

УДК 582.475-145:504.5:676(470.13-25)

Гранулометрический состав осевшего аэрозольного вещества и соотношение фенольных соединений в хвое разного возраста

М.П. Тентюков^{1,4}, В.И. Михайлов², Д.А. Тимушев³,
Д.В. Симоненков⁴, Б.Д. Белан^{4*}

¹Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина
167001, г. Сыктывкар, пр. Октябрьский, 55

²Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167000, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 48

³Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167000, г. Сыктывкар, ул. Оплеснина, 4

⁴Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 18.01.2021 г.

Приведены результаты лазерной гранулометрии нанодисперсной фракции аэрозольного вещества и УФ-спектрометрии водных смывов разновозрастной хвои четырех видов растений. Оценено влияние гидротермических условий на временную изменчивость морфометрических показателей хвои и загрязнение ее поверхности фенольными соединениями в составе вторичных органических аэрозолей. Обсуждается механизм генерирования вторичных органических аэрозолей на поверхности разновозрастной хвои при эфлоресценции фенольных соединений и последующем их поступлении в полог леса при турбулентном отрыве пограничного слоя от листовой поверхности.

Ключевые слова: динамическое рассеяние света, эфлоресценция, субмикронные аэрозоли, вторичные органические аэрозоли, фенольные соединения, загрязнение хвои; laser granulometry, efflorescence, submicron aerosols, secondary organic aerosols, phenolic compounds, needles contamination.

Введение

Известно, что листья хвойных деревьев выполняют важную регулирующую роль в функционировании растительного организма [1]. Отмечается, что любые отклонения морфометрических показателей хвои неизбежно сказываются на характеристиках ассимилирующей поверхности и, как следствие, влекут за собой изменения продуктивности и жизнестойкости растительного организма в ходе его развития [2]. Вместе с тем из результатов наблюдений [3] следует, что хвоя активно увеличивается в размерах только в течение первого года. Поэтому можно предположить, что далее, вплоть до опада хвои, площадь ее поверхности меняется незначительно. Следовательно, по отношению к аэрозольным выпадениям листовая поверхность хвойных растений может рассматриваться как естественный планшет, отражающий особенности пассивного накопления

аэрозолей в течение всего периода жизни хвои. Учитывая, что этот период у разных видов составляет от 3–6 до 12–17 лет, разновозрастная хвоя может оказаться информативным объектом опробования при оценке аэрозольного загрязнения приземной атмосферы.

Гранулометрический состав аэрозольного вещества может различаться у растений, у которых продолжительность жизни хвои различна. У сосны хвоя живет 3–6 лет (сосна обыкновенная очень чувствительна к атмосферному загрязнению, например желтый лес Чернобыля). У ели продолжительность жизни хвои колеблется от 7 до 14 лет (при этом в отличие от сосны она хорошо приживается и городских условиях), у пихты — до 7 лет. Предполагается, что в зависимости от продолжительности экспонирования хвоя разного года будет различаться по гранулометрическому составу аэрозолей. Поэтому смывы хвои разных видов деревьев дают возможность сравнить, какие из хвойных более информативны для мониторинга аэротехногенного загрязнения.

В связи с этим целью настоящей статьи заключается в изучении гранулометрического состава нанодисперсной фракции аэрозольного вещества методом динамического рассеяния света в водных

* Михаил Пантелеймонович Тентюков (tentukov@yandex.ru); Василий Игоревич Михайлов (system14@rambler.ru); Дмитрий Анатольевич Тимушев (timushev@gmail.com); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru).

смывах хвои четырех видов растений и сравнении относительного содержания фенольных соединений в зависимости от морфометрических характеристик и разной продолжительности жизни хвои.

Методика

Исследования выполнены на пробных площадках в конце вегетационного периода (последняя декада сентября 2020 г.). Площадки заложены на территории Ботанического сада Сыктывкарского государственного университета им. Питирима Сорокина, находящегося в 4 км к западу от Сыктывкара в пригородной зеленой зоне. Объектами исследования были четыре вида хвойных деревьев: 18÷25-летние сосна сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), 10-летний подрост пихты европейской (*Abies alba* Mill.) и 30÷40-летняя ель сибирская (*Picea obovata* Lebed.). Отбор проб хвои по возрастным фракциям для морфометрии и получения смывов производился с ветвей II-го порядка из нижней трети кроны каждого вида в пределах восточных румбов (в азимутальном секторе между 45 и 135°).

