

Научная статья  
УДК 551.594.1  
doi: 10.17223/25421379/25/9

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ АЭРОИОНОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ НАД ОСНОВНЫМИ ЛАНДШАФТАМИ БАКЧАРСКОГО БОЛОТА В ПЕРИОДЫ ВЕГЕТАЦИИ ПО ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В 2020–2021 гг.



Мария Викторовна Оглезнева<sup>1</sup>, Елена Эдуардовна Веретенникова<sup>2</sup>,  
Пётр Михайлович Нагорский<sup>3</sup>, Константин Николаевич Пустовалов<sup>4</sup>,  
Артыш Алашович Сат<sup>5</sup>, Сергей Васильевич Смирнов<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия

<sup>4, 6</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>1</sup> oglezneva.m@yandex.ru

<sup>2</sup> lena2701@yandex.ru

<sup>3</sup> pm\_sta@mail.ru

<sup>4</sup> const.pv@yandex.ru

<sup>5</sup> artysh.sat@gmail.com

<sup>6</sup> smirnov@imces.ru

**Аннотация.** Представлены результаты экспедиционных измерений содержания аэроионов в условиях «хорошей погоды» в приземном слое и хроматографического анализа образцов болотной растительности, выполненные в теплые периоды 2020–2021 гг. Измерения проведены на лесоболотных ландшафтах на территории Бакчарского болота – северо-восточной периферии Большого Васюганского болотного комплекса, хроматографический анализ – в лаборатории Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН с помощью газового хроматографа. На основе проведенных измерений сделаны оценки пространственно-временной изменчивости концентрации аэроионов в различных лесоболотных ландшафтах. Отмечено, что с увеличением заболоченности наблюдается снижение концентрации аэроионов, а в течение вегетационного периода она возрастает. Результаты хроматографического анализа показали определенную зависимость содержания летучих органических соединений от фазы вегетационного периода, что позволило еще раз подтвердить гипотезу о наличии взаимосвязи аэроионов с летучими органическими соединениями.

**Ключевые слова:** приземный слой, атмосферное электричество, аэроионы, ЛОС, болотные ландшафты

**Источник финансирования:** исследование поддержано Российским научным фондом (грант № 22-27-00482, [www.rscf.ru/en/project/22-27-00482](http://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482)).

**Для цитирования:** Оглезнева М.В., Веретенникова Е.Э., Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Сат А.А., Смирнов С.В. Пространственно-временная изменчивость содержания аэроионов в приземном слое атмосферы над основными ландшафтами Бакчарского болота в периоды вегетации по данным полевых измерений в 2020–2021 гг. // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 135–148. doi: 10.17223/25421379/25/9

Original article  
doi: 10.17223/25421379/25/9

## SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF AIR ION CONCENTRATION IN ATMOSPHERIC SURFACE LAYER OVER MAIN LANDSCAPES OF BAKCHAR BOG IN VEGETATIVE PERIODS BASED ON FIELD MEASUREMENTS IN 2020–2021

Mariya V. Oglezneva<sup>1</sup>, Elena E. Veretennikova<sup>2</sup>, Petr M. Nagorskiy<sup>3</sup>,  
Konstantin N. Pustovalov<sup>4</sup>, Artysh A. Sat<sup>5</sup>, Sergei V. Smirnov<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

<sup>4, 6</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>1</sup> oglezneva.m@yandex.ru

<sup>2</sup> lena2701@yandex.ru

<sup>3</sup> pm\_sta@mail.ru

<sup>4</sup> const.pv@yandex.ru

<sup>5</sup> artysh.sat@gmail.com

<sup>6</sup> smirnov@imces.ru

**Abstract.** The results of the expeditionary measurements of the air ion concentrations are presented in fair-weather in the surface layer and chromatographic analysis of samples of swamp vegetation made in the warm periods of 2020–2021. The measurements were carried out on swamp landscapes of Bakchar bog in the northeastern part of the Great Vasyugan swamp complex, chromatographic analysis was made in the IMCES SB RAS using a gas chromatograph. Based on the measurements, assessments of the spatio-temporal variability of air ion concentrations in various swamp landscapes were made. It is noted that with an increase in swallowing, there is a decrease in air ion concentrations, and it increases during the vegetation season. The results of chromatographic analysis showed a certain dependence of the content of volatile organic compounds on the phase of the vegetation season, which made it possible to once again confirm the hypothesis of the presence of correlation between air ions and volatile organic compounds.

**Keywords:** surface layer, atmospheric electricity, air ions, VOC, swamp landscapes

**Source of financing:** The Russian Science Foundation (grant No. 22-27-00482, [www.rscf.ru/en/project/22-27-00482](http://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482), supported this research).

**For citation:** Oglezneva M.V., Veretennikova E.E., Nagorskiy P.M., Pustovalov K.N., Sat A.A., Smirnov S.V. (2022) The electrical state of surface layer over swamp landscapes. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 135–148. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/25/9

## Введение

К атмосферным ионам относят все электрически заряженные частицы, содержащиеся в воздухе, – от молекулярных кластеров до аэрозольных частиц [Ehn et al., 2010]. На сегодняшний день признано, что ионы играют важную роль в атмосферных процессах [Harrison, Tamm, 2008; Hirsikko et al., 2011]. Результаты исследования изменчивости содержания аэроионов и проводимости воздуха отражены в работах [Chalmers, 1952; Israel, 1970; Eisele, 1989; Dhanorkar, Kamra 1992; Ling, Jayaratne, Morawska, 2010]. В большинстве из них измерения содержания аэроионов проводились приборами на основе конденсаторов Гардиена и в условиях хорошей погоды. В атмосферном электричестве под хорошей погодой принимают условия, когда общее количество облачности не превышает 5 баллов, отсутствует облачность нижнего яруса и атмосферные явления, ухудшающие дальность видимости, а скорость ветра не более 6 м/с [Israel, 1970].

Проведенные исследования позволили установить как глобальные, так и локальные источники образования аэроионов: легких за счет ионизации, средних и тяжелых за счет взаимодействия с молекулярными соединениями и аэрозольными частицами. В нижней атмосфере основными ионизаторами являются фоновое радиоактивное излучение, обусловленное выходом из почвы и полураспадом радона, и галактические космические лучи [Israel 1970; Harrison, Tamm, 2008]. Поэтому скорость ионизации в приземном слое, главным образом, зависит от концентрации радона и его дочерних продуктов распада в воздухе [Israel, 1970; Harrison, Tamm, 2008].

На образование средних и тяжелых аэроионов также оказывают влияние некоторые локальные факторы, такие как разбрызгивание воды (эффект Ленарда, или баллоэлектрический эффект) [Chalmers, 1952; Israel, 1970], происходящее на берегах водоемов, при-

чем на морских происходит увеличение содержания положительных аэроионов [Blanchard, 1966], а вблизи водопадов и во время дождя – отрицательных [Laakso et al., 2007].

Еще одним механизмом локального образования средних и тяжелых аэроионов может служить взаимодействие молекулярных кластеров фотохимического происхождения с легкими ионами. По данным [Jayaratne, Ling, Morawska, 2011; Севостьянов, Грязькин, 2016], выбросы летучих органических соединений (ЛОС) некоторыми видами растений приводят к увеличению концентрации аэроионов. Основываясь на долгосрочных измерениях ионов, проведенных в бореальных лесах на юге Финляндии [Kulmala et al., 2013] пришли к выводу, что вклад ионов в образование новых аэрозольных частиц в бореальных лесах незначителен. Однако исследования, проведенные [Junninen et al., 2008; Rose et al., 2018], показали, что аэроионы могут играть большую роль в формировании ядер конденсации в бореальных лесах ночью. В работах [Rose et al., 2018; Lee et al., 2019] выдвигаются предположения о значимом влиянии ЛОС и аэроионов на облакообразование, поскольку они способствуют формированию ультрадисперсных аэрозольных частиц, которых впоследствии могут действовать как ядра конденсации.

В свою очередь, сток и трансформация аэроионов происходят как за счет рекомбинации и оседания на поверхность аэрозольных частиц [Israel, 1970] и молекулярных кластерах [Harrison, Tamm, 2008], в том числе на ЛОС, так и в процессе атмосферного переноса.

