

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт мониторинга климатических и экологических систем  
Сибирского отделения Российской академии наук

Оглезнева Мария Викторовна

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ  
АТМОСФЕРЫ ЮГА СИБИРИ**

**Специальность 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате»**

Диссертация на соискание учёной степени  
Кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
к. ф.-м. н.,  
Пустовалов Константин Николаевич

Томск, 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	7
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЁГКИХ ИОНОВ И ПОЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЕЙ ВОЗДУХА .....	16
1.1 Общие представления об электрическом состоянии приземного слоя.....	16
1.2 Электрическое состояние приземного слоя под воздействием метеорологических процессов .....	23
1.3 Электрические характеристики приземного слоя атмосферы в различных физико-географических условиях .....	27
1.4. Выводы по главе.....	30
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ.....	31
2.1. Экспериментально-измерительный комплекс ИМКЭС СО РАН .....	31
2.2. Проведение экспедиционных измерений .....	37
2.3. Применение данных спутникового мониторинга и данных сети Росгидромет .....	45
2.4. Оценка изменчивости концентрации лёгких ионов в условиях «хорошей погоды» в Томске .....	48
2.5 Выводы по главе.....	55
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ВОДНОГО АЭРОЗОЛЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ .....	56
3.1. Первичный этап отбора и обработки данных .....	56
3.2. Оценки изменчивости электропроводности в различных синоптических условиях .....	57
3.3. Влияние водных объектов на электрическое состояние ПС .....	68

3.4. Выводы по главе.....	77	
<b>ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ РЕЛЬЕФА И ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЮГА СИБИРИ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОДНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ .....</b>		<b>79</b>
4.1. Особенности электрическое состояния ПС в болотных ландшафтах .....	79	
4.1.1. Проведение измерений атмосферно-электрических величин и отбор проб на болоте, описание лабораторного анализа.....	79	
4.1.2. Влияние болотных ландшафтов на изменчивость концентраций лёгких ионов .....	86	
4.1.3. Влияние растительности на изменчивость содержания лёгких ионов в вегетационный период.....	94	
4.2. Исследование особенностей изменчивости концентрации лёгких ионов в типичных геометрических формах горных ландшафтов .....	100	
4.3. Выводы по главе.....	109	
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>112</b>	
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>114</b>	

## ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АВ	арктическая воздушная масса
АФ	арктический фронт
ВМ	воздушная масса
вдп.	водопад
ВСВ	Всемирное скоординированное время
ГО ИМКЭС	геофизическая обсерватория Института мониторинга климатических и экологических систем
ГКЛ	галактические космические лучи
ГМС	гидрометеорологическая станция
ГЭЦ	Глобальная электрическая цепь
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
ЛОС	летучие органические соединения
ПН	пункт(ы) наблюдений
ПС	приземный слой атмосферы
ПСА	пограничный слой атмосферы
ПФ	полярный фронт
ТФ	теплый фронт
УВ	умеренная воздушная масса
ХФ	холодный фронт
ФО	фронт окклюзии
УБВ	уровень болотных вод
$PM_{2.5}$	концентрация аэрозольных частиц размером 2,5 мкм и менее, мкг/м <sup>3</sup>
$PM_{10}$	концентрация аэрозольных частиц размером 10 мкм и менее, мкг/м <sup>3</sup>
<i>NPF</i>	(new particle formation events) случаи образования новых частиц
$n_+$	концентрация положительных лёгких ионов, ионов/см <sup>3</sup>
$n_-$	концентрация отрицательных лёгких ионов, ионов/см <sup>3</sup>
$\lambda_-$	отрицательная электропроводность воздуха, фСм/м
$\lambda_+$	положительная электропроводность воздуха, фСм/м

$\nabla\varphi$	градиент потенциала электрического поля, В/м
$i$	плотность электрического тока, А
$\alpha$	коэффициент рекомбинации лёгких ионов, $1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
$q$	интенсивность ионообразования, пар ионов/ $\text{см}^{-3}$
$b_1$	подвижность положительных лёгких ионов, $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
$b_{01}$	подвижность положительных лёгких ионов в нормальных условиях, $1,37 \cdot 10^{-4}, \text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
$b_2$	подвижность отрицательных лёгких ионов, $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
$b_{02}$	подвижность отрицательных лёгких ионов в нормальных условиях, $1,89 \cdot 10^{-4}, \text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
$E$	напряженность электрического поля атмосферы, В/м
$e$	элементарный заряд $1,14 \cdot 10^{-19}$ , Кл
$z$	ось координат, перпендикулярная подстилающей поверхности.
$P_0$	нормальное давление 1013,25 гПа (101325 Па)
$T_0$	нормальная температура 288,15 К ( $15^\circ\text{C}$ )

**высокий рям:** Часть олиготрофного болота, с сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозом. Древесный ярус угнетен и состоит из сосны со средней высотой древостоя до 18 м; торфяная залежь имеет мощность не более 1 м.

**низкий рям:** Часть олиготрофного болота, поверхность которого характеризуется волнистым микрорельефом, а растительный покров представлен древесным ярусом с угнетенной низкорослой сосной со средней высотой 2—3 м и кустарничковым ярусом, моховой ярус представлен различными видами сфагновых мхов, торфяная залежь до 3 м.

**топь:** Центральная часть болотного массива, микрорельеф представлен незначительными микроповышениями высотой до 20 см, моховой ярус представлен различными видами сфагновых мхов, встречаются единичные растения угнетенной низкорослой сосны; торфяная залежь здесь достигает мощности 3 м и более.

**условия «хорошей погоды»:** Условия погоды, когда в пункте наблюдения общее количество облаков не более 5 баллов; отсутствуют нижняя облачность и

облака вертикального развития; отсутствуют грозы, осадки, туман, мгла, метель, пыльная буря и задымление, средняя скорость ветра не более 6 м/с.

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** Атмосферно-электрические процессы, протекающие в приземном слое атмосферы, имеют важное значение для функционирования Глобальной электрической цепи (ГЭЦ). В приземном слое электрическое состояние среды описывается электродным эффектом, для которого одной из главных задач является оценка концентраций положительных и отрицательных аэроионов, напряженности электрического поля. Несмотря на проведенные многочисленные исследования, здесь остаются несколько не до конца решенных вопросов.

I. В атмосфере во взвешенном состоянии находится большое количество веществ и частиц, включая гидрометеоры, для многих из которых не определены механизмы взаимодействия с лёгкими ионами, необходимые для создания параметризации, используемой в моделях погоды и климата [Куповых и др., 1998; Laakso et al., 2007; Морозов, 2011; Hirsikko et al., 2011; Kalivitis et al., 2019; Guryanov et al., 2024].

II. Недостаточно экспериментальных данных для подтверждения доминирования биогенного (связанный с летучими органическими соединениями (ЛОС) и атмосферными ионами) механизма образования ионов в ненарушенных экосистемах, таких как тропические леса или лесные районы в северных широтах [Kirkby et al., 2016; Junninen et al., 2022].

III. С точки зрения атмосферного электричества, болота остаются малоизученными объектами ввиду сложности мониторинга из-за высокой влажности, активного выделения метана и углекислого газа, насыщения органикой, а также переменчивости уровня грунтовых вод и микроклимата. В настоящее время [Природные экосистемы. Болото..., 2022] площадь водно-болотных угодий составляет более 257,2 млн. га (около 6 % от всей поверхности суши), при этом ежегодно в мире продолжают заболачиваться около 660 км<sup>2</sup> территории [Инишева, 2009].

IV. Мониторинг электрических величин, в основном, производится на равнинных и прибрежных территориях [Nicoll et al., 2019; Sin'kevich et al., 2024], из-за чего, горные зоны остаются слабо изученными. Горные ландшафты занимают

около 30 % от всей поверхности суши и оказывают значительное влияние на климат и погоду, а, следовательно, и на ГЭЦ.

V. Недостаток долговременных комплексных измерений атмосферно-электрических параметров, зависящих от местных условий [Тверской, 1949; Chalmers, 1967; Красногорская, 1972; Bennett, Harrison, 2007; Soumyajyoti, Animesh, 2019], ограничивает точность физико-математических моделей ГЭЦ, используемых в современных климатических и погодных моделях, несмотря на их включение в расчётные системы [Eliseev et al., 2025]. Существующие параметризации электрических параметров требуют верификации на основе надёжных натурных данных.

Таким образом, для оценки влияния геометрии рельефа, болотных систем из-за особенностей, связанных с высокой влажностью переменчивости уровня грунтовых вод и микроклимата, и потока гидрометеоров на электродинамическую структуру приземного слоя атмосферы необходимо получение надежных эмпирических данных об изменчивости концентрации лёгких ионов и электропроводности приземного слоя атмосферы.

Перечисленные факторы формируют актуальность проведённых исследований.

**Объектом исследования** является электрическое состояние приземного слоя атмосферы.

**Предметом** — влияние метеорологических и геометрических особенностей рельефа на изменчивость электропроводности воздуха и концентраций лёгких ионов в приземном слое атмосферы.