Метод динамического рассеяния света

В последнее время среди возможных интегральных методов изучения наночастиц в дисперсионных средах широкое распространение получил метод динамического рассеяния света (ДРС), относящийся к неразрушающим методам исследований. Физическая сущность метода заключается в регистрации временных флуктуаций интенсивности рассеяния лазерного луча в дисперсной среде. Из-за броуновского движения частиц в ней возникают флуктуации локальных концентраций частиц и связанные с ними локальные изменения оптической плотности дисперсной среды, а также приуроченные к ним изменения показателей преломления света. Последнее обусловлено тем, что при прохождении лазерного луча через локальные концентрации частиц происходит частичное рассеяние света. Установлено, что числовые параметры рассеяния света зависят от размера частиц, интенсивности их диффузии и вязкости жидкости [4]. Метод не требует предварительной калибровки, он одинаково эффективен как при низких концентрациях частиц, так и при наличии их агрегатов. Измеряемый размер (диаметр) частиц колеблется от 0,5 нм до нескольких микрон. Для метода характерны невысокая себестоимость измерений, низкая погрешность и экспрессность.

Подготовка смывов с хвои для гранулометрического анализа и УФ-спектроскопии

В стеклянные стаканы помещали образцы хвои в количестве 30 шт. каждой возрастной фракции и заливали деионизированной водой (50 мл). Далее стаканы переносили в ультразвуковую ванну Сап-

фир УЗВ-5,7 (рабочая частота 35 кГц, мощность генератора 150 Вт), в которой проводилась ультразвуковая обработка образцов в течение 5 мин. Для определения размеров наночастиц в пробах использовали лазерный анализатор ZetaSizer Nano ZS (Malvern Panalytical, Великобритания). Диапазон измерения частиц – от 1 до 10000 нм. Для каждой пробы проводилось шесть измерений среднего объемного диаметра частиц ($D_{ср}$, нм). Для каждого измерения оптимальное время накопления временной автокорреляционной функции интенсивности рассеянного излучения определялось программным обеспечением прибора автоматически. После проводилось их усреднение. Объемное содержание фракций наночастиц в образцах рассчитано интегрально по соотношению (%) площади фигур, описывающих данное распределение частиц по размерам в линейных координатах. УФ-спектроскопию водных смывов хвои проводили на спектрофотометре Solar PB2201 (ЗАО «Спектроскопия, оптика и лазеры – авангардные разработки», Беларусь).

Результаты и обсуждение

Частотное распределение частиц аэрозольного вещества по размерам в водных смывах длиннохвойных растений (сосна сибирская и сосна обыкновенная)

Сравнение гранулометрического состава аэрозольного вещества по возрастным фракциям в водных смывах длиннохвойных растений показало, что диапазон диаметров частиц в пяти возрастных фракциях хвои сосны сибирской составляет от 70 до 2000 нм. Распределение частиц преимущественно бимодальное. Необходимо отметить, что $D_{ср}$ колеблется в интервале 135–357 нм и какого-либо временного тренда в увеличении частиц не обнаруживается (рис. 1, А-1–А-5). Сопоставление гранулометрического состава аэрозольного вещества по возрастным фракциям в водных смывах сосны обыкновенной показало, что диапазон размеров частиц трех временных фракций составляет 60–1500 нм. В соотношении размеров фракций очень сильно преобладает доля мелких частиц (60–150 нм). При этом $D_{ср}$ колеблется в интервале 161–273 нм, и какой-либо прямой связи роста среднего диаметра частиц аэрозольного вещества с увеличением продолжительности жизни хвои не обнаруживается (рис. 1, Б-1–Б-3).

Таким образом, гранулометрический состав дисперсного аэрозольного вещества в длиннохвойных растениях характеризуется преимущественно бимодальным распределением. В соотношении фракций сильно преобладает мелкая фракция (размеры частиц 60–200 нм), а общий диапазон размеров частиц составляет 60–2000 нм. $D_{ср}$ варьирует в интервале 135÷161–273÷357 нм, и какой-либо прямой связи роста среднего диаметра частиц аэрозольного вещества с увеличением продолжительности жизни хвои не обнаруживается. Однако сравнение величин

