

БОТАНИКА

Научная статья

УДК 581.192 (470.53)

EDN: LMHWON

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-369-382



**Растения травяно-кустарничкового яруса сосняков
зеленомошной и травяной групп типов леса ООПТ «Осинская
лесная дача» как источник летучих органических соединений**

**В. Л. Спирина¹, П. Ю. Сарапульцева¹ А. А. Зайцев¹, Л. В. Новоселова¹,
В. А. Исидоров²**

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²Белостокский технический университет, Белосток, Польша

Автор, ответственный за переписку: Виктория Леонидовна Спирина, victoria45winter@mail.ru

Аннотация. С целью определения компонентов летучих выделений растений травяно-кустарничкового яруса, входящих в общее количество летучих органических соединений (ЛОС) пограничного слоя атмосферы, установлен качественный состав ЛОС девяти видов растений (*Ledum palustre* L., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng, *Vaccinium myrtillus* L., *Oxycoccus palustris* Pers., *Rubus saxatilis* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton, *Aegorodium podagraria* L., *Asarum europaeum* L., *Lycopodium complanatum* L.), собранных на особо охраняемой природной территории «Осинская лесная дача». По результатам химического анализа идентифицировано более 100 различных органических соединений девяти классов. Установлено, что основной вклад в эмиссию приходится на долю терпенов, которые обладают высокой реакционной способностью и могут принимать участие в процессах радикального газофазного окисления. Проведен сравнительный анализ ЛОС, выделяемых *Vaccinium myrtillus* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton и *Asarum europaeum* L., собранных на одной и той же территории в разные годы. Отмечено существенное различие в составах монотерпенов и сесквитерпенов, выделяемых этими группами растений.

Ключевые слова: растения травяно-кустарничкового яруса, летучие органические соединения, эмиссия, твердофазная микроэкстракция, ГХ-МС

Для цитирования: Растения травяно-кустарничкового яруса сосняков зеленомошной и травяной групп ООПТ «Осинская лесная дача» как источник реактивных летучих органических соединений / В. Л. Спирина, П. Ю. Сарапульцева А. А. Зайцев, Л. В. Новоселова, В. А. Исидоров // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 369–382. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-369-382>.

BOTANY

Original article

**Plants of the herbaceous-shrub layer in Specially Protected
Natural Area the Osinskaya lesnaya dacha as a source of reactive
volatile organic compounds**

**V. L. Spirina¹, P. Yu. Sarapultseva¹, A. A. Zaitsev¹, L. V. Novoselova¹,
V. A. Isidorov²**

¹Perm State University, Perm, Russia

²Bialystok Technical University, Bialystok, Poland

Corresponding author: Victoria L. Spirina victoria45winter@mail.ru

Abstract. In order to further assess the contribution of volatile emissions from herbaceous-shrub layer plants to the total amount of volatile organic compounds (VOCs) in the atmospheric ground layer, the qualitative composition of VOCs was determined for nine plant species (*Ledum palustre* L., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng, *Vaccinium myrtillus* L., *Oxycoccus palustris* Pers., *Rubus saxatilis* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton, *Aegorodium podagraria* L., *Asarum europaeum* L., *Lycopodium complanatum* L.) selected from the Osinskaya Lesnaya Dacha specially protected natural area. Based on the results of chemical analysis, more than 100 different organic compounds of nine classes were identified. Terpenes were identified as the main emission

source. They are highly reactive and able to participate in radical gas-phase oxidation processes. Based on the results of the study, we performed a comparative analysis of the volatile organic compounds emitted by *Vaccinium myrtillus* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton, and *Asarum europaeum* L. with all specimens collected from the same location in May, with a two-year interval between sampling events. A significant difference was noted in the composition of monoterpenes and sesquiterpenes emitted by these plant groups.

Keywords: plants of the herbaceous-shrub layer, volatile organic compounds, emission, solid-phase microextraction, GC-MS

For citation: Spirina V. L., Sarapultseva P. Yu., Zaitsev A. A., Novoselova L. V., Isidorov V. A. Plants of the herbaceous-shrub layer in Specially Protected Natural Area the Osinskaya lesnaya dacha as a source of reactive volatile organic compounds]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 369-382. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-369-382>.

Введение

Ежегодные глобальные выбросы летучих органических соединений (ЛОС), выделяемых в основном растениями суши, составляют около 1 Гт. В них входят преимущественно изопрен (2-метил-1,3-бутадиен, 50%), монотерпены ($C_{10}H_{16}$, 15%) и сесквитерпены ($C_{15}H_{24}$, 3%), а также соединения в виде неизопреноидов, например, около 10% метанола и другие [Stocker et al., 2013].

ЛОС играют важную роль в атмосферных процессах, протекающих в пограничном слое атмосферы, участвуя в формировании его окислительного потенциала, оптических свойств и радиационного баланса [Hester, Harrison, 1995; Atkinson, 2000; Glasius et al., 2016]. Примесями атмосферы являются, помимо других, биогенные соединения (моно-, сесквитерпены и их кислородсодержащие производные), которые легко вступают в реакции с озоном, радикалами $\cdot OH$ и $\cdot NO_3$ (рис. 1) [Белан, 2010; Isidorov et al., 2022]. Терпеновые соединения могут принимать участие в образовании вторичных атмосферных аэрозолей, рассеивающих и поглощающих солнечную радиацию [Heald et al., 2010; Makkonen et al., 2012; Glasius, Goldstein, 2016; Kourtev et al., 2016; Isidorov, 2022]. Накоплены обширные сведения о составе и скоростях эмиссии биогенных ЛОС практически всех видов лесобразующих древесных растений [Isidorov et al., 1985; Shao et al., 2001; Komenda, Koppmann, 2002; Komenda et al., 2003; Tarvainen et al., 2005; Grabmer et al., 2006; Filella et al., 2007; Hakola et al., 2023].

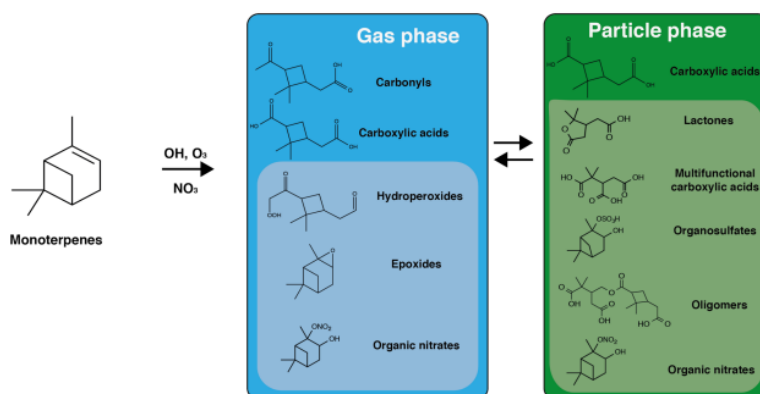


Рис. 1. Продукты реакций монотерпенов с радикалами в газовой фазе и фазе частиц [Glasius, Goldstein, 2016]

[Reaction products of monoterpenes with radicals in the gas phase and particle phase [Glasius, Goldstein, 2016]]

Методика определения скорости эмиссии изопрена и терпенов в хвойных лесах различных районов СССР представлена в работе В.А. Исидорова [Isidorov, Zenkevich, Ioffe, 1985]. Она заключается в концентрировании соединений, выделяемых растениями, в сорбционных трубках, последующей термодесорбции компонентов в капиллярную колонку, их газовой-хромато-масс-спектрометрической идентификации и количественном определении при помощи пламенно-ионизационного детектора. Изучен качественный состав ЛОС, продуцируемых 22 видами растений, характерных для лесов Северного полушария (17 видов древесных пород (*Salix pentandra* L., *Populus tremula* L., *Populus balsamifera* L., *Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth и другие) и 5 видов травяно-кустарничкового яруса (*Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium myrtillus* L., *Ledum palustre* L. и др.)). Перечень идентифицированных соединений включает более 70 веществ различных классов (парафины и непредельные УВ, спирты, простые и сложные эфиры, карбонильные соединения, фураны и галогенированные соединения). Было установлено, что основными компонентами (около 80%) летучих выбросов хвойных пород являются терпены, а именно α -пинен, 3-карен, камфен, лимонен и др. Определена интенсивность эмиссии изопрена и терпенов для некоторых

древесных пород. Скорости эмиссии терпенов и изопрена для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) составили от 0.5 до 20 мкг/(г·ч). Определены средние концентрации терпенов в хвойных лесах различных регионов СССР. Суммарные концентрации терпенов в воздухе хвойных лесов обычно колеблются от 3.5 до 35 мкг⁻³. Было отмечено сильное влияние метеорологических условий на интенсивность эмиссии и концентрацию терпенов в воздухе в лесном массиве.