**Целью** является оценка пространственно-временной изменчивости концентраций лёгких ионов и полярных электропроводностей воздуха на юге Сибири, обусловленной спецификой местных метеорологических условий и геометрических особенностей рельефа.

Для достижения цели работы поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Выбор типов ландшафтов, репрезентативных для юга Сибири, которые будут анализироваться в рамках диссертационного исследования.

2. Выполнить целенаправленные экспериментальные измерения атмосферно-электрических и метеорологических величин на типичных ландшафтах юга Сибири (болото: топь, низкий и высокий рям; высокогорная котловина; горный хребет и сопка; долины рек и окрестности водопадов; селитебные территории), а также провести их первичную обработку.
3. Оценить пространственно-временную изменчивость электрических величин для основных типов рельефа юга Сибири в условиях «хорошей погоды» на основе данных наблюдений и численного моделирования.
4. Выявить основные факторы, влияющие на изменчивость содержания ионов воздуха в условиях «хорошей погоды».
5. Оценить изменчивость полярных электропроводностей воздуха и концентрации лёгких ионов под влиянием осадков и сопутствующих синоптических условий.

### **Исходные данные и методы исследования**

В работе использовались данные мониторинга градиента потенциала электрического поля, полярных электрических проводимостей воздуха, концентраций лёгких ионов, основных метеорологических величин (температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, характеристики осадков, облачность и атмосферные явления) в приземном слое атмосферы, данные визуальных наблюдений облачности и атмосферных явлений за 2006—2025 гг., полученные в геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем (ГО ИМКЭС), а также данных, полученных в результате экспедиционных измерений 2019—2024 гг. (Томская область, Республика Бурятия, Республика Алтай, Республика Тыва, Республика Хакасия). Дополнительно были использованы данные метеорологических наблюдений сети Росгидромета, а также данные дистанционного зондирования Земли. Построение карт производилось с использованием сервисов QGIS и MATLAB на основе цифровой модели рельефа SRTM с пространственным разрешением 90 м [<https://srtm.csi.cgiar.org/>]. При решении поставленных

задач использовались следующие методы: метод полевых исследований и наблюдений; статистический анализ; математическое моделирование; картографический метод.

Обработка данных и визуализация результатов расчётов проводились в среде MATLAB, GNU Octave и QGIS.

### **Научная новизна работы состоит в следующем:**

Впервые проведены измерения концентраций лёгких ионов на основных типах болотных микроландшафтов и выявлены закономерности внутрисезонной динамики концентрации лёгких ионов для них.

Впервые установлены соотношения концентраций лёгких ионов различных полярностей, обусловленные типичными геометрическими формами горного рельефа (горные сопки, склоны, хребты; узкие горные долины и котловины; протяженные котловины).

На основе экспериментальных данных определены граничные условия для ливневых осадков, приводящие к «взрывному» повышению отрицательной электропроводности воздуха.

Установлено, что фронтальные ливневые осадки приводят к увеличению отрицательной электропроводности, в то время как, внутримассовые ливни такого эффекта не оказывают.

### **Научная и практическая значимость работы**

Полученные оценки зависимости концентрации лёгких ионов от геометрических особенностей рельефа могут быть использованы для улучшения качества моделей глобальной электрической цепи, электродного слоя, а также применены для параметризации электрических процессов и валидации в глобальных и региональных моделях погоды и климата.

Результаты, представленные в работе, были получены в рамках следующих проектов и грантов.

1) Базовый проект СО РАН № IX.135.1.1. «Закономерности природно-климатических изменений на Азиатской территории России» (2017—2020 гг.).

2) Базовый проект СО РАН № 121031300154-1 «Закономерности изменения и взаимодействия основных компонентов климатической системы Азиатской территории России» (2020—2025 гг.).

3) Грант Президента РФ № МК-489.2020.5 «Мезомасштабные конвективные комплексы над юго-востоком Западной Сибири: условия образования, траектории перемещения, структура и сопутствующие явления» (2020—2021 гг.).

4) Грант РНФ № 22-27-00482 «Оценка фонового содержания аэроионов как важного фактора формирования окружающей среды для типичных природных и антропогенных ландшафтов юга Сибири» (2022—2023 гг.).

### **Защищаемые положения**

1. Ливневые осадки фронтального генезиса с интенсивностью более 5 мм/ч при диаметре капель больше 4 мм приводят к «взрывному» росту концентрации лёгких ионов и электропроводности воздуха, увеличивающейся в несколько десятков — сотен раз.

2. Для основных типов болотных ландшафтов впервые определены закономерности внутрисезонной изменчивости концентрации лёгких ионов от интенсивности эманации летучих органических соединений болотной растительностью.

3. В горных ландшафтах, в условиях «хорошей погоды», соотношение концентраций лёгких ионов различных полярностей определяется геометрическими формами рельефа: а) в положительных формах рельефа (горный хребет, сопка) концентрации положительных ионов превышают концентрацию отрицательных; б) в отрицательных формах (узкая горная долина и котловина) — обратное соотношение.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается за счёт использования стандартных методов и процедур при решении поставленных задач, а также накопленными многолетними данными экспериментальных измерений. Данные измерений не противоречат результатам других экспериментов, произведенных по подобной методике в пересекающихся областях, а также использующих иные технические средства.

Результаты работы были представлены и прошли обсуждение на семинарах ИМКЭС СО РАН, на региональных, всероссийских и международных научных конференциях в период с 2018 по 2025 гг., представленные ниже.

Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2018); Международная конференция «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития (SEWAN)» (Томск, 2018; Санкт-Петербург, 2021); Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика (МСАРД)» (Санкт-Петербург, 2019, 2025); XXVI Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» (Казань, 2019) Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2019, 2021, 2023); Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, 2020, 2025); Международная конференция и школа молодых ученых по экологическим наблюдениям, моделированию и информационным системам ENVIROMIS (Томск, 2020, 2022, 2024); Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Москва, 2020, 2021, 2023; Санкт-Петербург, 2024; Томск, 2022, 2025); Всероссийская конференция с международным участием «Динамика и взаимодействие геосфер Земли» (Томск, 2021); Всероссийская «Глобальная электрическая цепь» (Борок, 2021, 2023); Международная научно-практическая конференция, посвященная сохранению научного наследия и развитию идей А. Л. Чижевского (Калуга, 2022, 2024). Конференция «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2022, 2025); Всероссийская конференция по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 2023).

**Публикации:** по теме диссертации опубликовано 9 статей в изданиях из перечня научных изданий ВАК РФ и международных баз рецензируемых журналов (Scopus, WoS), в соавторстве опубликованы разделы в 2 монографиях. Всего по результатам работы опубликовано 53 научных работ, сделано 43 доклада.

**Личный вклад соискателя** заключается поиске и анализе литературных источников, участии в экспедиционных измерениях, а также установке и обслуживани-

нии измерительных приборов, сборе и обработке данных. Формулирование основного направления исследования и постановка задач производилась совместно с научным руководителем. Определение синоптических условий, работа с дополнительными источниками данных и построение тематических карт выполнены автором работы самостоятельно. Результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично, с помощью современного программного обеспечения (MATLAB, GNU Octave и QGIS). Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с коллегами из ИМКЭС СО РАН.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит 130 страниц, 37 рисунков, 9 таблиц, 141 единиц использованной литературы.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность своей семье и коллегам по институту за поддержку, мотивацию и готовность прийти на помощь. Особую признательность автор выражает научным руководителям: Пустовалову К. Н. и Нагорскому П. М. — за неоценимую помощь, терпение и профессиональное руководство на всех этапах работы над диссертацией. Их мудрые советы, критические замечания и неизменная поддержка были для меня главным ориентиром в научном поиске. Отдельная благодарность — моим коллегам из Лаборатории физики климатических систем за плодотворное сотрудничество, конструктивные дискуссии, а также за многолетний труд по наблюдениям на метеостанции ГО ИМКЭС. Автор благодарен соавторам публикаций, в сотрудничестве с которыми был получен ряд научных результатов, а также коллегам, выполнившим лабораторные исследования собранных образцов. Искреннюю благодарность приношу коллективу кафедры метеорологии и климатологии ТГУ за годы качественного обучения, терпение и мудрость ее преподавателей. Спасибо за прочную базу, которая позволила состояться настоящему исследованию.

### **Краткое содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, описана новизна, научная и практическая значимость и защищаемые положения и личный вклад автора.

**Глава 1** посвящена обзору литературы по теме исследования: описаны теоретические и инструментальные основы исследования лёгких ионов и полярных электропроводностей воздуха в приземном слое атмосферы. **Раздел 1.2** посвящен обзору исследований по электрическому состоянию приземного слоя под воздействием метеорологических факторов. В **разделе 1.3** описываются исследования, связанные с электрическим состоянием приземного слоя атмосферы в различных физико-географических условиях. В выводах по первой главе сформулированы задачи по теме диссертации.