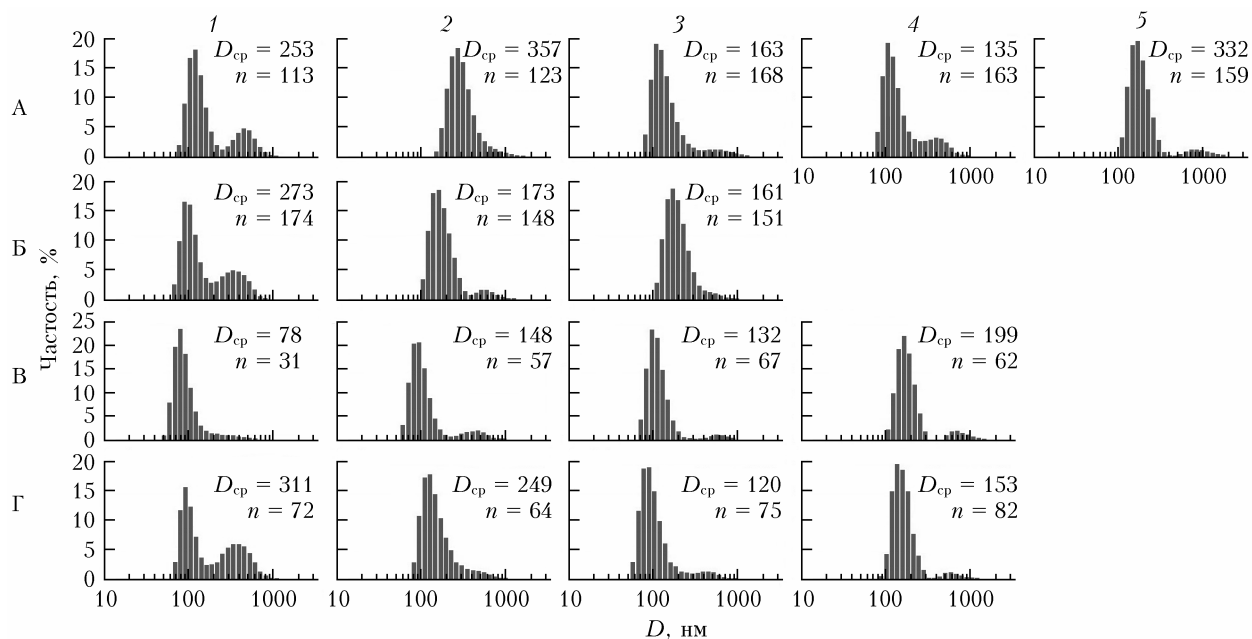


Рис. 1. Гранулометрический состав аэрозольного вещества в водных смывах разновозрастной хвои (1–5 – возраст хвои, лет): А – сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour); Б – сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.); В – пихты европейской (*Abies alba* Mill.); Г – ели сибирской (*Picea obovata* Lebed.); n – число измеренной хвои в выборке при расчете листовой поверхности по каждой возрастной фракции

оптической плотности в водных смывах сосны сибирской и сосны обыкновенной выявило существенные различия, которые дают основание предполагать, что хвоя последней загрязнена сильнее.

Частотное распределение частиц аэрозольного вещества по размерам в водных смывах короткохвойных растений (пихта европейская и ель сибирская)

Сравнение гранулометрического состава аэрозольного вещества по возрастным фракциям в водных смывах короткохвойных растений показало, что диаметры частиц в четырех возрастных фракциях хвои пихты европейской попадают в диапазон от 50 до 1800 нм. Распределение частиц преимущественно бимодальное. В соотношении размерных фракций очень сильно преобладает доля мелких частиц размерами 50–100 нм. При этом D_{cp} колеблется в интервале 78–199 нм; можно заметить, что со старением хвои пихты европейской средний диаметр частиц аэрозольного вещества растет (рис. 1, В-1–В-4). Сопоставление гранулометрического состава аэрозольного вещества по возрастным фракциям в водных смывах ели сибирской показало, что размер частиц в четырех возрастных фракциях лежит в интервале 50–1200 нм. Распределение преимущественно бимодальное со значительной дисперсией. В соотношении размерных фракций очень сильно преобладает доля мелких частиц (50–140 нм). Со старением хвои ели сибирской D_{cp} имеет тенденцию к уменьшению.

Таким образом, для всех образцов хвои общим является то, что гранулометрический состав разно-

возрастных фракций хвои характеризуется бимодальным распределением наночастиц, а в соотношении размеров преимущественно преобладают мелкие частицы, доля которых достигает 91–96%. Это обстоятельство позволяет предположить, что крупные частицы на поверхности хвои могут представлять собой прочные агрегаты из более мелких частиц. Эти первичные частицы в таких скоплениях соединены силами межмолекулярного взаимодействия. Агрегирование мелких частиц сопровождается их укрупнением (увеличением размера и массы агрегатов), что отражается в уменьшении их числа в объеме водных смывов хвои. Другими словами, процесс агрегации мелких частиц на поверхности хвои приводит к формированию вторичных крупных частиц.