Тем не менее, эмиссия ЛОС лесными экосистемами в настоящее время остается недостаточно изученной [Isidorov, 1990; Mogensen et al., 2015; Yang et al., 2016; Zhou et al., 2017; Praplan et al., 2020].

Наиболее крупным источником реакционноспособных биогенных ЛОС в Северном полушарии являются леса бореального и умеренного поясов [Isidorov, 1992; Guenther et al., 1995; van Meeningen et al., 2017; Isidorov, Zaitsev, 2022]. Согласно Таблицам и моделям хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии, фитомасса растений травяно-кустарничкового и напочвенного ярусов в 20-летних сосновых насаждениях 2 класса бонитета в горных средне- и южнотажных регионах Урала составляет (в среднем) 1.8 т·га⁻¹, увеличиваясь до 5.4 т·га⁻¹ в возрасте 100 лет, в 20-летних ельниках составляют 0.3 т·га⁻¹, в 100-летних ельниках – 0.8 т·га⁻¹ [Таблицы и модели..., 2008].

В обзоре [Isidorov, Zaitsev, 2022] рассматриваются различные источники биогенных ЛОС под пологом леса в бореальных и умеренных природных экосистемах Северного полушария. Авторы, опираясь на исследования различных ученых, отмечают, что современные химические транспортные модели не учитывают вклад природных источников, например, такого как опад, в образование озона и вторичных загрязняющих нижнюю атмосферу веществ. Исследователи отмечают, что было проведено множество измерений скорости эмиссии ЛОС как для свежей листвы отдельных растений, так и для различных растительных сообществ. В частности, в обзоре, охватывающем период с 1979 по 1997 гг., приведены 314 значений скорости эмиссии изопрена и монотерпенов, опубликованные в 52 статьях. Кроме того, 126 значений скорости эмиссии 39 нетерпеновых соединений более чем 50 видами растений опубликованы с 1992 по 1999 год [Isidorov, Zaitsev, 2022]. Среди растений, перечисленных в этом обзоре, упомянут только один вид из семейства Ericaceae, входящий в кустарничковый ярус бореальных лесов, – голубика (*Vaccinium uliginosum*). Этот кустарник является незначительным источником изопрена. Высокое содержание монотерпенов отмечено в ЛОС кассандры (*Chamaedaphne calyculata*) и багульника (*Ledum groenlandicum*) [Isebrands et al., 1999].

Впервые результаты лабораторных экспериментов по установлению состава ЛОС, выделяемых растениями живого напочвенного покрова и травяно-кустарничкового яруса разных таксонов: моховидными, папоротниковидными, цветковыми травянистыми растениями и кустарничками – представлены в работе [Isidorov et al., 2022]. Изучаемые растения были отобраны в полосе хвойно-широколиственных (смешанных) лесов таежной зоны на востоке европейской части России в Пермском крае и в смешанных лесах средних широт на востоке Польши. Изучен качественный состав летучих выделений 1 вида лишайника (*Cladonia arbuscula*), 5 видов моховидных (*Dicranum polysetum*, *Hylocomnium splendens*, *Leucobrium glaucum*, *Pleurozium schreberi*, *Sphagnum phallax*), 1 вида папоротников (*Pteridium aquilinum*), 2 видов цветковых травянистых растений (*Asarum europaeum* и *Antennaria dioica*) и 2 представителей кустарничков (*Vaccinium myrtillus* и *Chimaphilla umbellata*). Для всех растений характерна эмиссия терпенов и терпеноидов, представленных 112 соединениями, вторую по численности группу (35 веществ) образовывали карбонильные соединения. Все представители этих таксонов обладают высокой реакционной способностью, вследствие чего легко вступают в реакции с радикалами [•]ОН, [•]NO₃ и другими оксидами азота с образованием вторичных примесей атмосферы различного характера, таких как озон и различные пероксиды [Atkinson, 2002; Atkinson, Arey, 2003].

Таким образом, экспериментально подтверждается, что растения травяно-кустарничкового яруса являются неучтенным источником большого числа разнообразных ЛОС, состав которых изучен лишь частично, поэтому целью данного исследования является установление качественного состава ЛОС, выделяемых в атмосферу растениями травяно-кустарничкового яруса лесов Пермского края.

Объекты и методика исследования

Объектом исследования явились лесные растения, произрастающие на территории особо охраняемой природной территории регионального значения «Осинская лесная дача», которая находится в границах кварталов 1–130 Осинского участкового лесничества Осинского лесничества Пермского края¹. Схема расположения мест сбора объектов исследования представлена на рис. 2. Координаты места отбора проб

¹ Приказ Министерства природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края от 09.01.2017 № СЭД-30-01-02-2365 "Об утверждении Положений об особо охраняемых природных территориях регионального значения Осинского муниципального района Пермского края".

(57°16'N, 55°09'E). Авторами сбора растений и геоботанических описаний были А.А. Зайцев, Е.Л. Гатина, И.Ф. Абдулманова.

Территория представляет собой древние террасы р. Камы, которые четко прослеживаются в направлении с запада на восток. В геоморфологическом отношении поверхность представляет собой плато размыва. Основные формы рельефа представлены эрозионными образованиями: речные долины с комплексом аккумулятивных форм (поймы, террасы), овраги и балки [Андреев, 2012].

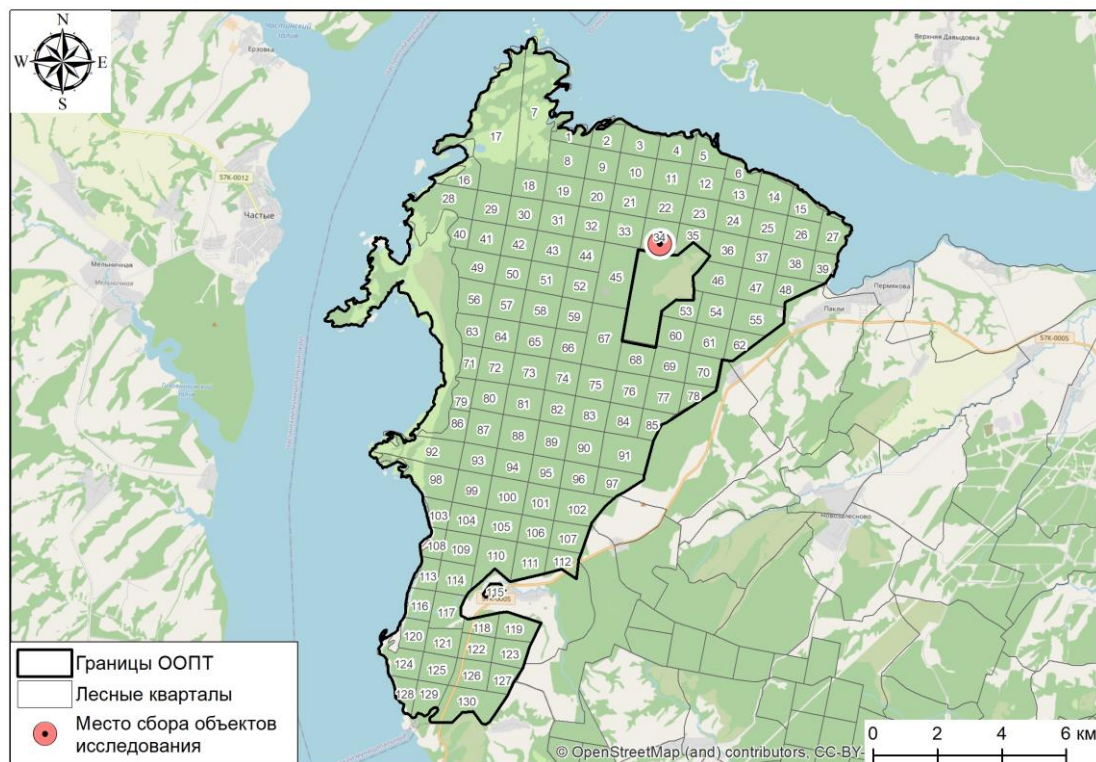


Рис. 2. Место сбора объектов исследования (квартал 34) на схеме охраняемого ландшафта [Особо охраняемые природные территории ..., 2017]