Поэтому в последние годы все больше внимания уделяется изучению состава органических соединений, выделяемых природными источниками, в частности растительностью, в атмосферу. Это относится прежде всего к таким реакционноспособным соединениям, как монотерпеновые углеводороды ( $C_{10}H_{16}$ ), которые в определенных условиях могут вступать в фотохимические реакции, приводящие к образова-

нию озона и аэрозольных частиц. Иницируемое озоном и радикалами гомогенное и газофазное окисление терпенов имеет сложный механизм и приводит к образованию кислородсодержащих соединений (альдегидов, кетонов, терпенов и др.).

Главным поставщиком летучих терпеноидов в атмосферу являются хвойные побеги. При этом сезонные изменения концентрации терпенов в пологе леса могут быть довольно значительными [Lim et al., 2008; Matsunaga et al., 2013]. Максимальное содержание этих соединений, как правило, отмечается в июне и начале июля. Затем их вклад постепенно снижается к концу августа и несколько повышается в первой половине сентября [Duce et al., 1983; Guenther et al., 1995; Исидоров, 2001; Lim et al., 2008; Matsunaga et al., 2013].

Все вышеперечисленное свидетельствует о сложных механизмах взаимосвязи ЛОС, аэроионов и аэрозольных частиц, которые остаются малоисследованными до сих пор.

Целью данной работы является оценка пространственно-временной изменчивости содержания аэроионов в приземном слое на различных болотных ландшафтах в условиях хорошей погоды и анализ влияния ЛОС, выделяемых болотной растительностью, на их содержание.

### Материалы и методы исследования

Наши исследования проводились в течение 2020–2021 гг. на территории, указанной на карте на рис. 1 красным крестиком. Расположение семи пунктов наблюдений (ПН) на территории исследования показано на рис. 2, на котором для более ясного понимания их положения они показаны на крупномасштабной топографической карте (рис. 2, а) и на спутниковом снимке Landsat (рис. 2, б). Их географические координаты представлены в табл. 1.

Пункты наблюдения были организованы на стационаре «Васюганье» и в лесоболотной зоне (в лесу и на болотном ландшафтном профиле). По своей сути выбранный нами ландшафтный профиль представляет собой натурную модель, отражающую реальные природные условия развития типичных болотных экосистем на территории южной тайги Западной Сибири. Ландшафтный профиль пересекает основные виды болотных фитоценозов: заболоченный высокорослый смешанный лес в периферийной части болотного массива, высокий рям, низкий рям и осоково-сфагновую топь.

Стационар «Васюганье» (ПН 7) расположен в районе д. Полынянка Бакчарского района Томской области. ПН 5 и 6 находятся, соответственно, на поляне на границе сухого и заболоченного участков леса и под пологом смешанного леса с хорошо дренированной подстилающей поверхностью. Ландшафтный профиль (ПН 1–4) находится на водоразделе малых рек Бакчара и Иксы, которые входят в состав речных систем Чаи и Оби. Район водораздела относится к подзоне южной тайги и представляет собой северо-восточную часть (Бакчарское болото) крупнейшей системы водно-болотных угодий в мире – Большого Васюганского болота.

С точки зрения климатических условий, для территории исследования характерен умеренно континентальный климат с умеренно холодной зимой и умеренно жарким летом, со среднегодовой температурой воздуха  $-0,3^{\circ}\text{C}$  [Dyukarev, 2015], с суммой годовых осадков 468 мм, из которой 45 % приходится на летние месяцы, 12 % – на зимние. Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова составляет в среднем 172 дня [Киселев, Воропай, Дюкарев, 2016]. Первый снежный покров в октябре обычно сходит под влиянием последующих оттепелей. Разрушение устойчивого снежного покрова происходит в среднем к концу второй декады апреля.

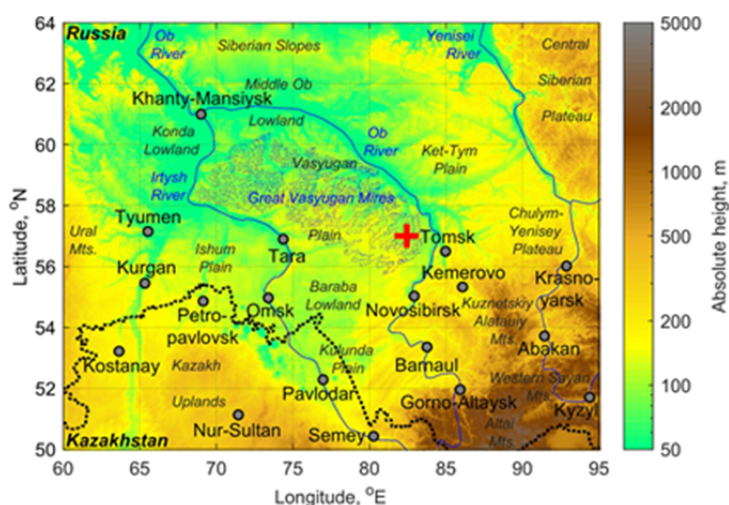
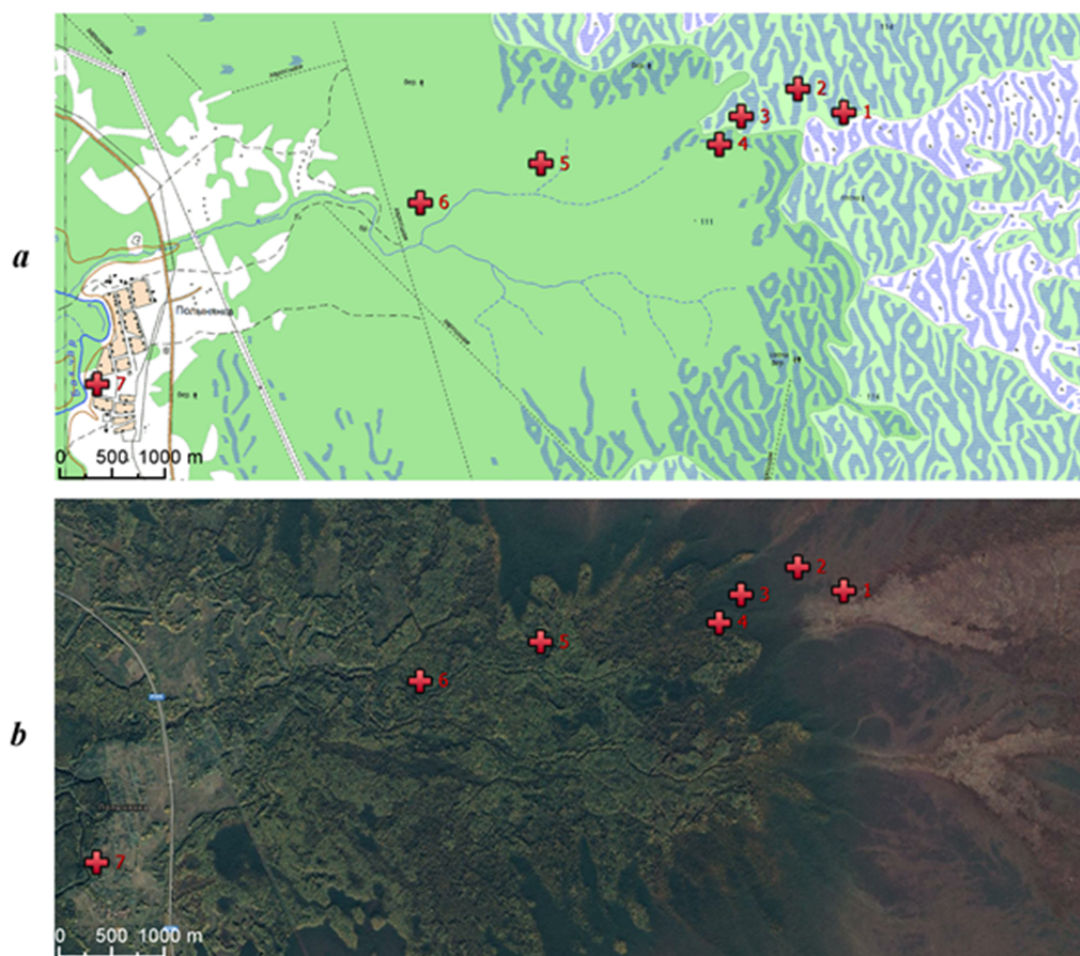


Рис. 1. Территория исследования (красный крестик)

Fig. 1. The study area (red cross sign)