**Во второй главе** описаны пункты наблюдений и их аппаратурное обеспечение, методика отбора и обработки данных измерений, приведены результаты наблюдений в геофизической обсерватории ИМКЭС. **В разделе 2.1** описывается оборудование для регистрации метеорологических и атмосферно-электрических величин, проводимых в обсерватории. Стационарные измерения проводились в ГО ИМКЭС с 2006 по 2024 гг. **В разделе 2.2** описаны пункты экспедиционных измерений и общая методика проведения полевых наблюдений. Натурные наблюдения проводились в 11 пунктах период с 2019 по 2024 гг. **В разделе 2.3** диссертации содержит описание вспомогательных источников информации, в число которых входят метеорологические данные, синоптические карты и результаты спутникового зондирования. Их применение позволяет решать задачи идентификации типов облачности и детектирования прохождения атмосферных фронтов и воздушных масс над исследуемой территорией. **В разделе 2.4** посвящен оценке изменчивости концентрации лёгких ионов в условиях «хорошей погоды». Исследование было основано на данных измерений концентрации лёгких ионов ( $n_{\pm}$ ) и градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\phi$ ), метеорологических величинах, полученных в тёплый период (май—сентябрь) в ГО ИМКЭС за 2014—2016 гг. В **выводах по второй главе** приводятся оценки электрического состояния приземного слоя атмосферы в условиях «хорошей погоды».

**В главе 3** основными вопросами являются: оценка изменчивости электропроводности воздуха под воздействием водного аэрозоля различного происхождения:

ливни, водопады. В разделе 3.1 приводится методика отбора и обработки данных электропроводностей воздуха, измеренных в ГО ИМКЭС с 2018 по 2019 годы. В разделе 3.2 приведены результаты долговременных наблюдений  $\lambda_{\pm}$  влияния синоптических условий на электропроводность воздуха. В разделе 3.3 приведены оценки влияния квазистационарных источников лёгких ионов — водопадов. Для оценки влияния характеристик водопадов были проведены экспедиционные измерения в августе 2020 г. у безымянного водопада вблизи курорта Аршан и в июле 2023 г. у вдп. Бельтертуюк вблизи пос. Кунос. В выводах по главе 3 представлены основные результаты по изменчивости электропроводности воздуха под воздействием водного аэрозоля.

Глава 4 посвящена вопросам, связанным с исследованием изменчивости концентрации лёгких ионов для типичных болотных и горных ландшафтах. В разделе 4.1 представлены результаты полевых измерений, проведенных на ландшафтном профиле нативного верхового болота, а также на участках леса с минеральными почвами. Исследование проводилось в летние месяцы 2020—2021 гг. на Бакчарском болоте. Кроме того, в разделе рассматривается качественная и количественная оценки содержания летучих органических соединений в биомассе, полученных в результате отбора образцов растительности на низком ряме с их последующим хроматографическим анализом для, которая бы позволила опосредованно судить о связи ЛОС с лёгкими ионами. В разделе 4.2 описывается закономерности пространственного распределения ионов в горных ландшафтах, а также результаты моделирования высоты электродного слоя для разных ландшафтов. В выводах по главе 4 представлены основные результаты экспедиционных измерений и оценки влияния орографии на электрическое состояние приземного слоя атмосферы.

Основные результаты исследования приводятся в **Заключении**.

# ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЁГКИХ ИОНОВ И ПОЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЕЙ ВОЗДУХА

## 1.1 Общие представления об электрическом состоянии приземного слоя

Изучение природы атмосферного электричества началось со второй половины XVIII в. Первые опыты, связанные с атмосферным электричеством, были проведены в 1750-х М. В. Ломоносовым и Далибаром [Тверской, 1949; Chalmers, 1967; Israël, 1970]. В результате проведенных опытов было обнаружено наличие атмосферного электрического поля при безоблачной погоде. Позднее, в 1887 Кулоном проводятся наблюдения над рассеиванием электричества в атмосфере и формулируются положения о проводимости и ионизации атмосферного воздуха. Появляются обоснования существования в воздухе некой структуры, переносящей заряд — ионах, которые образуются в результате ионизации воздуха [Chalmers, 1967; Israël, 1970; Смирнов, 1992; Кашлева, 2008; Hirsikko et al., 2011].

В XX веке накопленные научные знания позволили сформулировать теорию Глобальной электрической цепи как системы циркуляции электрических токов между ионосферой и земной поверхностью через атмосферу (рис. 1.1). Согласно этой концепции, ГЭЦ представляет собой не замкнутую, открытую для внешних воздействий (галактических космических лучей (ГКЛ), солнечная плазма, и т.п.) электрическую цепь, образованную тремя ключевыми компонентами: хорошо проводящей поверхностью Земли, слабоионизированной плазмой ионосферы и атмосферой, выполняющей роль изолятора между ними [Адушкин и др., 2018; Hunting et al, 2020]. Источниками тока в этой системе служат заряженные облака, особенно грозовые, которые генерируют восходящие токи в ионосферу. Замыкание цепи постоянного тока происходит через нисходящие токи в областях ясной погоды, а также через проводящие слои земной коры, включая горные породы и океаны. Параллельно существует контур переменного тока, связанный с импульсными разрядами молний. Таким образом, ГЭЦ функционирует как единая глобальная система, интегрирующая атмосферные, ионосферные и земные электрические процессы в

сложную, но согласованную структуру [Мареев, 2010; Горбатенко, Ершова, 2011; Williams, Mareev, 2014]. ГЭЦ тесно связана с существованием электродного слоя — тонкой области у земной поверхности, где происходит разделение зарядов и формирование вертикального электрического поля. Именно через этот слой замыкаются токи ГЭЦ, так как он обеспечивает переход между проводящей земной поверхностью и слабопроводящей атмосферой, играя ключевую роль в поддержании глобального электрического баланса.



Рисунок 1.1 — Схема ГЭЦ [Адушкин и др., 2018]

Изучение процессов в этом слое, известных как электродный эффект, представляет собой теоретическую задачу по нахождению распределения концентрации положительных и отрицательных ионов, а также напряженности электрического поля. Характер этих распределений напрямую зависит от состояния атмосферы. В теории рассматриваются два принципиально разных крайних случая: классический (нетурбулентный) электродный эффект, который проявляется в условиях полного отсутствия турбулентного перемешивания, и турбулентный электродный эффект, возникающий при активном перемешивании воздуха.

Рассмотрим простейшую модель электродного слоя, характеризующую электродинамическое состояние приземного слоя атмосферы [Куповых и др., 1998; Thomson, 1903].

$$\frac{d}{dz}(b_+n_+E) = q - \alpha n_+n_-; \quad (1.1)$$

$$-\frac{d}{dz}(b_-n_-E) = q - \alpha n_+n_-; \quad (1.2)$$

$$\frac{dE}{dz} = 4\pi e(n_+ - n_-); \quad (1.3)$$

$$i = e(b_+n_+E + b_-n_-E); \quad (1.4)$$

где  $n_{\pm}$  — концентрации положительных и отрицательных лёгких ионов,  $b_{\pm}$  — подвижности ионов,  $E$  — напряженность электрического поля,  $i$  — плотность электрического тока,  $q$  — интенсивность ионообразования,  $\alpha$  — коэффициент рекомбинации лёгких ионов,  $e$  — элементарный заряд,  $z$  — ось координат, перпендикулярная поверхности.

Турбулентный электродный эффект, напротив, характеризуется тем, что перенос ионов в атмосфере осуществляется преимущественно турбулентными потоками воздуха. Кроме турбулентности, также может учитываться наличие аэрозольных частиц, являющихся стоком для ионов [Куповых и др., 1998; Смирнов, 1992; Petrova et al., 2018]. Поэтому, наряду с моделями электродного эффекта для свободной от аэрозоля атмосферы, существуют модели с учетом наличия аэрозольных частиц в атмосфере [Hoppel, Frick, 1967].

$$b_+ \frac{d}{dz}(n_+E) = q - \alpha n_+n_- - \beta_{+0}n_+N_0 - \beta_{+1}n_+N_-; \quad (1.5)$$

$$b_- \frac{d}{dz}(n_-E) = q - \alpha n_+n_- - \beta_{-0}n_-N_0 - \beta_{-1}n_-N_+; \quad (1.6)$$

$$\frac{dE}{dz} = 4\pi e(n_+ - n_- + N_+ - N_-); \quad (1.7)$$

$$\beta_{+0}n_+N_0 = \beta_{-1}n_-N_+; \quad (1.8)$$

$$\beta_{-0}n_-N_0 = \beta_{+1}n_+N_-; \quad (1.9)$$

где  $\beta_{\pm}$  — коэффициент присоединения лёгких ионов к аэрозольным частицам.

Перейдем к детальному анализу ключевых характеристик, входящих в модели, и определяющих электродный эффект.