[Geographical location of plant selection areas [Buzmakov, 2017]]

На большей части территории «Осинской лесной дачи» расположены сосновые леса естественного и искусственного (культуры) происхождения. На юге территории фрагментарно развиты темнохвойные сообщества, прежде всего еловые. В западной части ООПТ, на низовых болотах произрастают березняки с примесью сосны. Выделены лесные генетические резерваты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.).

Наиболее распространенными типами леса на охраняемой территории являются сосняки зеленомошные, сосняки брусничные, сосняки войничково-костяничные. Сосняки зеленомошные встречаются в центральной части ООПТ. Здесь древесный ярус редкий, сформирован в основном сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) с участием березы повислой (*Betula pendula* Roth) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) (формула древостоя 9С1Б+Л). Средняя высота древостоя 20–22 м, сомкнутость крон 0.3–0.4. В подросте преобладает лиственница сибирская. В подлеске представлена рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.). Доминантом травяно-кустарничкового яруса является костяника обыкновенная (*Rubus saxatilis*). Проективное покрытие травянистых растений не превышает 30%, средняя высота растений 10–20 см. Среди мхов преобладают плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt) и виды рода дикранум (*Dicranum polysetum* Sw.). Проективное покрытие мохового яруса достигает 50%.

В сосняке брусничном древесный ярус сформирован в основном сосной обыкновенной и единично березой повислой (формула древостоя 10С+Б). Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса не превышает 40%, средняя высота растений 10–15 см. Доминантами яруса являются типичные представители светлых лесов: брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и костяника обыкновенная (*Rubus saxatilis*). Проективное покрытие мхов составляет 50% с преобладанием плевроциума Шребера.

Сосняк войничково-костяничный характеризуется разреженным древесным ярусом и сформирован в основном сосной обыкновенной, единично в нем встречается береза повислая. Состав древостоя 8С2Б,

высота древесного яруса 18–20 м, он редкий, с сомкнутостью крон 0.2. В подросте присутствует только подрост березы повислой. Кустарниковый ярус образован в основном ракитником русским (*Chamaecytisus ruthenicus* Klask.). Доминантами травяно-кустарничкового яруса являются вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth) и костяника обыкновенная (*Rubus saxatilis*). Средняя высота растений 10–15 см, проективное покрытие трав 40%. Моховой ярус представлен пятнами с общим проективным покрытием в 30% и преобладанием лесного плеуроциума Шребера.

Во второй декаде мая 2022 года были собраны кустарнички семейства Ericaceae: клюква обыкновенная (*Oxycoccus palustris* Pers.), черника (*Vaccinium myrtillus* L.), толокнянка обыкновенная (*Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng), багульник болотный (*Ledum palustre* L.); Pyrolaceae – зимостружка зонтичная (*Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton); Rosaceae – костяника (*Rubus saxatilis* L.). Также представлены травянистые многолетние растения: копытень европейский (*Asarum europaeum* L.) семейства Aristolochiaceae, сныть обыкновенная (*Aegorodion podagraria* L.) семейства Apiaceae и один вид из семейства Lycopodiaceae – плаун уплощенный (*Lycopodium complanatum* L.). Для идентификации растений использован Иллюстрированный определитель растений Пермского края [2007].

Сбор типичных растений со средними показателями развития проводился в фенофазу начала цветения и один вид – *Lycopodium complanatum* L. – в фенофазу вегетации, в наиболее распространенных типах соснового леса – зеленомошном, вейниково-костяничном, брусничном и мертвопокровном. Общее руководство осуществлял А.А. Зайцев.

Растения выкапывали с корнями и после удаления остатков почвы помещали в открытые стеклянные емкости с раствором Кнопа [Прянишников, 1965]. Отобранные пробы использовали в течение суток для определения состава выделяемых ЛОС. Все пробы были собраны в один день и доставлены в лабораторию химического факультета ПГНИУ в г. Пермь

Методика эксперимента

Растения извлекали из раствора Кнопа, помещали в стеклянную емкость объемом 0.75–1 л, закрывали крышкой с отверстием для ввода сорбционного волокна через силиконовую мембрану и оставляли на 1 ч при комнатной температуре и полном дневном свете (рис. 3). Процедуру проводили параллельно 3 раза для каждого вида растения. Затем в емкость вводили подготовленное волокно с неподвижной фазой ДВБ/КАР/ПДМС и выдерживали в течение 1 ч, периодически встряхивая емкость. Десорбцию ЛОС с волокна проводили в течение 15 мин в нагретом до 260°C испарителе газowego хроматографа Agilent 7890В с трехосевым детектором 5977А MSD (Agilent Technologies, США) и капиллярной колонкой HP-5MS (30 м, внутренний диаметр 0.25 мм, толщина пленки стационарной фазы 0.25 мкм) с электронным контролем давления и инжектором в режиме без деления потока. Хроматографирование проводили в следующих условиях: скорость потока гелия – 1 мл/мин; начальная температура колонки – 40°C, конечная – 200°C, скорость нагрева – 3°C/мин.

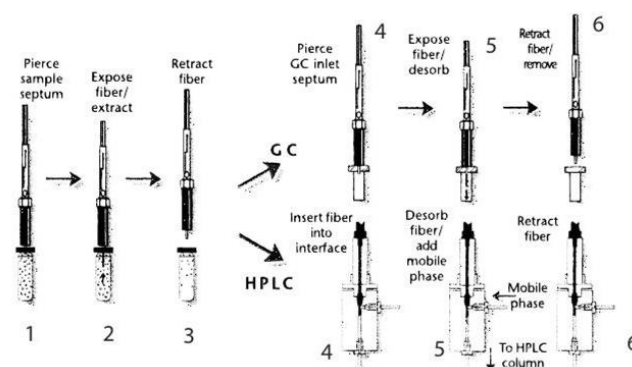


Рис. 3. Процедура твердофазной микроэкстракции [Другов, Родин, 2020]

- 1 – прокол мембраны пробы; 2 – погружение сорбционного стержня (сорбция) в пробу; 3 – извлечение сорбционного стержня из пробы; 4 – прокол иглы в испарителе газowego хроматографа (ГХ); 5 – погружение сорбционного стержня (десорбция) в испаритель ГХ; 6 – извлечение сорбционного стержня из ГХ

[Solid-phase technique [Drugov, Rodin, 2020]

- 1 – sample vial septum puncture; 2 – immersion of the sorption rod into the sample (sorption step); 3 – retraction of the sorption rod from the sample; 4 – puncture of the gas chromatograph (GC) inlet septum; 5 – immersion of the sorption rod into the GC inlet (desorption); 6 – retraction of the sorption rod from the GC]

Для расчета линейных индексов удерживания (RI) анализировали в идентичных условиях смесь *n*-алканов C₆–C₁₈.