**Рис. 2. Расположение пунктов наблюдения на территории исследования на топографической карте**

*a* – и спутниковом снимке Landsat (*b*): 1 – осоково-сфагновая топь, 2 – низкий рям, 3 – высокий рям, 4 – заболоченный высокорослый смешанный лес в периферийной части болотного массива, 5 – поляна на границе сухого и заболоченного участков леса, 6 – высокорослый смешанный лес, 7 – стационар «Васюганье»

**Fig. 2. Site locations in the study area on a topographic map**

*a* – and a Landsat image; *b*: 1 – a sedge-sphagnum marsh, 2 – a low ryam, 3 – a high ryam, 4 – a swampy tall mixed forest in the peripheral part of the swamp massif, 5 – a glade on the border of dry and swampy areas of the forest, 6 – a tall mixed forest, 7 – Vasyuganye station

С точки зрения ландшафтных условий, территория исследования в ПН 5 и 6 представляет собой смешанный лес с березово-сосново-зеленомошным растительным сообществом. Ландшафт в ПН 4 также представляет смешанный, но заболоченный лес с березово-сосново-зеленомошным растительным сообществом. Поверхность обладает резко выраженным микрорельефом, образованным приствольными повышениями, упавшими стволами, моховыми кочками, корягами, выворотнями. Древостой заболоченного леса двухъярусный, проективное покрытие древесного яруса 80 %. Первый ярус образован сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и кедром (*Pinus sibirica* Du Tour.) со средней высотой древостоя

15 м. Второй ярус представлен сосной сибирской и березой пушистой, средняя высота древостоя 10 м. Кустарничковый ярус развит слабо, он образован брусникой (*Vaccinium vitis-idaea* L.) с проективным покрытием 10 %. Травяная растительность представлена хвощом лесным (*Equisetum sylvaticum* L.), майником двулистным (*Majanthemum bifolium*), морошкой (*Rubus chamaemorus*), вейником Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii*). Проективное покрытие мохового яруса составляет около 80 %. При продвижении по профилю в сторону болота в растительном сообществе увеличивается доля кустарничков, зеленые мхи постепенно вытесняются сфагновыми. Древесный ярус существенно не меняется.

Ландшафт высокого рья (ПН 3) представляет собой окраину верхового водораздельного массива. Микрорельеф представлен моховыми подушками и приствольными буграми высотой до 50 см. Растительность высокого рья принадлежит к сосново-кустарничково-сфагновой ассоциации. Древесный ярус состоит из сосны (*Pinus sylvestris* L.) со средней высотой древостоя 18 м, проективное покрытие древесного яруса 90 %. Подрост представлен в основном сосной и единичными экземплярами кедра и березы высотой 5–10 м. Кустарничковый ярус развит пышно, достигает высоты 50 см, проективное покрытие 90 %. Доминантами являются багульник болотный (*Ledum palustre*), кассандра болотная (*Chamaedaphne calyculata*), брусника (*Vaccinium vitis-idaea*) и клюква (*Oxycoccus microcarpus*). Проективное покрытие травяного покрова – 15 %. Доминантами мохового покрова являются сфагновые мхи (*Sphagnum angustifolium*). Торфяная залежь в высоком рье имеет мощность не более 1 м.

За высоким рьем по направлению к центру болота ландшафт переходит в форму низкого рья (ПН 2) с сосново-кустарничково-сфагновой ассоциацией. Поверхность низкого рья характеризуется волнистым микрорельефом из-за большого количества больших моховых подушек высотой около 30 см и диаметром в среднем до 3 м. Современный растительный покров представлен древесным ярусом с низкорослой

сосной (*Pinus sylvestris* L.) со средней высотой древостоя 2–3 м, кустарничковым ярусом, который обильно развит на микроповышениях (общее проективное покрытие 60–70 %). Доминантами являются *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Oxycoccus microcarpus* Turcz. В моховом покрове на повышениях доминирует (95 %) *Sphagnum fuscum* Klinggr., на межкочковых понижениях встречается *Sph. Angustifolium* C. Jens. и *Sph. Magellanicum* Brid. Травяной ярус развит слабо (проективное покрытие 5 %), представлен куртинами *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L., *Drosera rotundifolia* L. Торфяная залежь достигает мощности 3 м.

Осоково-сфагновая топь (ПН 1) занимает центральную часть болотного массива. Микрорельеф представлен незначительными микроповышениями высотой до 20 см. В современном растительном покрове преобладают *Eriophorum vaginatum* L. и *Carex rostrata* Stokes (проективное покрытие 64 %). Моховой ярус представлен различными видами сфагновых мхов (*Sph. fuscum* Klinggr., *Sph. Angustifolium* C. Jens. и *Sph. Magellanicum* Brid.), формирующими микрорельеф. Степень покрытия моховым ярусом составляет 100 %. Торфяная залежь здесь достигает мощности 3 м.

Таблица 1

## Координаты пунктов наблюдений

Table 1

## Site coordinates

| Координаты         | Пункт наблюдения |             |             |             |             |             |             |
|--------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                    | 1                | 2           | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           |
| Широта             | 56°58,28' N      | 56°58,40' N | 56°58,26' N | 56°58,12' N | 56°58,02' N | 56°57,83' N | 56°56,97' N |
| Долгота            | 82°37,11' E      | 82°36,69' E | 82°36,17' E | 82°35,90' E | 82°34,33' E | 82°33,22' E | 82°30,32' E |
| Высота н. у. м., м | 115              | 113         | 111         | 111         | 130         | 117         | 114         |

Наше исследование включало проведение измерений концентрации аэроионов и основных метеорологических величин в пунктах наблюдений с различными лесоболотными экосистемами и отбор образцов растительности с их последующим хроматографическим анализом для качественной и количественной оценки содержания ЛОС в биомассе, которая бы позволила опосредованно судить о связи ЛОС с аэроионами. Большая скорость выделения и высокая реакционная способность ЛОС, в частности терпенов, обуславливают их сильнейшее влияние на газовый и аэрозольный состав приземной атмосферы в пределах аэротопа различных лесных сообществ, в том числе и болотных экосистем.

Измерения ПН проводились в теплые периоды 2020–2021 гг. во второй половине дня последова-

тельно в ходе маршрутных съемок, начиная с топи и заканчивая стационаром. В пределах болотных ландшафтов измерения проводились на краю дощатых настилов, имеющих в ПН 1–4, в ПН 5–7 измерения выполнялись непосредственно на подстилающей поверхности.

В ПН счетчики аэроионов устанавливались на штативы на высоте 1 м. Измерение концентрации аэроионов проводилось в течение 10 мин с дискретностью 1 с.

Метеорологические величины измерялись в течение 1 мин через 5 мин после начала измерения аэроионов. Также регистрировались тип и количество облаков. Пример размещения счетчика аэроионов в ПН на разных болотных ландшафтах показан на рис. 3.



Рис. 3. Измерения концентрации аэроионов в ПН 1 на осоково-сфагновой топи (а) и в ПН 2 в низком ряме (б)

Fig. 3. Measurements of air ion concentration at site 1 on the sedge-sphagnum marsh (a) and at site 2 in the low ryam (b)

Измерение счетной концентрации аэроионов производилось двумя приборами Air Ion Counter Model AIC2 (AlphaLab, США). Этот портативный прибор измеряет счетную концентрацию (количество) ионов в  $\text{см}^{-3}$  воздуха. Измерение положительных и отрицательных ионов производится отдельно. В конструкции счетчика используется аспирационный конденсатор – трубка Гардиена, имеется встроенный проточный вентилятор с постоянной скоростью прокачки воздуха и функция самокалибровки. Прибор позволяет измерять концентрацию ионов до 2 млн в  $\text{см}^3$ .

Измерения метеорологических величин, оказывающих наибольшее влияние на аэроионы, также производилось с помощью портативных приборов. Температура и относительная влажность воздуха измерялись термогигрометром MS-6508 (Precision Mastech, Гонконг). Он позволяет также определять температуру точки росы и температуру смоченного термометра. Погрешность измерения температуры воздуха составляет  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , относительной влажности –  $\pm 2\%$ . Анемометр MS6252A (Precision Mastech, Гонконг) измеряет мгновенные, средние и экстремальные значения скорости ветра с разрешением до  $0,01\text{ м/с}$ . Инструментальные наблюдения дополнялись визуальными наблюдениями за облачностью и атмосферными явлениями. В каждом пункте наблюдения было выполнено описание его ландшафта.