### *Интенсивность ионообразования*

На сегодняшний день известно несколько источников ионизации атмосферы, которыми являются: потоки заряженных частиц, естественные и искусственные источники заряженных аэрозолей на Земле (образование заряженных частиц при разрушении незаряженных аэрозолей в атмосфере, электризация аэрозолей трением, высотные ядерные взрывы, извержения вулканов, испарение и отрыв частиц с морской поверхности, окисление ЛОС). При этом в нижних слоях атмосферы основными ионизаторами являются продукты распада радиоактивных веществ, находящихся в верхнем слое почвы и самой атмосфере, и космические галактические лучи.

### *Концентрация ионов*

Ионы, находящиеся в атмосфере, можно рассматривать как некоторую примесь в атмосферном воздухе, отличающуюся от остальных молекул воздуха извещенных частиц только наличием на них электрических зарядов. Поэтому наряду со всеми обычно действующими в атмосфере силами на ионы еще оказывают влияние электрические силы [Смирнов, 1992; Кашleva, 2008; Тверской, 1949].

В настоящее время существует несколько классификаций атмосферных ионов. Согласно [Israël, 1970], деление ионов на группы должно быть по характеристикам подвижности и размерам ионов (табл. 1.1).

Смирнов (1992) в своей работе указывает на отсутствие физических обоснований для диапазонов в таблице 1.1, а также на то, что данные границы сильно зависят от условий среды (температура, влажность, примесные газы) и могут значительно меняться, поэтому им был предложен подход, основанный на учете вида взаимодействия, удерживающего ион. В соответствии с этой концепцией выделены следующие группы ионов: элементарные, или молекулярные, ионы (молионы); комплексные, или лёгкие, ионы — аэроионы; сложные, или тяжелые, ионы; средние, или промежуточные, ионы; нейтральный кластер и ионная пара в газе.

Таблица 1.1

Основные группы ионов в атмосфере [Israël, 1970]

Группа ионов	Подвижность ионов $b$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	Радиус ионов, см
Лёгкие (малые, кластерные)	$>1$	$6,6 \cdot 10^{-8}$
Средние (промежуточные)	<i>Мелкие</i>	$1 - 10^{-2}$
	<i>Крупные</i>	$10^{-2} - 10^{-3}$
Тяжёлые (ионы Ланжевена)	$10^{-3} - 10^{-4}$	$(250 - 550) \cdot 10^{-8}$
Ультратяжёлые	$\leq 25 \cdot 10^{-4}$	$550 \cdot 10^{-8}$

В данной работе рассматриваются комплексные или лёгкие ионы. Далее рассмотрим их свойства подробнее. Комплексные, или лёгкие, ионы — аэроионы, образующиеся в результате присоединения молионов к молекулам преимущественно с дипольным моментом (водяной пар). В нормальных условиях подвижность комплексных ионов лежит в пределах  $0,5 - 5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Связь осуществляется в основном за счет сил электростатического изображения (зеркальных сил) притяжения дипольных молекул к центральному иону. Время жизни аэроионов в атмосфере определяется прежде всего содержанием атмосферных аэрозольных частиц, которыми они адсорбируются, и является сложной функцией концентрации, физико-химического и дисперсного состава аэрозолей и характеристик иона. В чистом воздухе, время жизни определяется процессом взаимной рекомбинации после столкновения противоположно заряженных ионов и находится в пределах порядка и более сотен секунд.

Именно лёгкие ионы отвечают за один из главных механизмов образования заряда на аэрозоле и гидрометеорах, а также за некоторые характеристики тропосферы (электрическая проводимость, диэлектрическая проницаемость). По результатам многочисленных экспериментов и расчетов, было определено, что электрическая проводимость воздуха более чем на 96 % определяется лёгкими ионами [Смирнов, 1992; Hörrak, 2001].

В зарубежных работах [Tammet, 1995; Ku, de la Mora, 2004; Hirsikko et al., 2011], при выделении трёх групп (лёгкие, промежуточные и тяжёлые) ионов авторы опираются на другую характеристику — массовый диаметр, который учитывает не только размер частицы, но и от длины свободного пробега как функции энергии взаимодействия (рис. 1.2). Сплошные линии показывают преобразование между

массовым диаметром и подвижностью в соответствии с модифицированной формулой Стокса-Милликена [Ku, de la Mora, 2004], а пунктирные линии — аналогичное преобразование, основанное на исследовании другой группы учёных [Tammet, 1995].

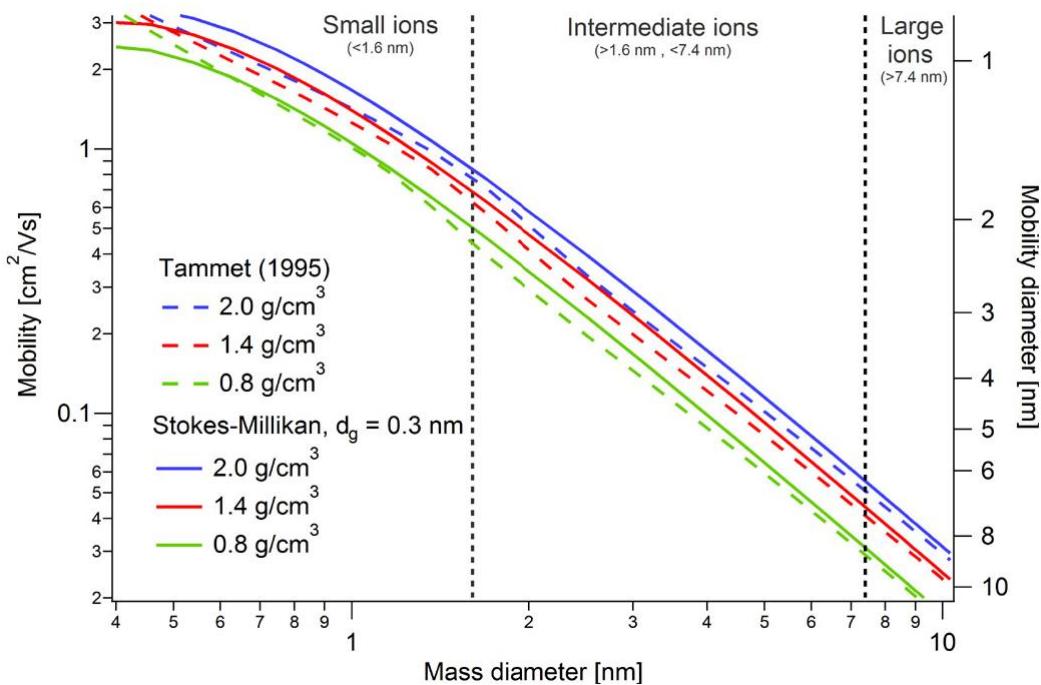


Рисунок 1.2 — Подвижность ионов в зависимости от массы и диаметра по подвижности, рассчитанная по методу Таммета и преобразованная по методу Стокса-Милликена с использованием трех различных плотностей [Hirsikko et al., 2011]

### *Коэффициент рекомбинации*

Коэффициент рекомбинации  $\alpha$  является критически важным параметром в уравнениях, описывающих электродный эффект и ионный баланс в приземном слое атмосферы, и определяет скорость, с которой положительные и отрицательные лёгкие ионы сталкиваются и нейтрализуют друг друга, образуя нейтральные молекулы воздуха. Он напрямую влияет на следующие характеристики ионов и воздуха:

- Установившуюся концентрацию ионов: чем выше  $\alpha$ , тем быстрее ионы исчезают, и тем ниже их равновесная концентрация при заданной интенсивности ионизации.
- Проводимость воздуха: электрическая проводимость атмосферы  $\lambda_{\pm}$  пропорциональна концентрации ионов  $n_{\pm}$ , а косвенно определяет, насколько хорошо воздух проводит ток, что является ключевым фактором для Глобальной электрической цепи.
- Время жизни иона: среднее время, которое ион существует до рекомбинации.

*Напряженность электрического поля*

Электрическое поле, обусловленное всеми электрическими зарядами, в любой его точке характеризуется значением потенциала. В естественных условиях, потенциал увеличивается с высотой, при этом его положительное направление нормали обычно принимается в направление от поверхности. Поэтому, вместо отрицательной напряженности электрического поля ( $E$ ), наиболее часто используется градиент потенциала электрического поля ( $\nabla\varphi$ ), для которых имеем соотношение:

$$\nabla\varphi = -E = \frac{d\varphi}{dz}, \quad (1.10)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля;  $\varphi$  — электростатический потенциал,  $z$  — высота. Стационарное распределение градиента потенциала электрического поля по высоте является решением системы связанных уравнений, включающей уравнение Пуассона, связывающее пространственную вариацию поля с плотностью объемного заряда, и уравнения непрерывности для положительных и отрицательных ионов, описывающие баланс между дрейфом, диффузией, рекомбинацией и ионизацией [Тверской, 1949].

1. Формирование поля вблизи поверхности обусловлено суперпозицией следующих основных двух факторов. Глобальный компонент, обусловленный током проводимости в глобальной электрической цепи и задающий граничное условие на верхней границе слоя. И локальный компонент, генерируемый простран-

ственным разделением зарядов в электродном слое вследствие различной подвижности и массы положительных и отрицательных ионов, а также влияния турбулентного переноса [Огуряева, Шварц, 1987; Аджиев, Куповых, 2004].