УФ-спектроскопия водных смывов разновозрастной хвои

На рис. 2 приведены спектры поглощения водных смывов хвои разных пород. Хорошо заметно, что водные смывы всех образцов достаточно сильно поглощают излучение в УФ-области, при этом интенсивность поглощения постепенно ослабевает при переходе в область более длинных волн. Такое поведение характерно при наличии рассеивающих дисперсных частиц. В то же время на спектрах имеются характерные для каждого типа пород зоны поглощения. Так, для разновозрастной хвои ели наблюдаются три участка поглощения в диапазоне длин волн 250–400 нм с максимумами при 274, 306 и 322 нм (рис. 2, Г-1). Для хвои пихты наблюдается только одна явная зона поглощения с максимумом около 270 нм (рис. 2, В-1). В случае хвои сосны

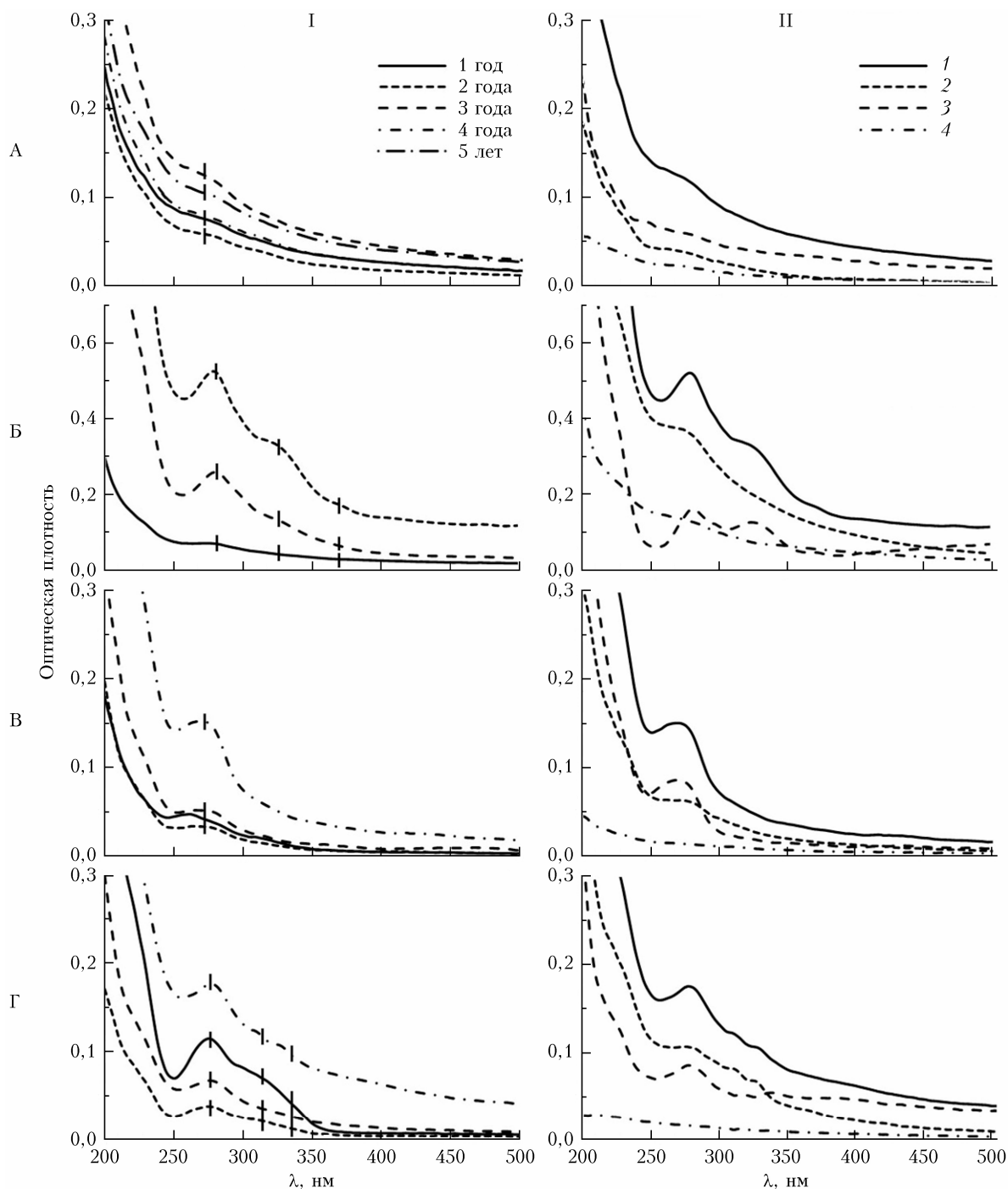


Рис. 2. УФ-спектры поглощения водных смывов разновозрастных фракций хвои (I): А – сосны сибирской, Б – сосны обыкновенной, В – пихты европейской, Г – ели сибирской; УФ-спектры поглощения водных смывов одной возрастной фракции (II): А – сосны сибирской (3 года), Б – сосны обыкновенной (2 года), В – пихты европейской (4 года), Г – ели сибирской (4 года); 1 – исходный спектр, 2 – спектр, полученный после месячного отстаивания, 3 – спектр, характеризующий крупные осевшие частицы, полученный путем вычитания значений оптической плотности до и после отстаивания, 4 – спектр, характеризующий мелкие осевшие частицы, полученные путем вычитания значений оптической плотности до и после центрифугирования

обыкновенной на спектрах имеется три максимума: 282, 324 и 370 нм (рис. 2, Б-Г). На спектре смывов хвои сосны сибирской наблюдается только один пологий пик в интервале 260–300 нм (рис. 2, А-Г). Эти участки могут свидетельствовать о наличии в пробах смывов фенольных соединений (флавоны,

флавоноиды, фенилпропены, хиноны), входящих в состав хвои [5, 6].

Заметно, что содержание фенольных соединений увеличивается с возрастом хвои. Это обстоятельство подтверждает ранее установленный факт [7]. Считается, что такая особенность связана со снижением

оводненности клеток при старении и их лигнификацией. Но тогда в данном контексте аномальное увеличение содержания фенольных соединений в двухлетней хвое сосны обыкновенной (рис. 2, Б-1) и резкое их снижение в трехлетней требуют иного объяснения.

УФ-спектроскопия водных смывов разновозрастной хвои после центрифугирования