Для косвенной оценки интенсивности выделения ЛОС производился отбор образцов болотной растительности и их лабораторный анализ. Отбор образцов для хроматографического анализа проводился в ПН 2 в низком ряме. Исходным сырьем послужили лапки сосны сибирской (*Pinus sylvestris* L.). Согласно техническим условиям ГОСТ-21769-84, отбор образцов проводился во время экспедиционных выездов в

мае, июне, августе и сентябре [ГОСТ-21769-84]. Отбренные лапки сосны в лабораторных условиях нарезались длиной 3–5 мм, после чего из измельченного сырья массой не менее 100 г проводилась экстракция эфирного масла методом гидродистилляции в течение 3 ч, как это описано в [Ткачев, 2008]. После экстракции масло отделялось, сушилось безводным сульфатом натрия и помещалось в стеклянные хроматографические флаконы. Выход эфирного масла рассчитывался в процентах от абсолютной сухой массы, для чего навески сырья высушивали в бюксах в сушильном шкафу при температуре  $+40^\circ\text{C}$  до установления постоянной массы. Состав эфирного масла определялся на хроматографе Agilent Technologies 7890 GC System. Разделение осуществлялось на капиллярной колонке HP-5 длиной 30 м с внутренним диаметром 0,25 мм. Температура испарителя –  $280^\circ\text{C}$ , объем пробы – 1 мкл, разделение потока – 100 : 1. Температурный режим колонки:  $50^\circ\text{C}$  (2 мин),  $50\text{--}240^\circ\text{C}$  ( $4^\circ/\text{мин}$ ),  $240\text{--}280^\circ\text{C}$  ( $20^\circ/\text{мин}$ ),  $280^\circ\text{C}$  (5 мин). Газ-носитель – гелий с постоянным потоком 1 мл/мин. Определение компонентов проводилось с использованием собственной библиотеки хромато-масс-спектрометрических данных. Количественный анализ выполнялся методом внутренней нормировки по площадям газохроматографических пиков, вычисленных с помощью пакета Agilent ChemStation без использования корректирующих коэффициентов.

### Результаты и их обсуждение

*Пространственная изменчивость аэроионов.* В результате проведенных измерений была определена концентрация аэроионов в типичных ландшафтах Бакчарского болота (ПН 1–4), которая изменя-

ласть в пределах  $750\text{--}850\text{ см}^{-3}$  для положительных и  $200\text{--}700\text{ см}^{-3}$  для отрицательных аэроионов. В большинстве случаев преобладали положительные ионы (табл. 2, рис. 4). Обнаружено, что с уменьшением обводненности почвы, по направлению от топи к заболоченному лесу, медианные значения концентрации положительных ионов снижаются с  $1\,000$  до  $750\text{ см}^{-3}$ , а отрицательные, наоборот, возрастают более чем в 3 раза. Также противоположно изменяются значения дисперсии у обоих полярностей ионов (рис. 4). При этом практически во всех пунктах наблюдений иногда наблюдалась очень низкая концентрация ионов – около  $10\text{ см}^{-3}$ , являющаяся нижним пределом чувствительности счетчика.

Иная ситуация наблюдалась на ландшафтах с относительно сухой подстилающей поверхностью

(ПН 5–7). Концентрации ионов обоих полярностей, как и их дисперсии, возрастают при удалении от болота. При этом измерения на стационаре (ПН 7) показали, что концентрация отрицательных аэроионов на селитебной территории в населенном пункте более чем в 3 раза ниже концентрации в лесу. Предположительно, мы это связываем с более высокой аэрозольной загрязненностью приземного слоя в населенном пункте и у автотрассы (рис 2, а).

Следует также отметить общую тенденцию к увеличению концентрации всех аэроионов в направлении от болота к лесу, которая хорошо видна на рис. 4, что, как будет показано далее, вероятно связано с ЛОС, выделяемыми растительностью, в первую очередь хвойными деревьями и кустарниками, обильно произрастающим на рямках и в лесу.

Таблица 2

Основные статистические характеристики изменчивости содержания положительных/отрицательных аэроионов в пунктах наблюдений по данным измерений в 2020–2021 гг.

Table 2

Main statistical parameters of amount variation of positive/negative air ions at sites based on measurement data in 2020–2021

| Статистическая характеристика | Пункт наблюдения |            |            |            |             |             |             |
|-------------------------------|------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
|                               | 1                | 2          | 3          | 4          | 5           | 6           | 7           |
| Среднее                       | 860/330          | 740/500    | 740/460    | 745/720    | 1 430/720   | 1 970/1 290 | 2 100/530   |
| Медиана                       | 1 000/240        | 870/555    | 850/380    | 740/780    | 1 450/640   | 2 410/1 660 | 2 450/520   |
| Межквартильный размах         | 1 280/220        | 480/410    | 300/430    | 240/490    | 780/1030    | 1 390/1 185 | 300/310     |
| 5-й процентиль                | 10/10            | 10/10      | 250/10     | 280/50     | 60/10       | 20/30       | 1820/60     |
| 25-й процентиль               | 90/170           | 510/290    | 670/240    | 635/490    | 1 100/180   | 1 180/655   | 2 270/370   |
| 75-й процентиль               | 1 370/390        | 990/700    | 970/670    | 875/980    | 1 880/1 210 | 2 570/1 840 | 2 570/680   |
| 95-й процентиль               | 1 930/720        | 1 220/1040 | 1 290/1170 | 1 220/1570 | 2 320/1 750 | 3 980/2 660 | 3 000/1 140 |

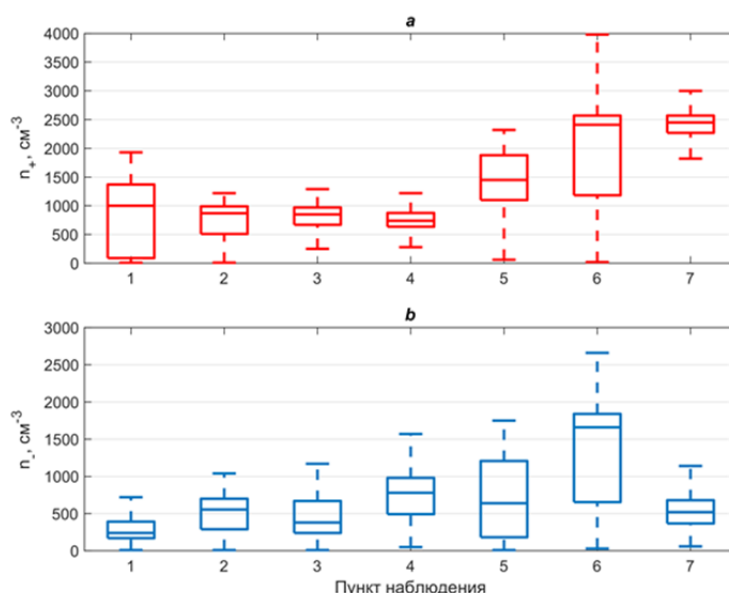


Рис. 4. Изменчивость содержания положительных (а) и отрицательных (b) аэроионов в пунктах наблюдений по данным измерений в 2020–2021 гг.

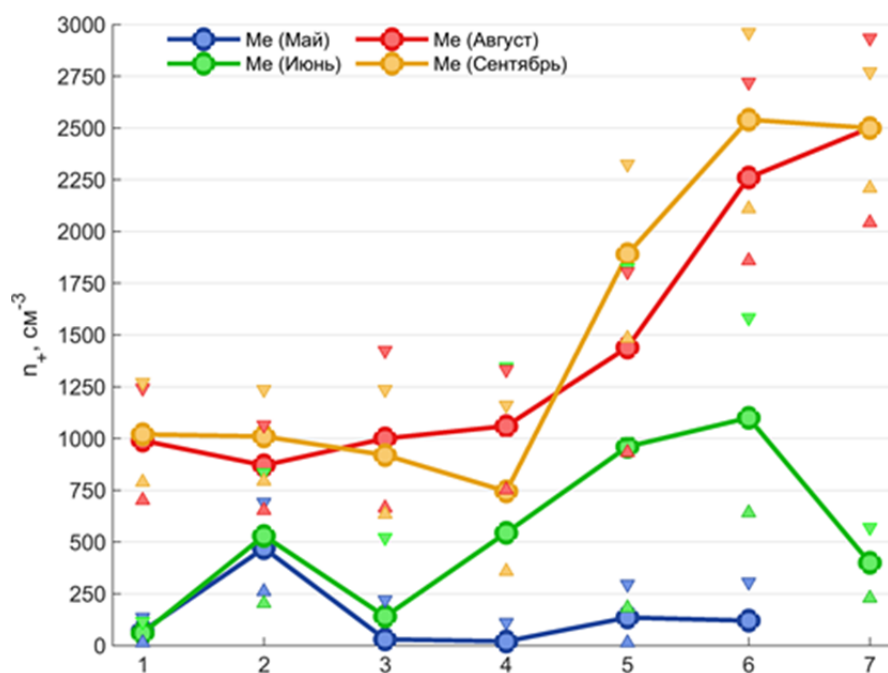
Fig. 4. Amount variation of positive (a) and negative (b) air ions at sites based on measurement data in 2020–2021

**Временная изменчивость аэроионов.** Как было сказано во введении, аэроионы подвержены влиянию различных геофизических и метеорологических факторов. Поэтому при анализе изменчивости ионов необходимо учитывать изменчивость метеорологических величин, изменения фаз вегетационного периода, обводненности почв и почвенной эмиссии радона. Далее рассмотрим оценки сезонного содержания и изменчивости аэроионов на различных участках ландшафтного профиля Бакчарского болота.