Таким образом, в рамках модели электродного слоя напряженность электрического поля не является внешним параметром, а представляет собой величину, определяющую силы, действующие на ионы, и в то же время формирующую их пространственным распределением.

## **1.2 Электрическое состояние приземного слоя под воздействием метеорологических процессов**

Еще в середине прошлого века пришло понимание необходимости регистрации метеорологических величин вместе с атмосферно-электрическими характеристиками [Тверской, 1949; Chalmers, 1967; Israël, 1970]. На основе стационарных наблюдений за метеорологическими и электрическими величинами было установлено множество закономерностей. При этом для исследования влияния метеорологических явлений на концентрацию ионов и электропроводность воздуха сначала требуется произвести оценку влияния этих величин в условиях «хорошей погоды», чтобы избежать воздействия местных метеорологических возмущений. Под условиями «хорошей погоды» понимают: отсутствие гидрометеоров, тумана и дымки, отсутствие конвективных (кучевообразных) облаков и протяженных слоистообразных облаков, общий балл облачности не должен быть выше 5, а также скорость приземного ветра не должна превышать 6 м/с [Тверской, 1949; Chalmers, 1967; Harrison, Nicoll, 2018].

Электрическая структура приземного слоя в условиях «хорошей погоды» достаточно исследована без учета геометрических особенностей рельефа и физических свойств подстилающей поверхности [Hoppel, Frick, 1986; Dhanorkar, Kamra, 1993; Pawar et al., 2010; Морозов, Куповых, 2012; Anisimov et al., 2017]. Для концентраций лёгких ионов в большинстве пунктов в летний период [Норрак et al.,

2003; Pawar et al. 2012; Rowell et al., 2024] наблюдений отмечается простой суточный ход с основным максимумом в поздниеочные и ранниеутренние часы и с минимумом в околополуденные часы. Это связывают не только с аэрозольным загрязнением, но и с местными метеорологическими условиями: ночью инверсионные процессы способствуют накоплению радиоактивных веществ и усилинию ионизации, а после полудня – конвективному выносу вверх не только аэрозоля и радиоактивных веществ [Porstendoerfer, 1994; Kitto, 2005; Chen et al., 2016; Anisimov et al., 2018], но и ионов, что приводит к уменьшению их концентрации у поверхности, и как следствие, к уменьшению проводимости атмосферы, увеличению напряженности электрического поля.

Над большими водными объектами — морями и океанами эффективным фактором формирования электрического поля над морями и океанами, особенно в тропических широтах, является процесс низкотемпературного переноса в атмосферу ионов примесей галогенов, содержащихся в морской воде. Этот процесс усиливается при нагреве поверхности моря и морских брызг солнечным излучением и может обеспечить за счет переноса ионов примесей из Мирового океана в атмосферу среднюю силу тока  $\sim 100$  А [Azad, Latham, 1967].

Как было сказано выше, основная ионизация в приземном слое происходит за счет эманаций радона из почвы, поэтому важной характеристикой, регулирующей его поток является — состояние подстилающей поверхности. Например, увлажненная почва, изменение уровня грунтовых или болотных вод, а также влага от осадков заполняет поры в почве и препятствует газообмену между почвенными горизонтами, между почвой и приземным слоем [Hirsikko et al, 2007; Каллас, 2011], что затрудняет эманации почвенного радона [Porstendoerfer, 1994; Kitto, 2005]. При этом за счет увлажнения почвы и снижения эманаций радиоактивных веществ может составлять около 15—20 % [Dolezalek et al., 1977], что естественным образом приводит к снижению концентрации ионов и проводимости воздуха. Кроме того, плотность потока радона изменяется при колебаниях температуры почвы, резких перепадах атмосферного давления, промерзания грунта [Яковлев, 2024]. Поэтому

в переходные сезоны суточный ход атмосферно-электрических величин менее выражен [Hörrak et al., 2003] из-за пространственно-временной изменчивости характеристик почвы [Орлов, Яковлев, 2024; Яковлев, 2024].

Менее изученными остаются электрические процессы при нарушении условий «хорошей погоды» [Красногорская, 1972; Pustovalov, Nagorskiy, 2018], в частности исследования ионов и проводимости сопряжены с техническими ограничениями приборов, связанных с высокой влажностью (при влажности более 80 % показания искажаются) или оседании пыльцы, аэрозоля на измерительных пластинах. К их числу таких явлений относят туманы, ливневые осадки, прохождение кучево-дождевой облачности, мезомасштабных конвективных систем и атмосферных фронтов, воздушных масс, песчаных и пылевых бурь, а также метелей. Данные явления большей частью исследуются посредством пассивных и активных радиотехнических средств с последующим моделированием процессов [Kononov et al., 2022; Нечепуренко и др., 2022].

Повышение концентрации ионов наблюдается при близких разрядах молний, генерирующих гамма-излучение [Ruhnke, 1969; Fishman et al., 1994; Milikh, Valdavia, 1999].

В работах [Kozlov et al., 2018; Pustovalov et al., 2019] исследовались экстремально низкие температуры воздуха (от  $-20$  до  $-40^{\circ}\text{C}$ ) и было показано, что с понижением температуры и образованием кристаллического тумана значения полярных электропроводностей значительно уменьшаются.

Мощная кучево-дождевая облачность, за счет больших электрических полей может являться как стоком для ионов — способствуя выносу их из приземного слоя [Reiter et al., 1985; Lihavainen et al., 2007; Venzac et al., 2007; Virkkula et al., 2007]. В работе [Nagorskiy et al., 2019] прослеживается четкая связь между электрическим полем более 0,5 кВ и изменчивостью концентрации ионов, электропроводности воздуха.

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} + b_{\pm} \frac{\partial}{\partial z} (E(t) n_{\pm}) - \frac{\partial}{\partial z} \left( (D_T(z) + D_{mol}) \frac{\partial n_{\pm}}{\partial z} \right) = \\ = q(z) - \alpha n_+ n_- - \beta n_{\pm} N_a - \eta n_{\pm} N_p, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где  $n_{\pm}$  — концентрации положительных и отрицательных лёгких ионов;  $b_{\pm}$  — подвижность ионов;  $D_T$ ,  $D_{\text{mol}}$  — коэффициент турбулентной и молекулярной диффузии,  $q(z)$  — скорость ионизации;  $\alpha(z)$  — коэффициент рекомбинации;  $\beta_{1,2}$  — коэффициент присоединения лёгких ионов к аэрозольным частицам;  $N_a$  — концентрация нейтральных аэрозольных частиц;  $\eta$  — коэффициент взаимодействия ионов и гидрометеоров;  $N_p$  — концентрация гидрометеоров.

Исследования, связанные с влиянием осадков на электрические характеристики в ПС, показывают, что дождь в основном увеличивает концентрацию отрицательных ионов [Levin, 1971; Hörrak et al., 2005; Tammet, 2009]. В некоторых работах, авторы обсуждали образование ионов за счет таких процессов как: испарение ионов с капель, кулоновский взрыв, остаток заряда в жидкых каплях [Iribarne, Thomson, 1976; Vostrikov et al., 2006]. Их эксперименты показали, что в некоторых случаях небольшие ионы могут отделяться от испаряющихся заряженных капель. Однако в работах [Яковлева и др., 2020] указывается, что во время ливневых осадков может повышаться бета-, гамма-излучение, которое может усиливать ионизацию в приземном слое.

Связь ионов с воздушными массами исследовались в работах [Kalivitis et al., 2012; Zha et al., 2023] и показали, что сезонные колебания были вызваны главным образом различиями в регионах-источниках воздушных масс с различным химическим составом. А наибольшее влияние на концентрацию отрицательных ионов оказали воздушные массы с высоким содержанием  $SO_2$ , при этом положительные ионы не были подвержены влиянию [Zha et al., 2023]. Чистые и холодные арктические массы приводили к росту лёгких ионов [Тверской, 1949]. Важным показателем здесь служит продолжительность пребывания воздушных масс и циклонов над континентом и степенью их трансформации — изменение степени радиоактивности и аэрозоля от обогащения изотопами [Тверской, 1949; Vimeux et al., 2011, Симонова и др., 2024].

С другой стороны, множество исследований посвящено влиянию ионов на облакообразование и развитие внутриоблачных процессов [Harrison, Carslaw, 2003;

Tinsley, 2008]. В работах [Shaw, 1989; Kazil et al., 2006, 2008; Sellegri et al., 2019; Zheng et al., 2021] описывается сильная зависимость событий образования новых частиц от концентрации ионов, что согласуется с теорией и наблюдениями, которые предполагают, что они стабилизируют молекулярные кластеры.

