том 11 (77), № 2. – С. 352–358.
14. Ходаков Г. В. Монотерпеновый состав растений *Artemisia balchanorum* / Г. В. Ходаков, В. Н. Устименко // *Бюллетень ГНБС*. – 2022. – Вып. 143. – С. 23–28.
15. Khodakov G. V. Component composition of essential oil from *Artemisia taurica* / G. V. Khodakov, I. V. Kotikov // *Chemistry of Natural Compounds*. – 2008. – Vol. 44. – P. 261–262.
16. Khodakov G. V. Component composition of essential oil from *Artemisia abrotanum* and *A. dracunculus* / G. V. Khodakov, I. V. Kotikov, V. N. Pankovetsky // *Chemistry of Natural Compounds*. – 2009. – Vol. 45. – P. 905–908.
17. Khodakov G. V. Component composition of essential oil from *Artemisia annua* and *A. scoparia* / G. V. Khodakov, I. V. Kotikov // *Chemistry of Natural Compounds*. – 2009. – Vol. 45. – P. 909–912.

OXYGENATED BIOLOGICAL VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS OF REPRESENTATIVES OF CONIFEROUS AND FLOWERING PLANTS OF CRIMEAN FLORA

Kaleuch A. V.¹, Khodakov G. V.^{1, 2}, Gusev A. N.²

¹*Kherson Technical University, Genichsk, Russia*

²*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

E-mail: gennadii-hodakov@mail.ru

The component composition of VOCs for plants of the *Pinus pallasiana* species collected in the form of essential oil was determined. The essential oil in the amount of 0.5 ml (yield: 0.25 %) was separated into components by mass chromatography and their structure was determined. The dominant components are two monoterpenes α -, β -pinenes (41.8 %, 11.1 %, respectively) and two sesquiterpenes trans-caryophyllene, germacrene D (10.1 %, 20.8 %, respectively). For conifers of the *Pinus pallasiana* species, as well as for two Crimean species of the genus *Juniperus* and angiosperms of the genus *Artemisia*,

the calculation of oxygenated monoterpene VOCs was carried out and the potential ability of plants to form secondary organic aerosol (SOA) from monoterpenes was determined.

The studied *Pinus pallasiana* and two *Juniperus* species have their own range of oxygenated monoterpene BVOC emissions, which determines their potential level of monoterpene VOA formation. The presented plants have a low level of oxygenated emissions, which is also maintained for the calculated oxygenation degrees developed by us.

The flowering plants of the *Artemisia taurica*, *A. abrotanum* and *A. annua* species have a high potential for VOA formation. Their BVOC include a level of oxygenated monoterpenes in the quantitative range from high to very high. *A. balchanorum* is behind them in the range with an average level. *A. dracunculus* and *A. scoparia* have a low level.

The calculated value of the degree of oxygenation for five plant species maintains the same range of values as the range of values for the content, including *Artemisia taurica*, *A. abrotanum*, *A. annua*, *A. dracunculus* and *A. scoparia*. For *A. balchanorum*, the range shifted higher from medium to high and very high. The differences are due to the fact that the content of oxygenated monoterpene BVOCs is given as a quantitative characteristic of the total emission, and the degree of oxygenation evaluates the oxidative capacity at the cellular level (in pyroxisomes). As a result, these two characteristics fully evaluate the ability of plants to emit oxygenated monoterpene BVOCs and describe the important potential of plants to participate in the formation of SOA.

Keywords: *Pinus pallasiana*, genus *Juniperus*, genus *Artemisia*, mass chromatographic method, oxygenated BVOCs of monoterpene nature, secondary organic aerosols.

References

1. Khodakov G. V., *Biosphere substances of terpene nature*, 418 p. (Polyprint, Simferopol, 2023). (in Russ.).
2. Seinfeld J. H., Pandis S. N., *Atmospheric composition, global cycles, and lifetimes*. In *Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change*, P. 49–124 (John Wiley & Sons, Inc., New York 1998).
3. Atkinson R., Baulch D. L., Cox R. A., Hampson R. F., Kerr J. A., Rossi M. J., Troe J., Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Supplement VI, *Journal of Physical and Chemical Reference*, **26**, 1329 (1997).
4. Shexia Ma., Production of Secondary Organic Aerosol from Multiphase Monoterpenes, *Atmospheric Aerosol-Regional Characteristics-Chemistry and Physics*, 492 p. (Texas A&M University, Kingsville, 2012).
5. Khodakov G. V., Ustimenko V. N., Influence of plastid membrane on the formation kinetics of monoterpenes hydrocarbons of plants of the genus *Artemisia* L., *Bulletin of the State Nikitsky Botanical Gardens*, **142**, 26 (2022). (in Russ.).
6. Camel V., Caude M., Trace enrichment methods for the determination of organic pollutants in ambient air, *Journal of Chromatography A*, **710**, 3 (1995).
7. Newland M. J., Rickard A. R., Sherwen T., Evans M. J., Vereecken L., Muñoz A., Ródenas M., Bloss W. J., The atmospheric impacts of monoterpene ozonolysis on global stabilised Criegee intermediate budgets and SO₂ oxidation: experiment, theory and modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 6095 (2018).
8. Monks P. S., Archibald A. T., Colette A., Cooper O., Coyle M., Derwent R., Fowler D., Granier C., Law K. S., Mills G. E., Stevenson D. S., Tarasova O., Thouret V., von Schneidemesser E., Sommariva R., Wild O., Williams M. L., Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer, *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 8889 (2015).

9. Hellén H., Praplan A. P., Tykkä T., Ylivinkka I., Vakkari V., Bäck J., Petäjä T., Kulmala M., Hakola H., Long-term measurements of volatile organic compounds highlight the importance of sesquiterpenes for the atmospheric chemistry of a boreal forest, *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 13839 (2018).
10. Jacob D. J., Jennifer A. L., Prashant P. M., Effect of rising Asian emissions on surface ozone in the United States, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2175 (1999).
11. Possanzini M., Di Palo V., Brancaloni E., A train of carbon and DNPH-coated catridges for the determination of carbonyls from C1 to C12 in air and emission samples, *Atmos. Environ.*, **34**, 5311 (2000).
12. Hakola H., Tarvainen V., Bäck J., Ranta H., Bonn B., Rinne J., Kulmala M., Seasonal variation of mono- and sesquiterpene emission rates of Scots pine, *Biogeosciences*, **3**, 93 (2006).
13. Kaleuch A. V., Khodakov G. V., Gusev A. N., Annual thermal dependence of volatile substances emission from plants of the genus *Juniperus* and their component composition, *Scientific Notes of V.I.Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **11 (77)**, **2**, 352 (2025). (in Russ.).
14. Khodakov G. V., Ustimenko V. N., Monoterpene composition of *Artemisia balchanorum* Krasch. plants, *Bulletin of the State Nikitsky Botanical Gardens*, **143**, 23 (2022). (in Russ.).
15. Khodakov G. V., Kotikov I. V., Component composition of essential oil from *Artemisia taurica*, *Chemistry of Natural Compounds*, **44**, 261 (2008).
16. Khodakov G. V., Kotikov I. V., Pankovetsky V. N., Component composition of essential oil from *Artemisia abrotanum* and *A. dracunculus*, *Chemistry of Natural Compounds*, **45**, 905 (2009).
17. Khodakov G. V., Kotikov I. V., Component composition of essential oil from *Artemisia annua* and *A. scoparia*, *Chemistry of Natural Compounds*, **45**, 909 (2009).