На рис. 5 и 6 и в табл. 3 приведены обобщенные результаты измерений концентраций положительных и отрицательных ионов, проведенных на разных типах ландшафтов в мае, июне, августе и сентябре 2020–2021 гг. На рис. 5 видно, что во временном ходе положительных аэроионов наблюдается выраженная сезонность. В мае и июне были зарегистрированы значения концентрации положительных аэроионов до  $600 \text{ см}^{-3}$  на обводненных участках и до  $1\,000 \text{ см}^{-3}$  на более сухих. В августе и сентябре кон-

центрации значительно возросли – до  $1\,000 \text{ см}^{-3}$  на болотных ландшафтах и до  $2\,500 \text{ см}^{-3}$  на поляне и в лесу. В свою очередь максимальные концентрации положительных аэроионов для августа и сентября в несколько раз выше, чем для тех же ПН в мае. Наименьшие концентрации положительных ионов наблюдаются в мае, а отрицательных – в июне.

Во временном ходе содержания отрицательных аэроионов также прослеживается сезонность. Однако в мае наблюдается аномалия, когда на болотных ландшафтах отмечаются более высокие концентрации, чем в другие месяцы. В мае происходит активное цветение многих растений, а также выделение активных веществ хвойными деревьями, что, по данным некоторых исследователей [Севостьянов, Грязькин, 2016], приводит к повышенному образованию отрицательных аэроионов. Стоит также отметить, что от топи к поляне увеличивается количество цветущих болотных растений – багульника, кассандры, брусники, а также хвойных деревьев.



**Рис. 5. Изменения концентрации положительных аэроионов вдоль ландшафтного профиля по данным измерений в мае–сентябре 2020–2021 гг.**

Здесь и на рис. 6: кружки – медианные значения, треугольники – верхняя ( $W_{up}$ ) и нижняя ( $W_{down}$ ) границы доверительного интервала, определяемые как  $W_{up} = P_{75} + 1,5 \times IQR$  и  $W_{down} = P_{25} - 1,5 \times IQR$ , где  $P_{25}$  и  $P_{75}$  – 25- и 75-й процентиля,  $IQR$  – межквартильный размах

**Fig. 5. Changing of the positive air ion concentration along the landscape track based on measurement data in May–September of 2020–2021**

Here and in the fig. 6: circles are median values, triangles are upper ( $W_{up}$ ) and bottom ( $W_{down}$ ) borders of confidence interval, determined as  $W_{up} = P_{75} + 1,5 \times IQR$  and  $W_{down} = P_{25} - 1,5 \times IQR$ , where  $P_{25}$  and  $P_{75}$  are 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles,  $IQR$  – interquartile range

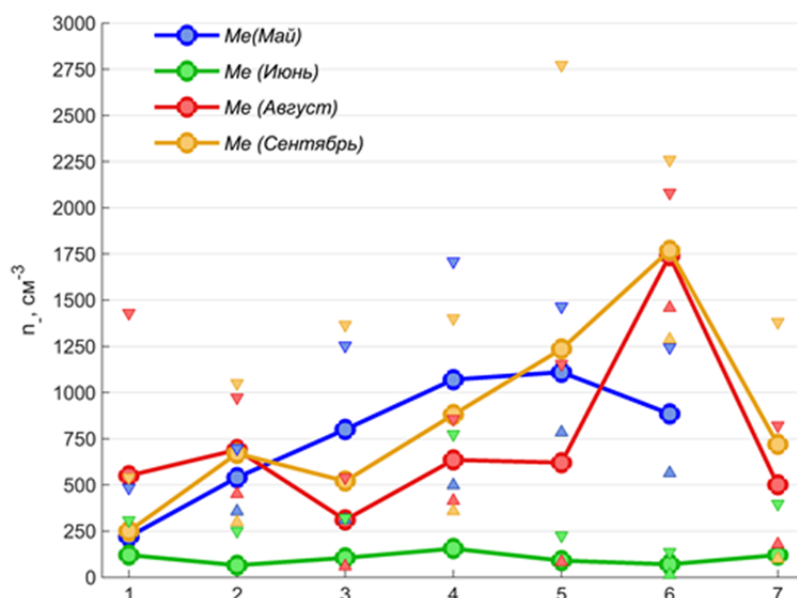


Рис. 6. Изменения концентрации отрицательных аэроионов вдоль ландшафтного профиля по данным измерений в мае–сентябре 2020–2021 гг.

Fig. 6. Changing of the negative air ion concentration along the landscape track based on measurement data in May–September of 2020–2021

Таблица 3

Основные статистические характеристики изменчивости содержания положительных/отрицательных аэроионов в пунктах наблюдений по данным измерений в разные месяцы 2020–2021 гг.

Table 3

Main statistical parameters of amount variation of positive/negative air ions at sites based on measurement data in different months of 2020–2021

| Месяц    | Статистическая характеристика | Пункт наблюдения |           |           |           |             |             |             |
|----------|-------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
|          |                               | 1                | 2         | 3         | 4         | 5           | 6           | 7           |
| Май      | Среднее                       | 80/240           | 480/540   | 70/810    | 70/1 080  | 190/1 110   | 180/920     | нет данных  |
|          | Медиана                       | 70/220           | 470/540   | 30/800    | 20/1 070  | 140/1 110   | 120/890     |             |
|          | 5-й процентиль                | 40/90            | 400/440   | 10/580    | 10/640    | 90/930      | 80/660      |             |
|          | 95-й процентиль               | 120/460          | 610/740   | 200/1090  | 330/1 500 | 460/1 370   | 580/1290    |             |
| Июнь     | Среднее                       | 60/130           | 520/120   | 180/140   | 580/230   | 980/120     | 1140/90     | 400/160     |
|          | Медиана                       | 60/120           | 530/70    | 140/110   | 550/160   | 960/90      | 1100/70     | 400/120     |
|          | 5-й процентиль                | 20/40            | 270/10    | 40/30     | 300/60    | 550/20      | 790/40      | 290/80      |
|          | 95-й процентиль               | 130/240          | 700/730   | 380/440   | 1 000/510 | 1 350/250   | 1 360/150   | 580/400     |
| Август   | Среднее                       | 970/560          | 860/700   | 1 030/340 | 1 050/650 | 1 390/620   | 2 270/1 770 | 2 510/510   |
|          | Медиана                       | 990/550          | 870/690   | 1 000/310 | 1 060/640 | 1 440/620   | 2 260/1 740 | 2 500/500   |
|          | 5-й процентиль                | 790/240          | 750/520   | 810/210   | 820/530   | 1 080/400   | 1 800/1 550 | 2 250/330   |
|          | 95-й процентиль               | 1 110/970        | 970/880   | 1 280/590 | 1 270/870 | 1 710/850   | 2 800/2 000 | 2 940/710   |
| Сентябрь | Среднее                       | 1 050/250        | 1 010/670 | 930/560   | 760/870   | 1 920/1060  | 2 540/1 800 | 2 470/730   |
|          | Медиана                       | 1 020/250        | 1 010/670 | 920/520   | 750/880   | 1 890/1240  | 2 540/1 770 | 2 500/720   |
|          | 5-й процентиль                | 840/70           | 870/440   | 730/260   | 570/490   | 1 700/200   | 2 320/1 540 | 2 220/340   |
|          | 95-й процентиль               | 1 450/420        | 1 160/890 | 1 180/970 | 980/1 180 | 2 230/1 630 | 2 800/2 150 | 2 650/1 140 |

Взаимосвязь аэроионов и ЛОС. Для оценки влияния ЛОС на аэроионы в течение мая, июня, августа и сентября 2021 г. были проведены одновременные измерения счетных концентраций аэроионов с по-

мощью двух приборов на двух близкорасположенных участках (удалении друг от друга не более 7 м) в низком ярусе (ПН 2) и отборы образцов растительности (*Pinus sylvestris* L.) на одном из них. Участок I

был относительно открытым, сосны находились на расстоянии нескольких метров от прибора. На участке II измерения проводились в плотном пологом сосен, здесь же отбирались образцы – по три сосновых лапки с каждого дерева. Всего было использовано семь одних и тех же сосен, располагавшихся вокруг измерительного прибора.