Таким образом, в атмосфере земли существуют сложные механизмы взаимодействия метеорологических факторов и атмосферного электричества, при этом многие механизмы остаются малоизученными. При этом в литературе почти не рассматриваются как различные метеорологические особенности: виды дождя (обложной и ливневый и др.), тип облачности (кучево-дождевые облака, слоистые, кучевые, слоисто-дождевые и др.), а также синоптические особенности (теплый, холодный фронт и фронт окклюзии, мезомасштабные циклоны, мезомасштабные конвективные системы и т.п.). Говорится только о наличии и отсутствии осадков, выделяются слоистообразная и конвективная облачность. Таким образом, формирование и развитие каждого синоптического объекта или метеорологического явления — будь то тип фронта, вид осадков или форма облачности — важно для глубокого понимания атмосферно-электрических процессов, а также для их корректной параметризации и последующей валидации в современных моделях погоды.

### **1.3 Электрические характеристики приземного слоя атмосферы в различных физико-географических условиях**

Образование аэрозольных частиц (в том числе аэроионы) в атмосфере является значительным фактором, влияющим как на климат, так и на экосистему, однако роль ионов в этом процессе недостаточно определена [Kulmala, Tammet, 2007; Laakso et al., 2007; Kulmala, Kerminen, 2008; Hirsikko et al., 2011; Zheng et al., 2021]. Известно, что различные физико-географические условия влияют на концентрацию аэроионов по-разному [Тверской, 1949; Chalmers, 1967; Hörrak et al., 2005; Suni et al., 2008; Tammet et al., 2009; Pawar et al., 2012; Kamra et al., 2015; Harrison, Nicoll, 2018; Rowell et al., 2024].

Например, влияние радиоактивности на содержание ионов описаны в работах [Porstendoerfer, 1994; Kitto, 2005; Petrova et al., 2014; Chen et al., 2016; Anisimov et al., 2018, Hõrrak et al., 2003], что определяют не только пространственной изменчивости ионизации, но также влиять на суточную и сезонную изменчивость. При этом измерения на континентальных станциях показывают, что радон и гамма-излучение зимой уменьшается из-за снежного покрова [Красногорская, 1972; Hatakka et al., 2003, Siingh et al., 2007]. На увлажненных и переувлажненных территориях за счет закупоривания пор, поглощения и растворения радона в воде отмечаются пониженные концентрации лёгких ионов [Porstendoerfer, 1994; Kitto, 2005].

Как было сказано выше, существует влияние ионов на облакообразование и развитие внутриоблачных процессов, однако понимание на молекулярном уровне окружающих лёгких ионов и их влияния на образование новых аэрозольных частиц (*NPF*) в высокогорных условиях (в тропосфере) все еще очень ограничено [Куповых и др., 1998; Kulmala, Kerminen, 2008; Kirkby, 2008; Bazilevskaya et al., 2008]. Исследования в горах в Альпах показывают, что в зависимости от происхождения воздушной массы *NPF* может быть вызван кластерами серной кислоты и аммиака или нитрата (или серной кислоты), кластеризующихся с высокоокисленными органическими молекулами [Bianchi et al., 2016]. Другое исследование в Гималаях показало, что *NPF* в основном обусловлен органическими парами биогенного происхождения [Bianchi et al., 2019]. Частые и интенсивные события *NPF* наблюдались на высокогорной исследовательской станции Чакалтай (5240 м над уровнем моря), расположенной в Боливийских Андах [Rose et al., 2015], но полное понимание механизма и роли лёгких ионов в процессе зарождения аэрозолей остаются неясными. Поэтому необходимо детальное исследование лёгких ионов и взаимосвязь с аэрозолем, включая их молекулярный состав, временные изменения (суточные и сезонные) и области источников, чтобы понять их роль в атмосферных процессах, таких как *NPF* в исследуемых регионах.

Повышение концентраций лёгких ионов под воздействием органических веществ, выделяемых растениями, описано в следующих работах [Junninen et al., 2006, 2022; Ehn et al., 2010; Севостьянов, Грязькин, 2016].

Еще одним локальным источником ионизации выделяют эффект водопадов, или «эффект Ленаарда», который приводит к значительному повышению концентраций отрицательных аэроионов [Kolarz et al., 2012; Grafetstätter et al., 2017].

Одним из малоизученных процессов образования аэроионов является генерация частиц в горах, где главным источником ионов становятся ГКЛ. Многие учёные говорят о необходимости получения информации об аэроионах в различных средах, включая их химический состав, вертикальный профили концентрации, а также оценки скоростей генерации и стока. [Тверской, 1949; Chalmers, 1967; Hörrak et al., 2005, 2006; Hirsikko et al., 2011; Kalivitis et al., 2012; Zha et al., 2023].

Загрязнение воздуха с точки зрения концентрации ионов является неоднозначным фактором. Считается, что лёгкие ионы присоединяются к аэрозольным частицам [Hoppel, Frick, 1986; Dhanorkar, Kamra, 1993; Hörrak et al., 1998] и оседают на поверхность [Grinshpun et al., 2005; Salm et al., 2011; Hirsikko et al., 2006; Ehn et al., 2010], соответственно концентрация лёгких ионов снижается. Однако по данным [Ling et al., 2010; Svenningsson et al., 2008; Suni et al., 2008] – в городских условиях наблюдаются высокие концентрации ионов. Исследователи связывают такие результаты с тем, что загрязнение городов и повышенное содержание аэрозоля приводят к стоку аэроионов, однако выхлопные газы от автомобилей, или некоторые химические соединения могут, наоборот могут являться источником ионов [Skromulis, 2018].

Таким образом, мы видим, что особенности рельефа территории по-разному влияет на скорость ионизации и исчезновения ионов, и затрудняет экстраполяцию данных с одной территории на другую. Чтобы корректно оценить влияние ионов на образование аэрозолей и облаков (а, следовательно, на климат), необходимо проводить измерения на репрезентативных (больших по площади и возможному вкладу) территориях. Таким образом, без детальных исследований в разнообразных физико-географических условиях невозможно построить универсальную и точную модель, описывающую роль атмосферного электричества в атмосферных процессах.

#### **1.4. Выводы по главе**

Анализ литературных источников показал, что к настоящему времени недостаточно полно исследованы процессы, связанные с электропроводностью воздуха и лёгкими ионами вдали от побережья океанов Евразийского континента. Большинство работ основаны на стационарных наблюдениях на равнинных территориях и в горных районах в пределах какого-либо научного полигона.

Ограниченностю проведения измерений на других территориях во многом обусловлены громоздкостью оборудования и отсутствием постоянного источника электропитания.

Во многих исследованиях нет связи с местной погодой, нет учета синоптических процессов, которые могут приводить к значительным искажениям в пространстве и во времени атмосферно-электрических величин. Кроме того, в работах не учитывается состояние подстилающей поверхности, которое, как показано выше, важно учитывать при проведении измерений атмосферно-электрических величин.

Таким образом, в рамках исследований атмосферного электричества существует целый ряд нерешенных проблем и задач, требующий комплексного подхода по измерению и анализу пространственно-временной изменчивости электрических характеристик атмосферы.

## ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ

Основными вопросами, рассмотренными в этой главе, являются: описание программно-аппаратного комплекса и методик измерения, а также оценка изменчивости электрического состояния приземного слоя атмосферы в Томске в условиях «хорошей погоды». Основные результаты главы опубликованы в [Pustovalov et al., 2022; Pustovalov et al., 2022a; Природно-климатические процессы..., 2025].

### 2.1. Экспериментально-измерительный комплекс ИМКЭС СО РАН

Для решения поставленных задач требуется приборная база, позволяющая измерять атмосферно-электрические и метеорологические величины с достаточным временным разрешением и (или) в режиме непрерывного мониторинга. Одним из пунктов непрерывного мониторинга в исследовании является ГО ИМКЭС (рис. 2.1a), расположенная в восточной части Томска ( $56^{\circ}28'$  с. ш.,  $85^{\circ}03'$  в. д.) [Геофизическая обсерватория ИМКЭС...]. Обсерватория имеет две основные наблюдательные площадки, несколько лабораторных помещений с измерительно-регистрирующей аппаратурой и оборудованием для камеральной обработки материалов полевых исследований. В настоящее время на базе ГО проводятся метеорологические, атмосферно-электрические, аэрозольные, дозиметрические и радиометрические измерения. Схема размещения измерительного оборудования представлена на рис. 2.1б.

#### *Измерение атмосферно-электрических величин*

В ГО ИМКЭС работает несколько приборов для измерения следующих атмосферно-электрических величин: градиент потенциала электрического поля  $\nabla\phi$ , полярные электропроводности воздуха  $\lambda_{\pm}$ , концентрации лёгких ионов  $n_{\pm}$ .