Обработку полученных хроматограмм выполняли с применением программного обеспечения Agilent ChemStation OpenLab. Идентификацию органических компонентов осуществляли с использованием двух независимых аналитических параметров: масс-спектров и значений экспериментально рассчитанных линейных индексов удерживания (RI) – с помощью автоматической системы, снабженной библиотекой масс-спектров NIST MS Search 2.4, а также онлайн базы данных The NIST Chemistry WebBook (<http://webbook.nist.gov/>). Идентификацию считали достоверной, если результаты поиска в библиотеке масс-спектров подтверждались экспериментальными значениями RI, т. е. их отклонение от значений, опубликованных в базе данных, не превышало ± 10 ед. Относительное содержание компонентов определяли после интегрирования пиков на кривой полного ионного тока (ПИТ) как отношение площади пика к суммарной площади всех пиков. Содержание компонентов, площадь пиков которых составляла менее 0.1%, считали следовым.

Результаты и обсуждение

Пример хроматограммы ЛОС, выделяемых живым растением черники *Vaccinium myrtillus* представлен на рис. 4. Суммарно на хроматограммах девяти видов растений зарегистрировано 301 соединение. Максимальное число соединений зафиксировано в ЛОС *Rubus saxatilis* и *Aegorodium podagraria* (63 и 60 пиков соответственно), а минимальное – *Arctostaphylos uva-ursi* и *Oxycoccus palustris* (11 и 10 пиков соответственно). Анализ хроматограмм, полученных для отдельных экземпляров одного вида, показал, что выделения растений имеют идентичный качественный состав (количество и расположение пиков воспроизводится).

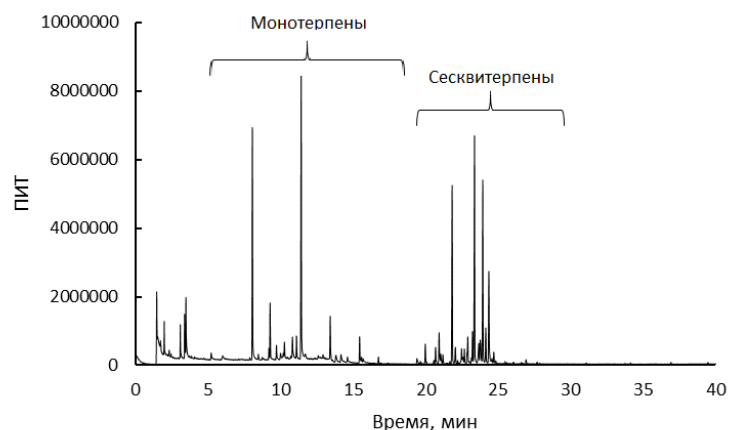


Рис. 4. Хроматограмма летучих выделений *Vaccinium myrtillus*

[Chromatogram of volatile emissions of *Vaccinium myrtillus*]

Наибольшее количество идентифицированных соединений относится к группе терпенов, включающей 37 монотерпенов C_{10} , 107 сесквитерпенов C_{15} и 3 дитерпена C_{20} (последние соединения обнаружены только в летучих выделениях кустарничка *Chimaphila umbellata*). Вторая по численности группа из 33 соединений была образована ароматическими углеводородами.

Соединения, зарегистрированные в летучих выделениях всех девяти растений живого напочвенного покрова, были объединены по их химической природе в 11 групп, относительное содержание которых, а также главных представителей каждой из них приведено в табл. 1. и 2.

Таблица 1

Относительный групповой состав (% ПИТ*) ЛОС, выделяемых кустарничками
[Relative group composition of VOCs emitted by low shrubs]

Группы соединений	Относительное содержание ЛОС в выделениях кустарничков					
	1	2	3	4	5	6
Монотерпены и их производные, в том числе:	2.59	57.55	1.24	6.91	-^{3*} (3)	49.99
	(2)^{2*}	(2)	(2)	(24)		(10)
- β-мирцен	2.12	55.56	следы ^{4*}	3.65	-	46.54
- лимонен	0.47	1.98	-	3.26	-	-
- α-фелландрен	-	-	-	-	-	-
- β-фелландрен	-	-	0.84	-	-	0.19

Группы соединений	Относительное содержание ЛОС в выделениях кустарничков					
	1	2	3	4	5	6
Сесквитерпены и их производные, в том числе:	84.84 (16)	30.63 (5)	10.46 (11)	73.29 (24)	31.42 (3)	47.36 (20)
- α-фунебрен	57.76	-	-	-	13.19	-
- палюстрол	13.20	18.39	-	7.87	-	22.35
- виридофлорен	3.53	1.78	-	-	9.72	9.05
- аллоаромадендрен	0.54	4.83	-	-	-	5.89
- α-гуржунен	-	3.22	-	-	-	3.95
- транс-каламенен	-	-	2.66	13.95	8.51	0.18
- кариофиллен	-	-	1.14	9.64	-	-
- глобулол	2.47	2.41	-	-	-	3.88
Дитерпены, в том числе:	6.59 (3)	-	-	-	-	-
- цис-цеибрен А	0.50					
- неоцеибрен А	1.83					
Алифатические спирты, в том числе:	-	-	0.99 (1)	-	-	-
- 2-гептанол	-	-	0.99	-	-	-
Алифатические карбонильные соединения, в том числе:	-	2.04 (1)	0.49 (1)	-	-	-
- 3-октанон	-	2.04	-	-	-	-
- 2-гептанон	-	-	0.49	-	-	-
Алифатические кислоты, в том числе:	-	-	12.72 (3)	-	-	-
- гексановая кислота	-	-	3.75	-	-	-
- октановая кислота	-	-	7.35	-	-	-
Ароматические соединения, в том числе:	2.42 (3)	-	29.06 (7)	0.88 (1)	38.07 (4)	0.48 (4)
- бензойная кислота	-	-	16.28	-	-	-
- бензамид	-	-	6.60	-	-	-
- толуол	-	-	-	-	23.44	-
- о-ксилол	-	-	-	0.88	4.14	-
- п-ксилол	-	-	-	trace	4.22	-
- м-цимол	-	-	-	trace	-	0.23
Алканы и алкены, в том числе:	1.43 (3)	1.98 (1)	-	17.59 (3)	-	0.11 (1)
- 1,3-октадиен	-	-	-	9.43	-	-
- додекан	0.71	1.98	-	7.01	-	0.11
- тетрадекан	0.72	-	-	1.15	-	-
Другие соединения	-	-	15.27 (4)	-	3.82 (1)	0.74 (1)
Не идентифицированные соединения	2.12 (2)	7.80 (1)	49.51 (10)	1.32 (1)	26.70 (3)	1.32 (5)
Общее число соединений	30	10	63	35	11	41

Примечания: *ПИТ – полный ионный ток, ^{2*} – число соединений в группе приведено в скобках; ^{3*} – не обнаружено; ^{4*} следы – ниже 0.1% ПИТ. Цифрами обозначены кустарнички: 1 – *Chimaphila umbellata*; 2 – *Oxycoccus palustris*; 3 – *Rubus saxatilis*; 4 – *Vaccinium myrtillus*; 5 – *Arctostaphylos uva-ursi*; 6 – *Ledum palustre*.