После сравнительного анализа УФ-спектров водных смывов разновозрастной хвои четырех видов растений эксперименты с водными смывами хвои были продолжены. На рис. 2, А-П-Г-П показано изменение оптической плотности полученных после месяца отстаивания и последующего центрифугирования водных смывов хвои. Путем вычитания спектров: 1) до и после отстаивания (рис. 2, А-П(3)–Г-П(3)); 2) до и после центрифугирования (А-П(4)–Г-П(4)), получены спектры поглощения, характеризующие осевшие частицы. В первом случае отмечено снижение оптической плотности свидетельствует об оседании крупных, а во втором – мелких фракций частиц. Мелкие, в отличие от крупных, не имеют в УФ-спектрах характерных для хвои полос поглощения, наблюдаемых в исходных спектрах (А-П(1)–Г-П(1)).

Выявленные обстоятельства могут свидетельствовать о том, что выбросы фенольных соединений (продуктов внутриклеточного метаболизма) образуют с аэрозольным веществом на поверхности хвои относительно прочные агрегаты – вторичные органические аэрозоли. Такая возможность преобразования газообразной формы фенольных соединений показана во многих работах (например, [8, 9]). Эти первичные фенольные соединения можно рассматривать в качестве своеобразных прекурсоров вторичных органических аэрозолей, которые можно обнаружить и охарактеризовать с помощью УФ-спектроскопии. Последнее возможно, поскольку фенольные соединения имеют характерные спектры поглощения в определенных областях УФ-спектра [10].

Особенности образования вторичных органических аэрозолей в пологе хвойного леса

Считается, что образование вторичных аэрозолей с участием фенольных соединений преимущественно связано с их конденсированием на поверхности нанодисперсного аэрозольного вещества [11]. Наличие таких соединений было установлено в ходе экспериментов по определению оптической плотности водных смывов разновозрастной хвои после центрифугирования. Но возможен и другой механизм их образования в пологе хвойного леса, а именно – эффоресценция. Это поверхностное явление связано с миграцией фенольных соединений в составе транспирационной влаги и ее испарением и последующим кристаллообразованием под влиянием УФ-

излучения и свободнорадикального окисления на поверхности хвои.

Механизм генерирования вторичных органических аэрозолей и поступления их в полог леса

При транспирации влаги одновременно происходит и удаление газообразных продуктов клеточного метаболизма, которые во внешней среде претерпевают определенные химические преобразования, изменяя тем самым свою химическую активность и часто – свое фазовое состояние, переходя из газообразного в жидкое, из жидкого в твердое. Визуально это нередко обнаруживается в виде солевой присыпки (солевых выпотов) на поверхности листьев (в англоязычной литературе подобный процесс обозначается словосочетанием *salt efflorescence* и переводится как выветривание кристаллов; выцветание соли; солевые выцветы).