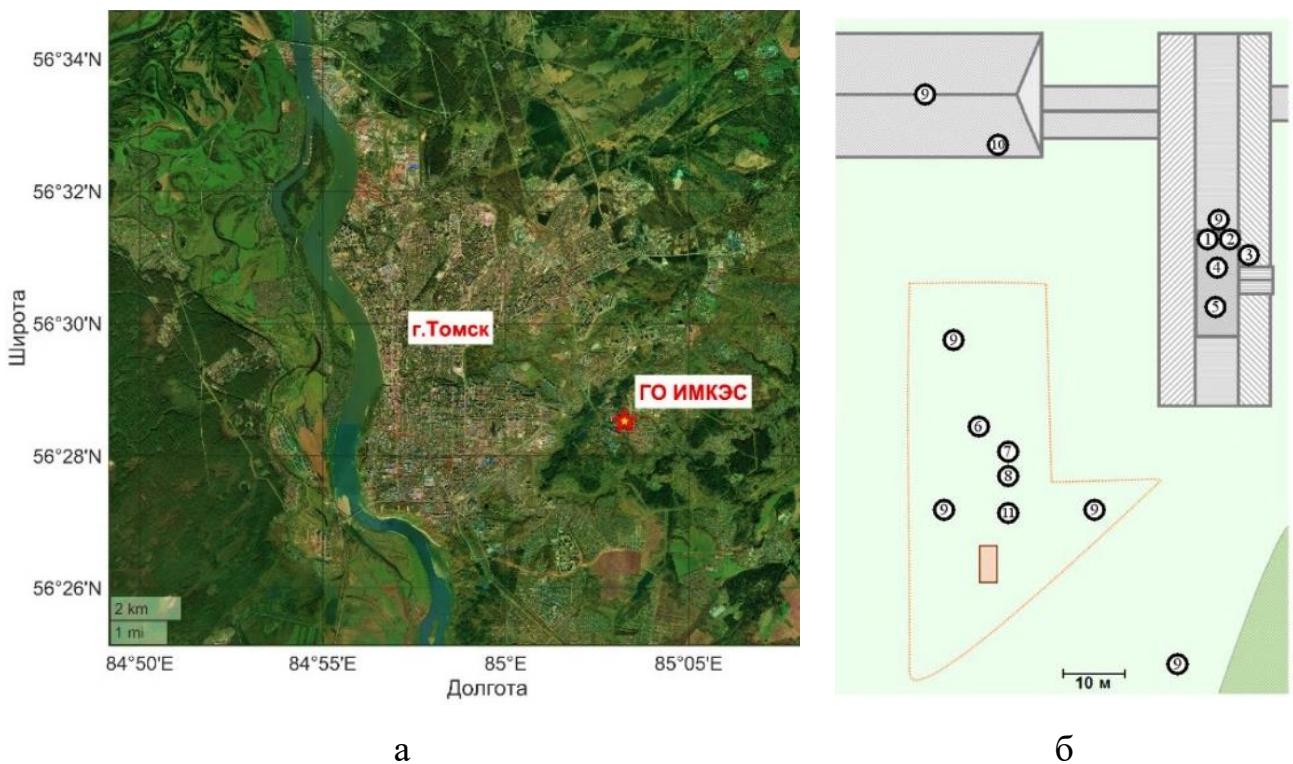


Рисунок 2.1 — Карта-схема расположения ГО ИМКЭС (а) и схема размещения измерительной аппаратуры на площадках (б), цифрами обозначены: 1 — автоматическая метеостанция WXT520; 2 — счетчик лёгких ионов «Сапфир-3М»; 3 — измеритель электропроводности атмосферы «Электропроводность-2»; 4 — датчики температуры, влажности и давления; 5 — радиометры NILU-UV-6Т и М-124; 6 — флюксметры «Поле-2» и CS100, счетчик лёгких ионов АIC2, измеритель пылевых частиц SDS011; 7 — оптический осадкомер ОПТИОС; 8 — челночный осадкомер; 9 — автоматические метеостанции АМК-03; 10 — нефелометр 3563, измерители спектра аэрозольной компоненты APS 3321 и SMPS 3936; 11 — осадкомер О-1 [Геофизическая обсерватория ИМКЭС...]

Полярные электропроводности воздуха ( $\lambda_{\pm}$ ) измерялись датчиком (рис. 2.2а) «Электропроводность-2» (ГГО, СССР) [Преобразователь измерительный электрической...]. Измерение проводимости производится методом аспирационного конденсатора. Под влиянием напряжения, приложенного между обкладками конденсатора, на собирающую (внутреннюю) обкладку, где течет электрический ток. Значение этого тока пропорционально значению полярной электрической проводимости.

Диапазон измерений удельной электрической проводимости воздуха каждой полярности изменяется в диапазон от 3 до  $25 \text{ фСм} \cdot \text{м}^{-1}$ . Погрешность измерений составляет  $\pm 15\%$ . Прибор работал в ГО ИМКЭС в режиме мониторинга с 2006 по 2019 гг.

Счетные концентрации аэроионов измерялись приборами: «Сапфир-3М» (НПФ Янтарь, Россия) и «AIC2» (Alpha Lab, США) (рис. 2.2 б, в, соответственно). Принцип действия приборов также основан на методе аспирационного конденсатора. Внутренний вентилятор прокачивает исследуемый воздух через измерительную цилиндрическую камеру (трубку), в центре которой находится электрод, а на стенках — другой. На электроды подается высокое стабилизированное напряжение, создающее электрическое поле. Попадающие в трубку ионы притягиваются к электроду с противоположным зарядом, создавая очень слабый измерительный ток. Сила этого тока прямо пропорциональна концентрации ионов.

С 2017 по 2019 гг. в теплый период годы на ГО ИМКЭС измерение концентраций аэроионов производилось счетчиком «Сапфир-3М» [Счетчик аэроионов «Сапфир-3М»...]. Прибор имеет 3 диапазона измерений (первый: от  $2 \cdot 10^2$  до  $5 \cdot 10^3 \text{ см}^3$ , второй: от  $5 \cdot 10^3 \text{ см}^3$  до  $1 \cdot 10^5 \text{ см}^3$ , третий: от  $1 \cdot 10^5 \text{ см}^3$  до  $2 \cdot 10^6 \text{ см}^3$ ), при этом выбор диапазона — автоматический. Погрешность измерений составляет около 40 %. Прибор был установлен на крыше здания, рядом с «Электропроводность-2», корпус обоих приборов был заземлен. К счетчику так же крепился защитная металлическая труба (заземлена) для защиты прибора от капель дождя, и других неблагоприятных условий среды.

С 2020 г. периодически на стационаре измерения концентрации аэроионов производились с помощью счетчика ионов AIC2 [Air Ion Counter...]. Счетчик измеряет количество положительных или отрицательных ионов в воздухе, подвижность которых превышает  $1 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Точность составляет около 20 %. Счетчики были размещены в метеорологической будке, на высоте около 1 м и заземлены. Временное разрешение измерений концентрации ионов воздуха составляло 1 с.

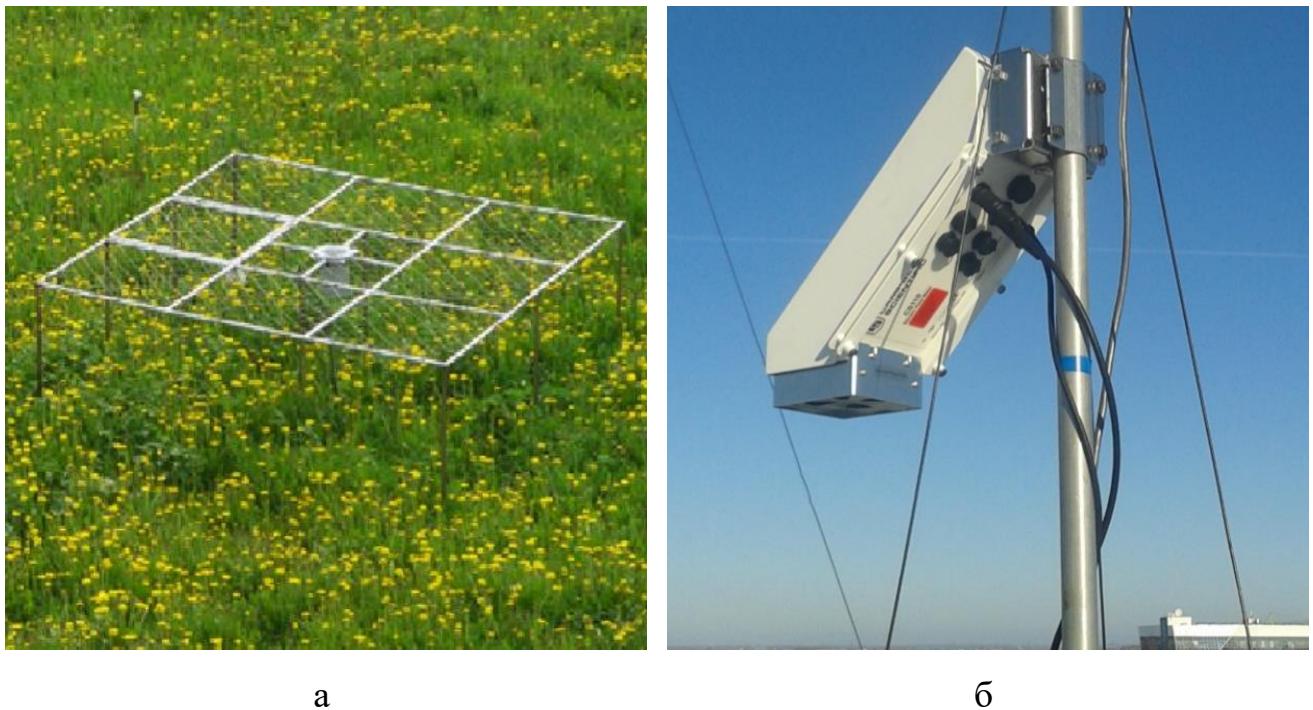


Рисунок 2.2 — Измерительное оборудование, установленное на ГО ИМКЭС, Электропроводность-2, без защитного кожуха (*а*), Сапфир-3М (*б*), АИС2 (*в*) (фото *а и б* Пустовалова К. Н., 2014, фото *в* автора, 04.2023)