Таблица 2

Относительный групповой состав (% ПИТ*) ЛОС, выделяемых растениями
[Relative group composition of VOCs emitted by plants]

Группа соединений	Травянистые растения и плаун		
	1	2	3
Монотерпены и их производные, в том числе	20.11 (6) ^{2*}	40.47 (9)	38.98 (13)
- β-мирцен	- ^{3*}	12.15	11.29
- лимонен	-	-	11.25
- α-фелландрен	-	12.66	-

Группа соединений	Травянистые растения и плаун		
	1	2	3
- β-фелландрен	4.23	13.43	-
- 3,7,7-триметил-1,3,5-циклогептатриен	7.06	-	-
- 3-карен	5.76	-	-
- α-пинен	3.08	следы ^{4*}	1.48
Сесквитерпены и их производные, в том числе	57.45 (5)	18.44 (16)	51.97 (37)
- α-фунебрен	51.54	-	-
- палюстрол	2.85	-	1.43
- виридофлорен	1.08	-	5.21
- купарен	0.98	-	0.59
- аллоаромадендрен	-	-	2.28
- транс-каламенен	-	5.30	7.86
- цис-муrola-4(14),5-диен	-	1.92	1.10
- γ-муrolен	-	2.43	2.08
Алифатические карбонильные соединения, в том числе	-	-	следы (1)
- 3-октанон	-	-	следы
Алифатические кислоты, в том числе	-	4.43 (3)	-
- этановая кислота	-	2.87	-
- пентановая кислота	-	1.56	-
Алифатические эфиры, в том числе	следы	23.04 (2)	-
- 3-гидрокси-2,2,4-триметилпентилизобутаноат	следы	12.19	-
2,2-диметил-1-(2-гидрокси-1-метилэтил)пропил-2-метилпропаноат	-	8.84	-
Ароматические соединения, в том числе	19.29 (5)	12.77 (2)	3.61 (4)
- бензойная кислота	следы	-	-
- толуол	13.85	-	-
- o-цимол	-	11.02	-
- m-цимол	0.95	-	1.59
- n-цимол	4.49	-	-
- m-цименен	следы	-	1.05
- n-цименен	-	-	0.97
Алканы & алкены	3.15 (1)	-	2.68 (3)
- додекан	-	-	0.34
- тридекан	-	-	1.98
- тетрадекан	-	-	0.36
Другие соединения	-	0.86 (1)	1.38 (1)
Не идентифицированные соединения	-	-	1.38 (1)
Число соединений	18	34	60

Примечания: *ПИТ – полный ионный ток, ^{2*} – число соединений в группе приведено в скобках; ^{3*} – не обнаружено; ^{4*} следы – ниже 0.1% ПИТ. Цифрами обозначены растения: 1 – *Lycopodium complanatum*; 2 – *Asarum europaeum*; 3 – *Aegorodium podagraria*.

На рис. 5 представлено относительное содержание (в % от ПИТ) монотерпенов, сесквитерпенов и ароматических соединений.

Как видно из данных табл. 1 и 2 и рис. 5, выход монотерпенов в газовую фазу отмечен у 8 из 9 исследованных растений. В составе ЛОС толокнянки *Arctostaphylos uva-ursi* монотерпены не были обнаружены. Наибольшее относительное содержание этих веществ установлено в выделениях *Oxycoccus palustris*

и *Ledum palustre*. Основными представителями монотерпенов являются β -мирцен, лимонен, α -фелландрен и β -фелландрен.

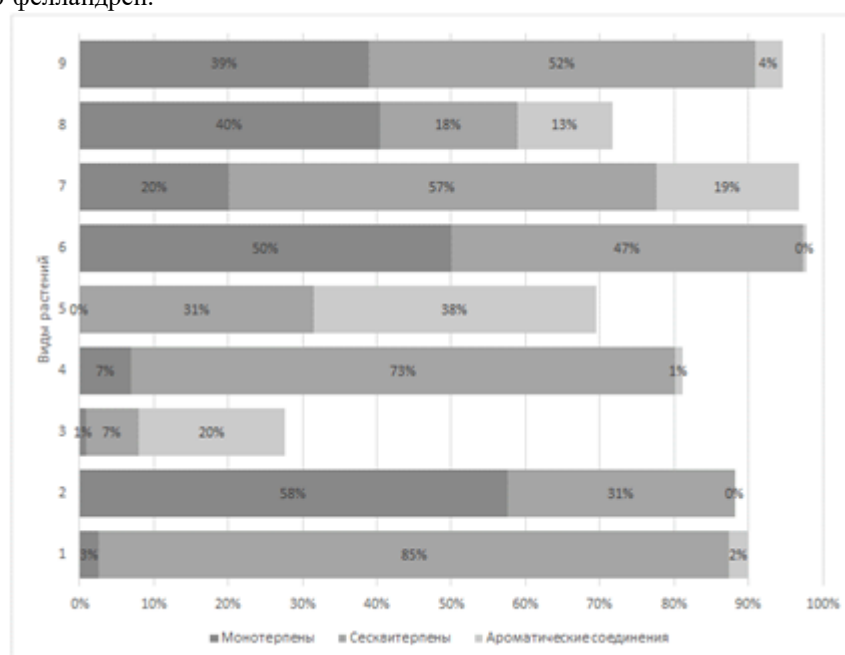


Рис. 5. Соотношение монотерпенов, сесквитерпенов и ароматических соединений в ЛОС исследуемых растений.

Цифрами обозначены: 1 – *Chimaphila umbellata*; 2 – *Oxycoccus palustris*; 3 – *Rubus saxatilis*; 4 – *Vaccinium myrtillus*; 5 – *Arctostaphylos uva-ursi*; 6 – *Ledum palustre*; 7 – *Lycopodium complanatum*; 8 – *Asarum europaeum*; 9 – *Aegorodium podagraria*

[The ratio of monoterpenes, sesquiterpenes and aromatic compounds of VOCs of the studied plants]]

В летучих выделениях всех исследованных видов растений присутствовали сесквитерпены и их кислородсодержащие производные. В ЛОС *Chimaphila umbellata* и *Vaccinium myrtillus* отмечено наибольшее относительное содержание соединений данной группы. Соединения α -фунебрен и палюстрол преобладают в эмиссии *Chimaphila umbellata*, а транс-каламенен и кариофиллен – в *Vaccinium myrtillus*. Другие представители этого класса – это виридофлорен, аллоаромадендрен и глобулол.

Наиболее богатым источником ароматических соединений, важных с точки зрения участия в атмосферных химических процессах, в том числе в образовании вторичных аэрозолей, оказались кустарнички семейства *Ericaceae* и травянистые растения. Арены обнаружены в ЛОС восьми из девяти исследованных растений. На хромато-масс-спектрограмме *Oxycoccus palustris* они отсутствовали. Напротив, в выделениях *Arctostaphylos uva-ursi* и *Rubus saxatilis* преобладают толуол и бензойная кислота соответственно. Другие ароматические соединения, отмеченные на хромато-масс-спектрограммах, это бензамид, *o*- и *n*-ксилолы.

Стоит отметить высокую долю неидентифицированных соединений в ЛОС *Rubus saxatilis* и *Arctostaphylos uva-ursi*, что объясняется отсутствием необходимых аналитических параметров (масс-спектров и/или значений RI) в доступных базах данных.

В исследованиях 2020 г. был изучен состав ЛОС *Vaccinium myrtillus*, *Chimaphila umbellata* и *Asarum europaeum*, отобранных на той же территории ООПТ «Осинская лесная дача» во второй декаде мая 2020 года [Isidorov et al, 2022]. Методики отбора и анализа не отличались. Сравнительный анализ результатов, полученных в 2020 и 2022 гг. показал, что состав основных представителей ЛОС (моно- и сесквитерпенов и аренов) не одинаков. В составе ЛОС *Vaccinium myrtillus* в 2022 г. не обнаружен α -пинен, а среди сесквитерпенов преобладают палюстрол, транс-каламенен и γ -мурола-4(14),5-диен, в то время как в 2020 г. эти соединения не были зафиксированы. В ЛОС *Chimaphila umbellata*, отобранной в 2022 г., также обнаруживаются новые сесквитерпены: α -фунебрен, палюстрол и виридофлорен. По сравнению с 2020 г. в составе монотерпенов отсутствуют линалоол и 3-карен, но содержится мирцен.

Похожая картина наблюдается и в случае *Asarum europaeum* – в летучих выделениях 2022 г. в составе монотерпенов отсутствует мирцен и 3-карен, однако впервые обнаружены α - и β -фелландрен. Среди сесквитерпенов, выделяемых растением в 2020 г., преобладают α -гумулен, δ -кадинен и гермакрен D, которые в 2022 г. сменяются транс-каламененом и γ -муролоном.