На рис. 7 показаны результаты этих измерений. Как видно, на участке I концентрации положительных и отрицательных аэроионов в мае более чем в 5 раз выше, чем на участке II. В июне наблюдается схожая картина, но разница между концентрациями аэроионов на двух участках уменьшается. Кроме того, в июне отмечается более сильный разброс значений концентраций аэроионов обеих полярностей на участке I. В августе концентрации аэроионов обеих полярностей еще более возрастают и выравниваются на обоих участках.

Из отобранных образцов лапок сосны по ранее описанной методике была осуществлена экстракция эфирного масла и проведен его хроматографический анализ. Один из результатов анализа в виде хроматограммы эфирного масла, извлеченного из образцов июньской сосны, показан на рис. 8. Анализ показал, что содержание эфирного масла в разные месяцы заметно различается. Наиболее насыщены эфирным маслом оказались лапки сосны, отобранные в июне (2,25 мл), которые в 2 раза больше содержали масла, чем отобранными в августе и сентябре (1,22 и

1,53 мл соответственно). Полученные результаты не противоречат литературным данным и отражают естественный цикл развития дерева [Фуксман, 1999; Trapp, Croteau, 2001].

Качественный состав эфирных масел, экстрагированных во все месяцы отбора, довольно единообразен. Общими компонентами эфирных масел являются 10 монотерпенов, причем большинство из них присутствовали на протяжении всех месяцев исследований (табл. 4). Во все месяцы  $\alpha$ -пинен является доминирующим веществом, в минимальном количестве содержатся сабинен,  $\gamma$ -терпинен и борнилацетат.

Вместе с тем абсолютные концентрации монотерпенов подвержены значительным колебаниям в течение летнего периода. Бросается в глаза отсутствие таких компонентов, как трициклен, сабинен,  $\Delta$ -3-карен и  $\gamma$ -терпинен в июньском эфирном масле. В то же время мы видим, что эти компоненты в значительном количестве появляются в образцах эфирного масла, отобранных в августе и сентябре. Количественное содержание основных компонентов в сезоне изменяется заметным образом, причем если вклад  $\alpha$ -пинена и  $\beta$ -мирцена снижается от лета к осени, то трициклена и борнилацетата в ходе вегетации, напротив, увеличивается. Изменения концентраций остальных монотерпенов незначительны на протяжении всего сезона, которые колеблются около среднего для каждого компонента значения.

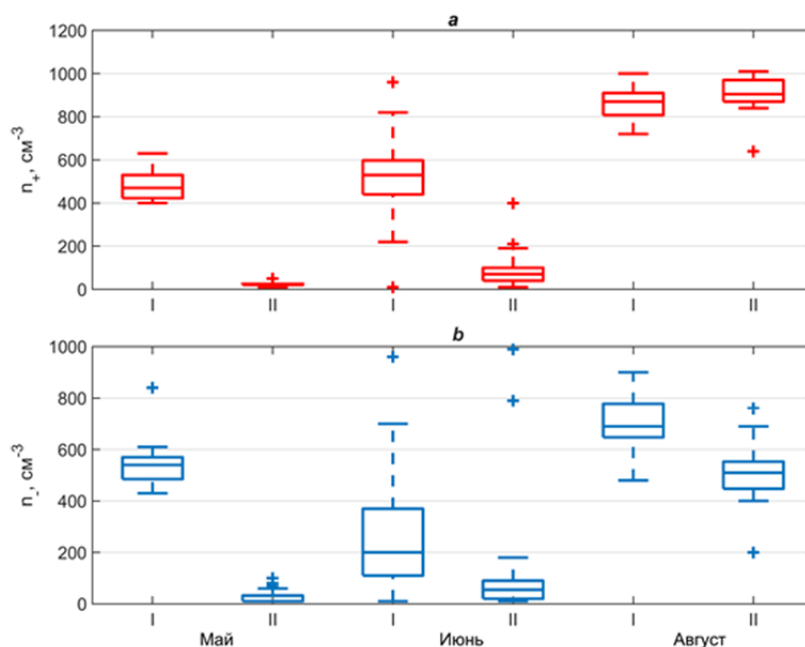


Рис. 7. Изменение концентраций положительных (а) и отрицательных (б) аэроионов на двух близко расположенных участках в пределах низкого рьяма по данным измерений в мае, июне и августе 2021 г.

Fig. 7. Changing of the positive (a) and negative (b) air ion concentrations on two closely located plots within a low ryam based on measurement data in May, June and August of 2021

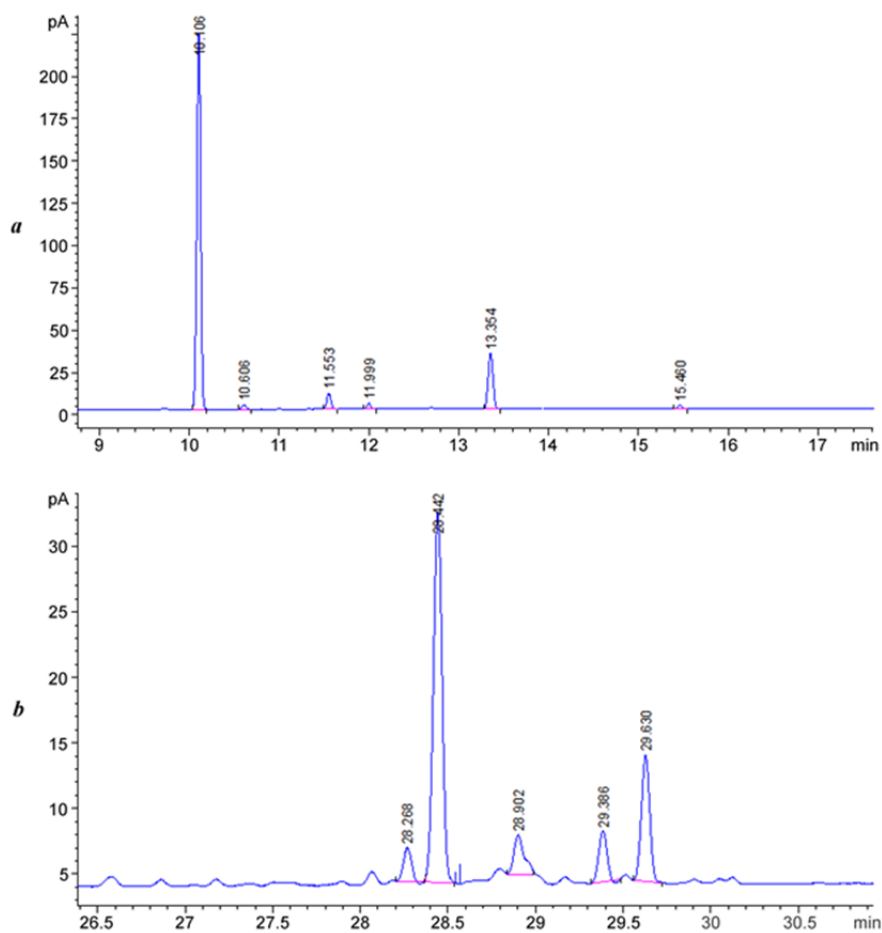


Рис. 8. Хроматограмма, показывающая наличие основных компонентов эфирного масла в образцах сосны (*Pinus sylvestris* L.), отобранных в низком ряме в июне 2021 г.