Примером эффоресценции может быть описание механизма образования солевых выцветов на поверхности травы в засушливых условиях на территории Высокого Вельда в Мпумаланга, ЮАР [12]. Минеральный состав солевых выцветов исследован с помощью рентгеновской дифрактометрии, дифференциального термического анализа, сканирующей электронной микроскопии и химического анализа. В результате было выявлено, что минералогический парагенезис солевых выцветов образован тенардитом, блоэдитом, гипсом, кизеритом. Авторы [12] заключают, что все эти минералы образовались в сухой период в течение шести месяцев. Также приведены результаты расчетов, показывающих, что примерная скорость осаждения тенардита (наиболее часто встречающегося минерала в исследованном минеральном парагенезисе солевых выцветов) может составлять до 11–15 г/м² [12].

Следует отметить, что все указанные минералы представляют собой легко растворимые в воде минералы из класса сульфатов. Как сопутствующие минералы они осаждаются из богатых Na₂SO₄ растворов. В условиях относительно невысоких температур воздуха (+20 ... +30 °С) их выпадение из растворов осуществляется в виде кристаллогидратов. Однако если принять во внимание данные по минералогическому составу [12], где указывается наличие кизерита, эффоресценция обнаруживалась бы в сухой период не только на растительности, но и на поверхности почвы, но об этом в [12] не упоминается. Не сомневаясь в достоверности данных, приведенных исследователями по минералогическому составу солевых выцветов, взятых с поверхности растений, можно предположить, что появление кизерита в их составе является следствием осаждения минерала на поверхность трав в виде сухих аэрозолей.

В этой связи необходимо пояснить следующее. Кизерит – минерал, водный сульфат магния. В его состав входят: MgO – 29%, SO₃ – 58%, H₂O – 13%. При тумане, о котором в статье [12] упоминается как об одном из необходимых условий появления солевых выцветов на поверхности растений, этот минерал

никак не мог образоваться, поскольку во влажном воздухе кизерит покрывается пленкой эпсомита — водорастворимого минерала ($MgO - 16,3\%$, $SO_3 - 32,5\%$, $H_2O - 51,2\%$), также относящегося к классу сульфатов. В описываемых условиях кизерит мог образоваться только за счет метаморфизма эпсомита при его дегидратации в условиях низкой относительной влажности и высокой дневной температуры.

Вместе с тем известно, что развитие конвекции и турбулентности в приземном слое воздуха определяется градиентом и суточным ходом температуры в деятельном слое (0,01–0,5 м), которые в 1,5–2,0 раза превышают эти же показатели, регистрируемые на высоте 2 м. Как показано в [13–15], в таких условиях может инициироваться вихревой захват и вынос аэрозоля с поверхности почвы. Поэтому эпсомит мог попасть в приземный слой воздуха, будучи захваченным потоками воздуха с поверхности почв в результате термофореза с последующим преобразованием в кизерит в потоке горячего воздуха и сухим осаждением его в результате термопреципитации на «холодной» поверхности пустынной растительности.

Известно, что термофорез (удаление частиц аэрозолей от нагретой поверхности) и термопреципитация (осаждение частиц аэрозоля на более холодных частях поверхности) — специфические свойства аэрозолей [16]. При этом воздух прозрачен для солнечной радиации, поэтому его температура зависит от нагрева аэрозольных частиц, а их нагрев, в свою очередь, зависит от интенсивности солнечной радиации. Следовательно, чем больше частиц в пограничном слое, тем выше его температура, тем активней идет молекулярное перемешивание: при нагреве частиц часть их кинетической энергии передается молекулам воздуха в пограничном слое.

Активация вторичных органических аэрозолей и последующее их поступление в полог растительности начинается в пограничном слое. В зависимости от распределения скорости v воздушного потока пограничный слой может быть турбулентным и ламинарным [17]. Для турбулентного пограничного слоя характерно нелинейное распределение скорости (рис. 3, а). В ламинарном пограничном слое скорость воздушного потока изменяется линейно: от 0 на твердой поверхности до v на границе слоя с воздушным потоком. Из-за шероховатости поверхности между ламинарным потоком и твердой поверхностью располагается буферный подслой с ну-

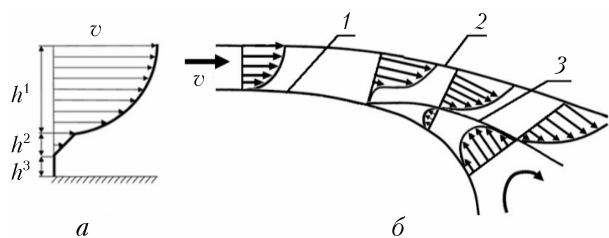


Рис. 3. Пограничный слой и его отрыв: h^1 — турбулентный слой, h^2 — ламинарный слой, h^3 — буферный подслой (а); 1 — поверхность тела; 2 — граница пограничного слоя; 3 — граница отрыва пограничного слоя (б)

левой скоростью воздушного потока. При увеличении скорости воздушного потока ламинарный слой переходит в турбулентный и его толщина сильно уменьшается.