Заключение

Анализ ЛОС, выделяемых растениями травяно-кустарничкового яруса лесных насаждений – сосняков зеленомошной и травяной групп типов леса, произрастающих на ООПТ «Осинская лесная дача», показал, что основными представителями являются моно-, сесквитерпены и их кислородсодержащие производные. Наибольшее число монотерпенов (13) идентифицировано в выделениях *Aegorodium podagraria*, а их максимальное содержание (49,99 %) отмечено в ЛОС *Ledum palustre*. Больше число сесквитерпенов (24) присутствует в ЛОС *Vaccinium myrtillus*, а в ЛОС *Chimaphila umbellata* наблюдается самая высокая доля сесквитерпенов (84,84%).

Сравнение данных газохроматографического анализа *Vaccinium myrtillus*, *Chimaphila umbellata* и *Asarum europaeum*, отобранных в 2020 и 2022 г., показывает, что состав соединений, выделяемых растениями в газовую фазу, отличается, что может быть связано с влиянием различных абиотических и биотических факторов на состав ЛОС. Одним из возможных направлений дальнейших исследований является определение качественного и количественного состава летучих соединений, выделяемых растениями травяно-кустарничкового яруса в различные фенологические фазы.

В источниках литературы недостаточно данных о составе ЛОС растений, произрастающих в различных географических зонах. В связи с этим необходимо расширение географии проводимых исследований, в том числе установление состава ЛОС растений из различных ботанико-географических районов.

По данным литературы, для терпеновых соединений характерна высокая вероятность образования различных атмосферных фотоокислителей и вторичных аэрозолей. Следовательно, растения живого напочвенного покрова служат источником высокореакционных ЛОС, которые, попадая в атмосферу, увеличивают их общее содержание и тем самым влияют на химические процессы в атмосфере. Для установления влияния абиотических факторов на качественный состав ЛОС растений травяно-кустарничкового яруса и оценки их вклада в общее количество пограничного слоя атмосферы требуется продолжение исследований.

Список источников

1. Андреев Д.Н. Экогеохимическая диагностика антропогенной трансформации особо охраняемых природных территорий: дис. ... канд. геогр. наук. Пермь, 2012. 164 с.
2. Белан Б.Д. Проблема тропосферного озона и некоторые результаты его измерений // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 9. С. 1184–1213.
3. Бузмаков С.А., Гатина Е.Л. Зонирование особо охраняемой природной территории «Осинская лесная дача» // Географический вестник. 2009. № 1. С. 51–55.
4. Другов Ю.С., Родин А.А. Газохроматографический анализ загрязненного воздуха: практическое руководство. М.: Лаборатория знаний, 2020. 530 с.
5. Зябченко С.С. Сосновые леса европейского Севера. Л.: Наука, 1984. 248 с. EDN: TMRNBX.
6. Иллюстрированный определитель растений Пермского края / С.А., Овеснов, Е.Г. Ефимик, Т.В. Козьминых и др.; под ред. С.А. Овеснова. Пермь: Кн. мир, 2007. 743 с.
7. Исидоров В.А. Летучие выделения растений: состав, скорость эмиссии и экологическая роль // СПб.: Алга, 1994. 188 с.
8. Особо охраняемые природные территории Пермского края / под ред. С.А. Бузмакова. Пермь: Астер, 2017. 516 с. EDN: UUQCCO.
9. Прянишников Д.Н. Популярная агрохимия. М.: Наука, 1965. 398 с.
10. Рысин Л.П. Сосновые леса Европейской части СССР. М.: Наука, 1975. 213 с. EDN: VZHYPN.
11. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. второе, доп. М., 2008. 887 с.
12. Aaltonen H. et al. Boreal pine forest floor biogenic volatile organic compound emissions peak in early summer and autumn // Agric. Forest Meteorol. 2011. Vol. 151. P. 682–691. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.12.010. EDN: YHHIHW.
13. Aaltonen H. et al. Continuous VOC flux measurements on boreal forest floor // Plant Soil. 2013. Vol. 369. P. 241–256. DOI: 10.1007/s11104-012-1553-4. EDN: LOHIAO.
14. Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NOx // Atmospheric environment. 2000. Vol. 34, № 12–14. P. 2063–2101. EDN: AETVOV.
15. Atkinson R., Arey J. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review // Atmospheric Environment. 2003. Vol. 37. P. 197–219. DOI: 10.1016/S1352-2310(03)00391-1. EDN: ERSYLN.
16. Di Carlo P. et al. Missing OH reactivity in a forest: Evidence for unknown reactive biogenic VOCs // Science. 2004. Vol. 304, № 5671. P. 722–725.
17. Filella I. et al. Volatile organic compounds emissions in Norway spruce (*Picea abies*) in response to temperature changes // Physiologia Plantarum. 2007. Vol. 130, № 1. P. 58–66.

18. Glasius M., Goldstein A.H. Recent discoveries and future challenges in atmospheric organic chemistry // *Environ. Sci. Technol.*, 2016. Vol. 50, № 6. P. 2754–2764. DOI: 10.1021/acs.est.5b05105. EDN: WVGQZT.
19. Grabmer W. et al. VOC emissions from Norway spruce (*Picea abies* L.[Karst]) twigs in the field—results of a dynamic enclosure study // *Atmospheric Environment*. 2006. Vol. 40. P. 128–137.
20. Gray C.M., Monson R.K., Fierer N. Emission of volatile organic compounds during the decomposition of plant litter // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. Art. G03015. DOI: 10.1029/2010JG001291. EDN: NBOAMR.
21. Guenther A. et al. A global model of natural volatile organic compounds emission // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100. P. 8873–8892.
22. Hakola H. et al. Emissions of volatile organic compounds from Norway spruce and potential atmospheric impacts // *Frontiers in Forests and Global Change*. 2023. Vol. 6. Art. 1116414. DOI: 10.3389/ffgc.2023.1116414. EDN: CBJRYL.
23. Heald C.L. et al. A simplified description of the evolution of organic aerosol composition in the atmosphere // *Geophysical Research Letters*, 2010. Vol. 37, № 8. Art. L08803.
24. Hester R.E., Harrison R.M. (eds.). Volatile organic compounds in the atmosphere // *Royal Society of Chemistry*. 1995. Vol. 4. Art. 140.
25. Isebrands J.D. et al. Volatile organic compound emission rates from mixed deciduous and coniferous forests in Northern Wisconsin, USA // *Atmos. Environ.* 1999. Vol. 33. P. 2527–2536. DOI: 10.1016/S1352-2310(98)00250-7. EDN: ACTBVL.
26. Isidorov V.A. Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of boreal forests: composition, emission rates, estimation of regional emission and photocatalytic transformation // *Ecol. Bull.* 1992. Vol. 42. P. 71–76.
27. Isidorov V., Jdanova M. Volatile organic compounds from leaves litter // *Chemosphere*, 2002. Vol. 48. P. 975–979. DOI: 10.1016/S0045-6535(02)00074-7. EDN: YKIWED.
28. Isidorov V.A. et al. Emission of volatile organic compounds by plants on the floor of boreal and mid-latitude forests // *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2022. Vol. 79. P. 153–166. DOI: 10.1007/s10874-022-09434-3. EDN: CJOSZN.
29. Isidorov V.A. et al. Chemical composition of volatile and extractive compounds of pine and spruce leaf litter in the initial stages of decomposition // *Biogeosciences*. 2010. Vol. 7. P. 2785–2794. DOI: 10.5194/bg-7-2785-2010. EDN: MURVGM.
30. Isidorov V.A., Vinogorova V.T., Rafałowski K. HS–SPME analysis of volatile organic compounds of coniferous needle litter // *Atmos. Environ.* 2003. Vol. 37. P. 4645–4650. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.07.005. EDN: XRWEZM.
31. Isidorov V., Vinogorova V., Rafałowski K. Gas chromatographic determination of extractable compounds composition and emission rate of volatile terpenes from larch needle litter // *J. Atmos. Chem.* 2003. Vol. 50. P. 263–278.
32. Isidorov V.A., Zaitsev A.A. Reviews and syntheses: VOC emissions from soil cover in boreal and temperate natural ecosystems of the Northern Hemisphere // *Biogeosciences Discussions*, 2022. Vol. 19. P. 4715–4746. DOI: 10.5194/bg-19-4715-2022. EDN: ORZJNM.
33. Isidorov V.A., Zenkevich I.G., Ioffe B.V. Volatile organic compounds in the atmosphere of forest // *Atmos. Environ.* 1985. Vol. 19. P. 1–8. DOI: 10.1016/0004-6981(85)90131-3. EDN: XLOFMF.
34. Komenda M. et al. Comparability of biogenic VOC emission rate measurements under laboratory and ambient conditions at the example of monoterpene emissions from Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Journal of atmospheric chemistry*. 2003. Vol. 45. № 1. P. 1–23. EDN: EQPBFL.
35. Komenda M., Koppmann R. Monoterpene emissions from Scots pine (*Pinus sylvestris*): field studies of emission rate variabilities // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2002. Vol. 107. № D13. Art. ACH 1-1-ACH 1-13.
36. Kourtchev I. et al. Enhanced volatile organic compounds emissions and organic aerosol mass increase the oligomer content of atmospheric aerosols // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. Art. 35038.
37. Makkonen R. et al. BVOC-aerosol climate interactions in the global aerosol-climate model ECHAM5.5-HAM2 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. Vol. 12. P. 10077–10096. DOI: 10.5194/acp-12-10077-2012.
38. Mogensen D. et al. Simulations of atmospheric OH, O₃ and NO₃ reactivities within and above the boreal forest // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015. Vol. 15, № 7. P. 3909–3932. DOI: 10.5194/acp-15-3909-2015. EDN: VGPYAD.
39. Shao M. et al. Volatile organic compound emissions from Scots pine: mechanisms and description by algorithms // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2001. Vol. 106. № D17. P. 20483–20491.
40. Stocker T.F. et al. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change // *Climate change*. 2013. Vol. 5. P. 1–1552.
41. Tarvainen V. et al. Temperature and light dependence of the VOC emissions of Scots pine // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 5, № 4. P. 989–998.
42. van Meeningen Y. et al. Isoprenoid emission variation of Norway spruce across a European latitudinal transect // *Atmos. Environ.* 2017. Vol. 170. P. 45–57.