Fig. 8. Chromatogram of the main component's content of essential oil in samples of pine (*Pinus sylvestris* L.), taking in the low ryam in June 2021

Временные изменения содержания основных компонентов эфирного масла в образцах сосны (*Pinus sylvestris* L.), отобранных в низком ряме в 2021 г., %

Таблица 4

Temporal changing of the main component's content of essential oil in samples of pine (*Pinus sylvestris* L.) taking in the low ryam in 2021, %

Table 4

| Компонент                          | Июнь        | Август      | Сентябрь    |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Трициклен                          | —           | 0,96        | 11,00       |
| α-пинен                            | 41,60       | 37,50       | 28,10       |
| Камфен                             | 2,85        | 3,94        | 3,53        |
| Сабинен                            | —           | 0,50        | —           |
| β-пинен                            | 1,60        | 2,97        | 2,35        |
| β-мирцен                           | 5,54        | 1,83        | 1,68        |
| Δ-3-карен                          | —           | 12,30       | 9,77        |
| Лимонен + β-фелландрен             | 6,53        | 3,84        | 4,85        |
| γ-терпинен                         | —           | 1,14        | 1,09        |
| Борнилацетат                       | 0,61        | 0,25        | 2,57        |
| Сумма монотерпеновых углеводородов | 59,50       | 66,90       | 52,20       |
| Терпены/сесквитерпены              | 59,50/40,50 | 66,86/33,14 | 52,20/47,80 |

Примечание. «—» компонент не обнаружен.

Note. «—» the component is not detected.

Ландшафты и экосистемы в ПН отличаются произрастающей здесь растительностью. Как было сказано выше, в растительном покрове низкого рья преобладает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – один из основных источников выделения в атмосферу ЛОС, которые, в свою очередь, в ходе фотохимических реакций могут приводить к образованию мелкодисперсного аэрозоля или выступать самим в качестве молекулярных кластеров. Эти частицы и кластеры являются стоком для легких ионов и, в зависимости от их размера, формируют средние и тяжелые аэроионы. Поэтому одной из возможных причин наблюдаемого различия между концентрациями аэроионов, зарегистрированных в начале и конце вегетационного периода (рис. 5, 6), а также на двух участках на ПН 2 (рис. 7), является различная интенсивность взаимодействия аэроионов и ЛОС, в частности терпенов. Концентрация ЛОС в воздухе зависит от интенсивности эманации терпенов из растений, в частности из сосновой хвои, имеющей выраженную сезонную изменчивость, и количества хвойных на разных ландшафтных участках с различной площадью и плотностью покрытия территории.

### Заключение

Данная работа представляет результаты экспедиционных измерений содержания аэроионов в условиях хорошей погоды в приземном слое и хромато-

графического анализа образцов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), выполненных в теплые периоды 2020–2021 гг. Измерения были проведены на лесоболотном ландшафтном профиле и стационаре «Васюганье», которые расположены на территории Бакчарского болота – северо-восточной периферии Большого Васюганского болотного комплекса. Хроматографический анализ был выполнен в лабораторных условиях в Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН с помощью газового хроматографа.

На основе проведенных измерений получены оценки пространственно-временной изменчивости концентрации аэроионов в различных лесоболотных ландшафтах. Отмечено, что с увеличением заболоченности наблюдается снижение концентрации аэроионов. Однако в течение вегетационного периода на всех ландшафтах она возрастает.

Результаты хроматографического анализа образцов лапок сосны, отобранных в течение вегетационного периода 2021 г. на одном из пунктов наблюдений в низком рьяе, показали определенную зависимость содержания летучих органических соединений, входящих в состав биомассы сосны, от фазы вегетационного периода. Это позволило еще раз подтвердить гипотезу о наличии взаимосвязи аэроионов с летучими органическими соединениями. И все же данное утверждение требует более детального и комплексного исследования.

### Список источников

- ГОСТ-21769-84. Зеленъ древесная. Технические условия. Утвержден: 23.03.1984 Государственный комитет СССР по стандартам.
- Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Химиздат, 2001. 352 с.
- Киселев М.В., Воропай Н.Н., Дюкарев Е.А. Особенности температурного режима почв верхового болотного массива // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 29, № 7/2. С. 93–98.
- Севостьянов В.А., Грязькин А.В. Оценка аэроионной способности древесных растений для создания локальных фитологических ингаляторов // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. С. 82–86.
- Ткачев А.В. Исследование летучих веществ растений. Новосибирск: Офсет, 2008. 969 с.
- Фуксман И.Л. Влияние природных и антропогенных факторов на метаболизм веществ вторичного происхождения у древесных растений: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 1999.
- Blanchard D. C. Positive Space Charge from the Sea // J. Aerosol Sci. 1966. V. 23. P. 507–515.
- Chalmers J. A. Negative electric fields in mist and fog // J. Atmos. Terr. Phys. 1952. V. 2. P. 155–159.
- Dhanorkar S., Kamra A. K. Relation between electrical conductivity and small ions in the presence of intermediate and large ions in the lower atmosphere // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 20345–20360.
- Duce R.A., Monhen V.A., Zimmerman P.R., Grosjean D., Cautreels W., Chatfield R., Jaenicke R., Ogren J.A., Pellizzari E.D., Wallace G.T. Organic matter in the global troposphere // Reviews of Geophysics and space physics. 1983. V. 21, No. 4. P. 921–952.
- Dyukarev E.A. Influence of air temperature and snow cover on the characteristics of the season freeze layer of soil // Earth's Cryosphere. 2015. V. 3 (9). P. 45–51.
- Ehn M., Junninen H., Petaja T., Kurten T., Kerminen V.-M., Schobesberger S., Manninen H.E., Ortega I.K., Vehkamäki H., Kulmala M., Worsnop D.R. Composition and temporal behavior of ambient ions in the boreal forest // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 8513–8530. doi: 10.5194/acp-10-8513-2010
- Eisele F.L. Natural and atmospheric negative ions in the troposphere // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 2183–2196.
- Guenther A.B., Hewitt C.N., Erickson D., Fall R., Geron C., Graedel T., Harley P., Klinger L., Lerdau M., MacKay W.A., Pierce T., Scholes B., Steinbrecher R., Tallamraju R., Taylor J., Zimmerman P.R. A global model of natural volatile organic compound emissions // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 8873–8892.
- Harrison R.G., Tammet H. Ions in the terrestrial atmosphere and other solar system atmospheres // Space Sci. Rev. 2008. V. 137. P. 107–118. doi: 10.1007/s11214-008-9356-x

- Hirsikko A., Nieminen T., Gagne S., Lehtipalo K., Manninen H. E., Ehn M. et al.** Atmospheric ions and nucleation: A review of observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11 (2). P. 767–798. doi: 10.5194/acp-11-767-2011
- Israel H.** Atmospheric Electricity // Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, 1970. 317 p.
- Jayaratne E.R., Ling X., Morawska L.** Role of vegetation in enhancing radon concentration and ion production in the atmosphere // *Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 45 (15). P. 6350–6355. doi: 10.1021/es201152g
- Junninen H., Hulkkonen M., Riipinen I., Nieminen T., Hirsikko A., Suni T. et al.** Observations on nocturnal growth of atmospheric clusters // *Tellus*. 2008. V. 60 (3). P. 365–371. doi: 10.1111/j.1600-0889.2008.00356.x
- Kulmala M., Kontkanen J., Junninen H., Lehtipalo K., Manninen H.E., Nieminen T. et al.** Direct observations of atmospheric aerosol nucleation. *Science*. 2013. V. 339 (6122). P. 943–946. doi: 10.1126/science.1227385
- Laakso L., Hirsikko A., Groenholm T., Kulmala M., Luts A., Parts T.-E.** Waterfalls as sources of small charged aerosol particles // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 2271–2275. doi: 10.5194/acp-7-2271-2007
- Lee S.-H., Gordon H., Yu H., Lehtipalo K., Haley R., Li Y., Zhang R.** New particle formation in the atmosphere: From molecular clusters to global climate // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2019. V. 124. P. 7098–7146. doi: 10.1029/2018JD029356
- Lim J.H., Kim J.C., Son Y.S., Sunwoo Y., Han J.S.** Seasonal variations of monoterpene emissions from *Pinus densiflora* in East Asia // *Chemosphere*. 2008. V. 73. P. 470–478.
- Ling X., Jayaratne R., Morawska L.** Air ion concentrations in various urban outdoor environments // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44. P. 2186–2193.
- Matsunaga S.N., Niwa S., Mochizuki T., Tani A., Kusumoto D., Utsumi Y., Enoki T., Hiura T.** Seasonal variation in basal emission rates and composition of mono- and sesquiterpenes emitted from dominant conifers in Japan // *Atmos. Environ.* 2013. V. 69. P. 124–130.
- Rose C., Zha Q., Dada L., Yan C., Lehtipalo K., Junninen H., et al.** Observations of biogenic ion-induced cluster formation in the atmosphere // *Science Advances*. 2018. V. 4 (4). P. eaar5218. doi: 10.1126/sciadv.aar5218
- Trapp S., Croteau R.** Defensive resin biosynthesis in conifers // *Annu Rev Plant Physiol.* 2001. V. 52. P. 689–724.