Возвратное течение и отрыв пограничного слоя. Особенностью пограничного слоя является его свойство допускать при некоторых обстоятельствах возникновение возвратного течения в непосредственной близости от поверхности. С этим свойством связаны отрыв пограничного слоя от поверхности и возникновение вихревой зоны в области изменения градиента давления. Необходимое условие отрыва пограничного слоя — повышение давления в направлении движения воздушного потока. При обтекании воздушным потоком криволинейной или шероховатой поверхности давление и скорости в разных точках поверхности будут неодинаковыми (рис. 3). Поскольку давление вдоль движения воздушного потока растет, а его скорость вниз по профилю пограничного слоя уменьшается, то под влиянием разности давлений возникает возвратное движение газа. При этом продольное движение внешнего воздушного потока над поверхностью продолжается, только несколько отклоняясь от поверхности из-за обратного течения газа. Возникновение возвратного течения приводит к значительному утолщению пограничного слоя, потере его устойчивости и отрыву воздушного потока от поверхности [18]. Процесс отрыва сопровождается формированием вихревой зоны и последующим переходом к турбулентности. Предполагается, что с подобным механизмом нарушения устойчивости пограничного слоя связан процесс поступления вторичных органических аэрозолей в полог леса.

Условия формирования турбулентности в пологе леса. Развитие турбулентности в приземном слое воздуха определяется градиентом и суточным ходом температуры в деятельном слое. В лесу роль деятельной поверхности переходит к кронам [19]. В ясную погоду поверхность крон сильно нагревается за счет притока солнечной радиации. При этом величина нагрева лесной растительности из-за неоднородного распределения солнечной радиации и температуры в пологе леса [20] будет меняться на разных уровнях древостоя. Такое распределение температур создает благоприятные условия для развития конвекции и турбулентности в пологе леса и, следовательно, способствует активизации турбулентности в кронах деревьев.

Заключение

Приведены результаты сравнительных исследований гранулометрического состава нанодисперсной фракции аэрозольного вещества и соотношение фенольных соединений в водных смывах разновозрастной хвой четырех видов растений. Установлены общие свойства для всех образцов хвой: гранулометрический состав разновозрастных фракций хвой характеризуется бимодальным распределением наночастиц, а в соотношении размеров преобладают мелкие частицы, доля которых достигает 91–96%.

Это обстоятельство позволяет предположить, что крупные частицы на поверхности хвои могут представлять собой прочные агрегаты из более мелких частиц. Эти первичные частицы в таких скоплениях соединены силами межмолекулярного взаимодействия. Агрегирование мелких частиц сопровождается их укрупнением, что отражается в уменьшении их числа в объеме водных смывов хвои.

УФ-спектроскопия водных смывов разновозрастной хвои и после отстаивания, и после центрифугирования выявила снижение оптической плотности, в первом случае свидетельствующий об оседании крупных частиц, а во втором — мелких. При этом последние, в отличие от первых, не имеют в УФ-спектрах характерных для полос поглощения фенольных соединений, наблюдаемых в исходных спектрах.

Постулируется, что фенольные соединения на поверхности хвои образуют с аэрозольным веществом относительно прочные агрегаты, которые можно рассматривать в качестве своеобразных прекурсоров вторичных органических аэрозолей. Их активация начинается в пограничном слое, а последующее поступление в полог растительности связано со свойством пограничного слоя допускать при некоторых обстоятельствах возникновение возвратного течения и отрыва пограничного слоя от поверхности. Процесс отрыва сопровождается формированием вихрей. Предполагается, что подобный механизм инициируется развитием турбулентности в приземном слое воздуха и определяется градиентом и суточным ходом температуры в деятельном слое. При этом величина нагрева лесной растительности из-за неоднородного распределения солнечной радиации в пологе леса будет меняться на разных уровнях древостоя, что создает благоприятные условия для развития конвекции и турбулентности в пологе леса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-50024). Для выполнения гранта использовалась инфраструктура ИОА СО РАН, включая ЦКП «Атмосфера», созданная и эксплуатируемая по госзаданию. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Химия» Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

1. Лукина Н.В., Сухарева Т.А., Исаева Л.Г. Техногенные депрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах. М.: Наука, 2005. 245 с.
2. Мельхотра С.С., Хан А.А. Биохимические и физиологические действия приоритетных загрязняющих веществ // Загрязнение воздуха и жизнь растений. Л.: Гидрометеониздат. 1988 С. 144–161.
3. Надуткин В.Д., Модянов А.Н. Надземная фитомасса древесных растений в сосняках зеленомошных // Вопросы экологии сосняков Севера. 1972. Вып. 24. С. 70–80.