43. Yang Y. et al. Towards a quantitative understanding of total OH reactivity: A review // *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 134. P. 147–161.
44. Zhou P. et al. Simulating ozone dry deposition at a boreal forest with a multi-layer canopy deposition model // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 17, № 2. P. 1361–1379. DOI: 10.5194/acp-17-1361-2017. EDN: YXJQBB.

References

1. Andreev D.N. *Èkogeochimičeskaja diagnostika antropogennoj transformacii osobo ochranjaemych prirodnykh territorij. Diss. kand. nauk* [Ecogeochemical diagnostics of anthropogenic transformation of specially protected natural areas. Cand. Diss.]. Perm, 2005. 164 p. (In Russ.).
2. Belan B.D. [The problem of tropospheric ozone and some results of its measurements]. *Optika atmosfery i okeana*. V. 9, No. 9 (1996): pp. 1184–1213. (In Russ.).
3. Buzmakov S.A., Gatina E.L. [Zoning of the specially protected natural area "Osinskaya forest dacha"]. *Geografičeskij vestnik*. No. 1 (2009): pp. 51–55. (In Russ.).
4. Drugov Yu.S., Rodin A.A. *Gazochromatografičeskij analiz zagriznennogo vozducha* [Gas Chromatographic Analysis of Air Pollution: A Practical Guide]. Moscow, Laboratoria znaniy Publ., 2020. 530 p. (In Russ.).
5. Zyabchenko S.S. *Sosnovye lesa evropejskogo severa* [Pine forests of the European North]. Leningrad, Nauka Publ. 1984. 248 p. (In Russ.).
6. Ovesnov S.A., ed. *Illjustrirovannyj opredelitel' rastenij Permskogo kraja* [Illustrated guide to plants of the Perm region]. Perm, Knizhny Mir Publ., 2007. 743 p. (In Russ.).
7. Isidorov V.A. *Letučie vydelenija rastenij* [Volatile emissions from plants: composition, emission rate and ecological role]. St-Peterburg, Alga Publ., 1994. 188 p. (In Russ.).
8. Buzmakov S.A., ed. *Osobo ochranjaemye prirodnye territorii Permskogo kraja* [Specially protected natural areas of Perm Krai]. Perm, Aster Publ., 2017. 516 p. (In Russ.).
9. Pryanishnikov D.N. *Populjarnaja agrochimija* [Popular agrochemicals]. Moscow, Nauka Publ, 1965. 398 p. (In Russ.). (In Russ.).
10. Rysin L.P. *Sosnovye lesa Evropejskoj časti SSSR* [Pine forests of the European part of the USSR]. Moscow, Nauka Publ.. 1975. 213 p. (In Russ.).
11. *Tablicy i modeli choda rosta i productivnosti nasaždenij osnovnykh lesoobrazujuščich porod Severnoj Evrazii* [Tables and models of growth and productivity of stands of the main forest-forming species of Northern Eurasia (normative and reference materials)]. Moscow, 2008. 887 p. (In Russ.).
12. Aaltonen H., Pumpanen J., Pihlatie M., Hakola H., Hellén H., Kulmala, L. et al. Boreal pine forest floor biogenic volatile organic compound emissions peak in early summer and autumn. *Agricul. Forest Meteorol*, V. 151 (2011): pp. 682–691.
13. Aaltonen H., Aalto J., Kolari P., Pihlatie M., Pumpanen J., Kulmala M. et al. Continuous VOC flux measurements on boreal forest floor. *Plant Soil*. V. 369 (2013): pp. 241–256.
14. Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric environment*. V. 34, No. 12–14 (2000): pp. 2063–2101.
15. Atkinson R., Arey J. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review. *Atmospheric Environment*. V. 37 (2003): pp. 197–219.
16. Di Carlo P., Brune W.H., Martinez M., Harder H., Leshe R., Ren X. et al. Missing OH reactivity in a forest: Evidence for unknown reactive biogenic VOCs. *Science*. V. 304, No. 5671 (2004): pp. 722–725.
17. Filella I., Wilkinson M.J., Llusia J., Hewitt C.N., Peñuelas J. Volatile organic compounds emissions in Norway spruce (*Picea abies*) in response to temperature changes. *Physiologia Plantarum*. V. 130, No. 1 (2007): pp. 58–66.
18. Glasius M., Goldstein A.H. Recent discoveries and future challenges in atmospheric organic chemistry. *Environ. Sci. Technol*. V. 50, No. 6 (2016): pp. 2754–2764.
19. Grabmer W., Kreuzwieser J., Wisthaler A., Cojocariu C., Graus M., Rennenberg H. et al. VOC emissions from Norway spruce (*Picea abies* L.[Karst]) twigs in the field—results of a dynamic enclosure study. *Atmospheric Environment*. V. 40 (2006): pp. 128–137.
20. Gray C.M., Monson R.K., Fierer N. Emission of volatile organic compounds during the decomposition of plant litter. *J. Geophys. Res*. V. 115 (2010). Art. G03015. DOI: 10.1029/2010JG001291.
21. Guenther A., Hewitt C.N., Erickson D., Fall R., Geron C., Graedel T. et al. A global model of natural volatile organic compounds emission. *J. Geophys. Res*. V. 100 (1995): pp. 8873–8892.
22. Hakola H., Taipale D., Praplan A., Schallhart S., Thomas S., Tykkä T. et al. Emissions of volatile organic compounds from Norway spruce and potential atmospheric impacts. *Frontiers in Forests and Global Change*. V. 6 (2023). Art. 1116414. DOI: 10.3389/ffgc.2023.1116414.