## References

- GOST-21769-84. *Zelen' drevesnaya. Tekhnicheskiye usloviya* [Tree verdure. Specifications], Approved: 23.03.1984 USSR National Committee on Standards 923. In Russian.
- Isidorov V.A. *Organicheskaya khimiya atmosfery* [Organic chemistry of the atmosphere] – 3rd edition, revised and supplemented. St. Petersburg: Himizdat, 2001. 352 p. In Russian.
- Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A. *Osobennosti temperaturnogo rezhima pochv verkhovogo bolotnogo massiva* [Features of the temperature regime of soils of raised bogs] // *Russian Physics Journal* 2016. V. 29. No. 7/2 pp. 93–98. In Russian.
- Sevastyanov V.A., Gryazkin A.V. *Otsenka aeroionnoy sposobnosti drevesnykh rasteniy dlya sozdaniya lokal'nykh fitologicheskikh ingalyatoriye* [Assessment of aero ionic ability of wood plants for creation local phytological inhalatoriums] // *Advances in current natural sciences*. 2016. No. 9. pp. 82–86. In Russian.
- Tkachev A.V. *Issledovaniye letuchikh veshchestv rasteniy* [Study of plant volatiles]. Novosibirsk: «Ofset», 2008. 969 p. In Russian.
- Fucsmann I.L. *Vliyaniye prirodnikh i antropogennykh faktorov na metabolism veshchestv vtorichnogo proiskhozhdeniya u drevesnykh rasteniy* [Influence of natural and anthropogenic factors on the metabolism of substances of secondary origin in woody plants]: Abstract of the dissertation for the Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Biological Sciences. St.Petersburg, 1999. In Russian.
- Blanchard D.C. Positive Space Charge from the Sea // *J. Aerosol Sci.* 1966. V. 23. pp. 507–515.
- Chalmers J.A. Negative electric fields in mist and fog // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1952. V. 2. pp. 155–159.
- Dhanorkar S., Kamra A. K. Relation between electrical conductivity and small ions in the presence of intermediate and large ions in the lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. pp. 20345–20360.
- Duce R.A., Monhen V.A., Zimmerman P.R., Grosjean D., Cautreels W., Chatfield R., Jaenicke R., Ogren J.A., Pellizzari E.D., Wallace G.T. Organic matter in the global troposphere // *Reviews of Geophysics and space physics*. 1983. V. 21. No. 4. pp. 921–952.
- Dyukarev E.A. Influence of air temperature and snow cover on the characteristics of the season freeze layer of soil // *Earth's Cryosphere*. 2015. V. 3 (9). pp. 45–51.
- Ehn M., Junninen H., Petaja T., Kurten T., Kerminen V.-M., Schobesberger S., Manninen H. E., Ortega I. K., Vehkamaki H., Kulmala M., Worsnop D.R.: Composition and temporal behavior of ambient ions in the boreal forest // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. pp. 8513–8530. doi: 10.5194/acp-10-8513-2010
- Eisele F. L. Natural and atmospheric negative ions in the troposphere // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. pp. 2183–2196.
- Guenther A.B., Hewitt C.N., Erickson D., Fall R., Geron C., Graedel T., Harley P., Klinger L., Lerdau M., MacKay W.A., Pierce T., Scholes B., Steinbrecher R., Tallamraju R., Taylor J., Zimmerman P.R. A global model of natural volatile organic compound emissions // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. pp. 8873–8892.
- Harrison R.G., Hirsikko A. Ions in the terrestrial atmosphere and other solar system atmospheres // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. pp. 107–118. doi: 10.1007/s11214-008-9356-x
- Hirsikko A., Nieminen T., Gagne S., Lehtipalo K., Manninen H. E., Ehn M., et al. Atmospheric ions and nucleation: A review of observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11 (2). pp. 767–798. doi: 10.5194/acp-11-767-2011
- Israel H. Atmospheric Electricity // Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, 1970. p. 317
- Jayaratne E.R., Ling X., Morawska L. Role of vegetation in enhancing radon concentration and ion production in the atmosphere // *Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 45 (15). pp. 6350–6355. doi: 10.1021/es201152g
- Junninen H., Hulkkonen M., Riipinen I., Nieminen T., Hirsikko A., Suni T., et al. Observations on nocturnal growth of atmospheric clusters // *Tellus*. 2008. V. 60(3). pp. 365–371. doi: 10.1111/j.1600-0889.2008.00356.x
- Kulmala M., Kontkanen J., Junninen H., Lehtipalo K., Manninen H. E., Nieminen T., et al. Direct observations of atmospheric aerosol nucleation. *Science*. 2013. V. 339(6122). pp. 943–946. doi: 10.1126/science.1227385

- Laakso L., Hirsikko A., Groenholm T., Kulmala M., Luts A., Parts T.-E.: Waterfalls as sources of small charged aerosol particles // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. pp. 2271–2275. doi: 10.5194/acp-7-2271-2007
- Lee S.-H., Gordon H., Yu H., Lehtipalo K., Haley R., Li Y., Zhang R. New particle formation in the atmosphere: From molecular clusters to global climate // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2018. V. 124. pp. 7098–7146. doi: 10.1029/2018JD029356
- Lim J.H., Kim J.C., Kim K.J., Son Y.S., Sunwoo Y., Han J.S. Seasonal variations of monoterpene emissions from *Pinus densiflora* in East Asia // Chemosphere. 2008. V. 73. pp. 470–478.
- Ling X., Jayaratne R., Morawska L. Air ion concentrations in various urban outdoor environments // Atmos. Environ. 2010. V. 44. pp. 2186–2193.
- Matsunaga S.N., Niwa S., Mochizuki T., Tani A., Kusumoto D., Utsumi Y., Enoki T., Hiura T. Seasonal variation in basal emission rates and composition of mono- and sesquiterpenes emitted from dominant conifers in Japan // Atmos. Environ. 2013. V. 69. pp. 124–130.
- Rose C., Zha Q., Dada L., Yan C., Lehtipalo K., Junninen H., et al. Observations of biogenic ion-induced cluster formation in the atmosphere // Sciences Advances. 2018. V. 4(4). pp. eaar5218. doi: 10.1126/sciadv.aar5218
- Trapp S., Croteau R. Defensive resin biosynthesis in conifers // Annu. Rev. Plant Physiol. 2001. V. 52. pp. 689–724.

#### Информация об авторах:

**Оглезнева М.В.**, аспирант, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: oglezneva.m@yandex.ru

**Веретенникова Е.Э.**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия; доцент, фармацевтический факультет, Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия.

E-mail: lena2701@yandex.ru

**Нагорский П.М.**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: npm\_sta@mail.ru

**Пустовалов К.Н.**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия; доцент, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: const.pv@yandex.ru

**Сат А.А.**, ведущий инженер, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: artysh.sat@gmail.com

**Смирнов С.В.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия; доцент, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: smirnov@imces.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

#### Information about the authors:

**Oglezneva M.V.**, Postgraduate Student, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: oglezneva.m@yandex.ru

**Veretennikova E.Ed.**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia; Associate Professor, Faculty of Pharmacy, Siberian State Medical University, Tomsk, Russia.

E-mail: lena2701@yandex.ru

**Nagorskiy P.M.**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute of Monitoring of Climate and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: npm\_sta@mail.ru

**Pustovalov K.N.**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia; Associate Professor, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: const.pv@yandex.ru

**Sat A.A.**, Leading Engineer, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute of Monitoring of Climate and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: artysh.sat@gmail.com

**Smirnov S.V.**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia; Associate Professor, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: smirnov@imces.ru

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 08.07.2022; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 08.11.2022*

*The article was submitted 08.07.2022; approved after reviewing 15.09.2022; accepted for publication 08.11.2022*