4. Berne B.J., Pecora R. Dynamic Light Scattering. England: John Wiley and Sons Ltd, 1976. 376 p. URL: <https://doi.org/10.1002/bbpc.19770810123>.
5. Блажей А., Шутый Л. Фенольные соединения растительного происхождения. М.: Мир, 1977. 240 с.
6. Giertych M.J., Karolewski P., De Temmerman L.O. Foliage age and pollution alter content of phenolic compounds and chemical elements in Pinus nigra needles // Water Air Soil Pollut. 1999. V. 110. P. 363–377.
7. Robles C., Greff S., Pasqualini V., Gazino S., Melou A.B., Fernandez C., Korboulewsky N., Bonin G. Phenols and flavonoids in aleppo pine needles as bioindicators of air pollution // J. Environ. Qual. 2003. V. 32, N 6. P. 2265–2271.
8. Klyta J., Czaplicka M. Determination of secondary organic aerosol in particulate matter – short review // Microchem. J. 2020. V. 157. URL: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104997>.
9. Ehn M., Thornton J.A., Kleist E., Sipila M., Junninen H., Pihlilinen I., Spriger M., Rubach F., Tillmann R., Lee B., Lopez-Hilfiker F., Andres S., Acir I.H., Rissanen M., Jokinen T., Schobesberger S., Kangasluoma J., Kontkanen J., Nieminen T., Kurten T., Nielsen L.B., Jorgensen S., Kjaergaard H.G., Canagaratna M., Dal Maso M., Berndt T., Petaja T., Wahner A., Kerminen V.M., Kulmala M., Worsnop D.R., Wildt J., Mentel T.F. A large source of low-volatility secondary organic aerosol // Nature. 2014. V. 506. P. 476–479.
10. Turunena M., Hellerb W., Strichb S., Sandermann H., Sutinenec M.-L., Norokorpic Y. The effects of UV exclusion on the soluble phenolics of young Scots pine seedlings in the subarctic // Environ. Pollut. 1999. P. 219–228. DOI: 10.1016/S0269-7491(99)00070-6.
11. Wong J.P., Tsagkaraki M., Tsiotra I., Mihalopoulos N., Violaki K., Kanakidou M., Sciare J., Nenes A., Weber R.J. Atmospheric evolution of molecular-weight-separated brown carbon from biomass burning // Atmos. Phys. 2019. V. 19, N 11. P. 7319–7334.
12. Singer A., Kirsten W.F.A., Buhmann C. A proposed fog deposition mechanism for the formation of salt efflorescences in the Mpumalanga highveld, Republic of South Africa // Water Air Soil Pollut. 1999. V. 109. P. 313–325.
13. Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А. Влияние ветра на вынос аэрозоля с подстилающей поверхности // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40, № 6. С. 759–775.
14. Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А. Вихревой вынос аридного субмикронного аэрозоля // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39, № 5. С. 596–608.
15. Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г. Динамика воздуха вблизи поверхности почвы и конвективный вынос аэрозоля // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 1, № 5. С. 35–47.
16. Иванов И.Б., Платиканов Д.Н. Коллоиды. М.: Химия, 1975. 488 с.
17. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М., 1970. 840 с.
18. Чжен П. Отрывные течения. Т. 1. М.: Мир, 1972. 300 с.
19. Хромов С.П. Метеорология и климатология. Л.: Гидрометеониздат, 1968. 491 с.
20. Алексеев В.А. Световой режим леса. Л.: Наука, 1975. 225 с.

M.P. Tentukov, V.I. Mikhailov, D.A. Timushev, D.V. Simonenkov, B.D. Belan. Granulometric composition of settled aerosol substance and ratio of phenolic compounds in needles of different age.

Results of laser granulometry of nanodispersed fraction of aerosol substance and UV spectrometry of water washes of different-age needles of four plant species are given. Influence of hydrothermal conditions on temporal variability of morphometric parameters of needles and contamination of its surface by phenolic compounds in composition of secondary organic aerosols is evaluated. A mechanism for generating secondary organic aerosols on the surface of different-age needles during efflorescence of phenolic compounds and their subsequent entry into the forest canopy during turbulent separation of the boundary layer from the sheet surface is discussed.