23. Heald C.L., Kroll J.H., Jimenez J.L., Docherty K.S., DeCarlo P.F., Aiken A.C. et al. A simplified description of the evolution of organic aerosol composition in the atmosphere. *Geophysical Research Letters*. V. 37, No. 8 (2010). Art. L08803.
24. Hester R.E., Harrison R.M., eds. Volatile organic compounds in the atmosphere. *Royal Society of Chemistry*. V. 4 (1995). Art. 140.
25. Isebrands J.D., Guenther A.B., Harley P., Helmig D., Klinger L., Vierling L., Zimmerman P., Geron C. Volatile organic compound emission rates from mixed deciduous and coniferous forests in Northern Wisconsin, USA. *Atmos. Environ.* V. 33 (1999): pp. 2527-2536. DOI: 10.1016/S1352-2310(98)00250-7.
26. Isidorov V.A. Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of boreal forests: composition, emission rates, estimation of regional emission and photocatalytic transformation. *Ecol. Bull.* V. 42 (1992): pp. 71-76.
27. Isidorov V., Jdanova M. Volatile organic compounds from leaves litter. *Chemosphere*. V. 48 (2002): pp. 975-979.
28. Isidorov V.A., Pirožnikov E., Spirina V.L., Vasyanin A.N., Kulakova S.A. Emission of volatile organic compounds by plants on the floor of boreal and mid-latitude forests. *Journal of Atmospheric Chemistry*. V. 79 (2022): pp. 153-166.
29. Isidorov V.A., Smolewska M., Purzyska-Pugacewicz A., Tyszkiewicz Z. Chemical composition of volatile and extractive compounds of pine and spruce leaf litter in the initial stages of decomposition. *Biogeosciences*. V. 7 (2010): pp. 2785-2794. DOI: 10.5194/bg-7-2785-2010.
30. Isidorov V.A., Vinogorova V.T., Rafałowski K. HS-SPME analysis of volatile organic compounds of coniferous needle litter. *Atmos. Environ.* V. 37 (2003): pp. 4645-4650.
31. Isidorov V., Vinogorova V., Rafałowski K. Gas chromatographic determination of extractable compounds composition and emission rate of volatile terpenes from larch needle litter. *J. Atmos. Chem.* V. 50 (2003): pp. 263-278.
32. Isidorov V.A., Zaitsev A.A. Reviews and syntheses: VOC emissions from soil cover in boreal and temperate natural ecosystems of the Northern Hemisphere. *Biogeosciences Discussions*. V. 19 (2022): pp. 4715-4746. DOI: 10.5194/bg-19-4715-2022.
33. Isidorov V.A., Zenkevich I.G., Ioffe B.V. Volatile organic compounds in the atmosphere of forest. *Atmos. Environ.* V. 19 (1985): pp. 1-8. DOI: 10.1016/0004-6981(85)90131-3.
34. Komenda M., Kobel K., Koppmann R., Wildt J. Comparability of biogenic VOC emission rate measurements under laboratory and ambient conditions at the example of monoterpene emissions from Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Journal of atmospheric chemistry*. V. 45, No. 1 (2003): pp. 1-23.
35. Komenda M., Koppmann R. Monoterpene emissions from Scots pine (*Pinus sylvestris*): field studies of emission rate variabilities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. V. 107, No. D13 (2002). Art. ACH 1-1-ACH 1-13.
36. Kourtchev I., Giorio C., Manninen A., Wilson E., Mahon B., Aalto J. et al. Enhanced volatile organic compounds emissions and organic aerosol mass increase the oligomer content of atmospheric aerosols. *Sci. Rep.* V. 6 (2016). Art. 35038.
37. Makkonen R., Asmi A., Kerminen V.M., Boy M., Arneth A., Guenther A., Kulmala M. BVOC-aerosol climate interactions in the global aerosol-climate model ECHAM5.5-HAM2. *Atmos. Chem. Phys.* V. 12 (2012): pp. 10077-10096. DOI: 10.5194/acp-12-10077-2012.
38. Mogensen D., Gierens R., Crowley J.N., Keronen P., Smolander S., Sogachev A. et al. Simulations of atmospheric OH, O₃ and NO₃ reactivities within and above the boreal forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 15, No. 7 (2015): pp. 3909-3932. DOI: 10.5194/acp-15-3909-2015.
39. Shao M., Czapiewski K.V., Heiden A.C., Kobel K., Komenda M., Koppmann R., Wildt J. Volatile organic compound emissions from Scots pine: mechanisms and description by algorithms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. V. 106, №. D17 (2001): pp. 20483-20491.
40. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M.M.M.B., Allen S.K., Boschung J. et al. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Climate change*. V. 5 (2013): pp. 1-1552.
41. Tarvainen V., Hakola H., Hellén H., Bäck J., Hari P., Kulmala M. Temperature and light dependence of the VOC emissions of Scots pine. *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 5, №. 4 (2005): pp. 989-998.
42. van Meeningen Y., Wang M., Karlsson T., Seifert A., Schurgers G., Rinnan R., Holst T. Isoprenoid emission variation of Norway spruce across a European latitudinal transect. *Atmos. Environ.* V. 170 (2017): pp. 45-57.
43. Yang Y., Shao M., Wang X., Nölscher A.C., Kessel S., Guenther A., Williams J. Towards a quantitative understanding of total OH reactivity: A review. *Atmospheric Environment*. V. 134 (2016): pp. 147-161.
44. Zhou P., Ganzeveld L., Rannik Ü., Zhou L., Gierens R., Taipale D. et al. Simulating ozone dry deposition at a boreal forest with a multi-layer canopy deposition model. *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 17, No. 2 (2017): pp. 1361-1379. DOI: 10.5194/acp-17-1361-2017.

Статья поступила в редакцию 14.10.2025; одобрена после рецензирования 19.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 14.10.2025; approved after reviewing 19.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Виктория Леонидовна Спирина – victoria45winter@mail.ru, аспирант кафедры ботаники и генетики растений, ассистент кафедры аналитической химии и экспертизы;

Полина Юрьевна Сарапульцева – polyustrik@mail.ru, аспирант, ассистент кафедры аналитической химии и экспертизы;

Андрей Аркадьевич Зайцев – rabbitzay@yandex.ru, канд. геогр. наук, декан географического факультета, доцент кафедры биогеоценологии и охраны природы;

Лариса Викторовна Новоселова – larisa.novoselova2010@yandex.ru, д-р биол. наук, профессор кафедры ботаники и генетики растений;

Валерий Алексеевич Исидоров – isidorov@uwb.edu.pl, д-р хим. наук, профессор.

Information about the authors

Victoria L. Spirina – victoria45winter@mail.ru, PhD student of Botany and Plant Genetics Department, assistant of the Department of Analytical Chemistry and Expertise;

Polina Yu. Sarapultseva – polyustrik@mail.ru, PhD student, assistant of the Department of Analytical Chemistry and Expertise;

Andrei A. Zaitsev – rabbitzay@yandex.ru, candidate of geographical sciences, Dean of the Faculty of Geography, Associate Professor of the Department of Biogeocenology and Nature Conservation;

Larisa V. Novoselova – larisa.novoselova2010@yandex.ru, doctor of biological sciences, professor of Botany and Plant Genetics Department;

Valery A. Isidorov – isidorov@uwb.edu.pl, doctor of chemical sciences, professor.

Вклад авторов:

Спирина В. Л. – выполнение исследования; написание исходного текста; обработка и анализ полученных результатов.

Сарапульцева П. Ю. – выполнение исследования; доработка текста.

Зайцев А. А. – участие в полевых работах; доработка текста.

Новоселова Л. В. – редактирование; утверждение окончательного варианта.

Исидоров В. А. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Spirina V. L. – research execution; writing the draft; processing of results.

Sarapultseva P. Yu. – research execution; text revision.

Zaitsev A. A. – fieldwork participation; text revision.

Novoselova L. V. – editing; final version approval.

Isidorov V. A. – research supervision; research concept; methodology development; text revision; final conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.