Градиент потенциала электрического поля ( $\nabla\phi$ ) в приземном слое атмосферы с 2006 по 2017 гг. измерялся электрическим флюксметром «Поле-2» (ГГО, СССР). Поле-2 измеряет  $\nabla\phi$  в диапазоне  $\pm 5000$  В/м с точностью  $\pm 5 \%$ . Поле-2 устанавливался на высоте 1 м на заземленной металлической сетке (3 на 3 м) и измерял  $\nabla\phi$ , скорректированную к уровню земли.

С 2017 г. по н. в. — флюксметром «CS110» (Campbell Scientific, США). CS110 измеряет  $\nabla\phi$  в диапазоне  $\pm 22300$  В/м с точностью  $\pm 5 \%$ . CS110 располагается на высоте 2 м над уровнем земли на заземленной металлической мачте-треноге и имеет аддитивную поправку +8 В/м для приведения к уровню земли.

Оба датчика работали параллельно около 1,5 лет. На основе этих измерений был определен коэффициент перевода (2,37) для объединения данных датчиков [Pustovalov et al., 2022b]. С учетом заземления датчиков, т. е. корректировки их показаний до значений, соответствующих уровню земли, и точности их приборов, измерения градиента потенциала являются репрезентативными и могут быть сопоставимы с другими наземными измерениями градиента потенциала. Перечисленное оборудование представлено на рисунке 2.3.



а

б

Рисунок 2.3 — Измерительное оборудование, установленное на ГО ИМКЭС, Поле-2 (а), CS110(б) (фото а и б Пустовалова К. Н.)

#### *Измерение метеорологических величин*

Измерения метеорологических величин в ГО ИМКЭС выполняются с помощью следующего оборудования. Температура и относительная влажность воздуха регистрируются датчиком «HMP-45D» (Vaisala, Финляндия), а атмосферное давление — датчиком «MPX4115AP» (Motorola, США). Для измерения скорости ветра использовался анеморумбометр «М-63» (Гидрометприбор, Россия). Кроме того, метеорологические величины в ГО ИМКЭС измеряются с помощью автоматических метеостанций «АМК-03» (ИМКЭС СО РАН, Россия). Учитывая, что одним из возможных видов воздействия мощной конвективной облачности на состояние электродного слоя является выпадение ливневых осадков, данные мониторинга были дополнены данными об осадках. Эти данные были получены с помощью осадкомеров: челночного типа, позволяющего определить интенсивность осадков, и оптического осадкомера (рис. 2.4), который регистрирует не только интенсивность, но и распределение частиц осадков по размерам. Данные о характеристиках

осадков были любезно предоставлены сотрудниками лаборатории экологического приборостроения ИМКЭС СО РАН.

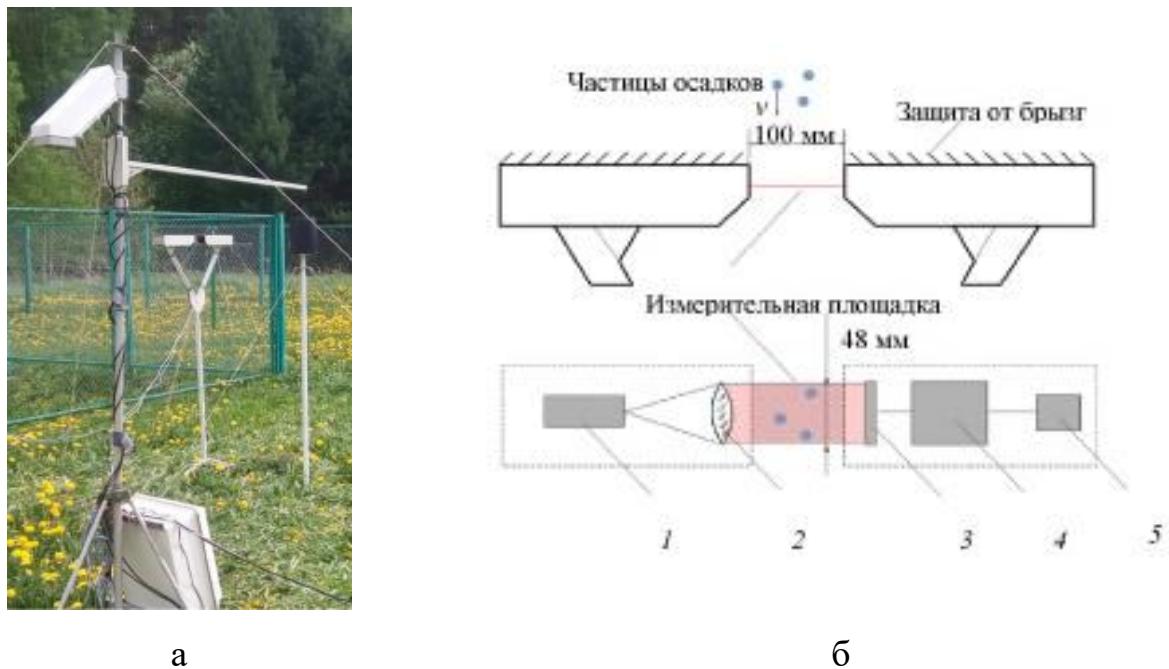


Рисунок 2.4 — Флюксметр CS110 (на переднем плане) и оптический осадкомер (на заднем плане), расположенные на нижней измерительной площадке ГО ИМКЭС: внешний вид приборов (*а*) и функциональная схема (*б*);  
 1 — источник оптического излучения; 2 — система оптических линз;  
 3 — линейный сенсор; 4 — блок формирования измерительной информации;  
 5 — выходной интерфейс [Kalchikhin et al., 2020]

В ГО ИМКЭС также производятся дневные (с 09:00 до 19:00) визуальные ежечасные метеонаблюдения, которые предоставляют информацию (время начала и окончание, интенсивность, тип и т.п.) об облачности, состоянии атмосферы и подстилающей поверхности, атмосферных явлениях. Наблюдения за атмосферными явлениями производились и сводились в единую таблицу (рис. 2.5) наблюдателями ГО ИМКЭС.

1	Дата	Атмосферные явления								Явление	
		Явление	Интенсивн.	Время начала	Время окончания	Явление	Интенсивн.	Время начала	Время окончания		
2	23.07.01	дождь	0	12:20	12:25	морось	0	12:55	13:25	дождь	
3	23.07.02	/									
4	23.07.03	/									
5	23.07.04	/									
6	23.07.05	/									
7	23.07.06	/									
8	23.07.07	дождь ливневой	0	16:58	17:13	гроза(ЮЗ, СВ)	0	17:31	19:00м	дождь ливневой	
9	23.07.08	/									
10	23.07.09	дождь	0	09:50	10:20	морось	0	17:36	17:40		
11	23.07.10	/									
12	23.07.11	/									
13	23.07.12	/									
14	23.07.13	гроза (СВ)	0	10:08	10:40	дождь	0	10:30	10:35	гроза (ЮВ)	
15	23.07.14	/									
16	23.07.15	дымка	м10:00	11:55		дождь ливневый	0	15:57	15:59	дождь ливневый	
17	23.07.16	гроза(Ю)	0	15:28	16:40	дождь ливневой	0	15:54	16:32ю		
18	23.07.17	/									
19	23.07.18	/									
20	23.07.19	/									
21	23.07.20	/									
22	23.07.21	/									
23	23.07.22	ливневый дождь	0	13:40	13:41	ливневый дождь	1	13:41	13:45	ливневый дождь	
24	23.07.23	/									
25	23.07.24	дождь ливневой	0	13:58	14:35	гроза (ЮВ)	0	17:40	18:20		
26	23.07.25	гроза	1	18:17	19:00м	ливневый дождь	1	18:48	19:00м	град	
27	23.07.26	/									
28	23.07.27	дождь ливневой	0	13:19	13:40	гроза(ЮЗ)	0	12:59	13:47		
29	23.07.28	гроза (ЮВ)	0	17:59	17:59						
30	23.07.29	ливневый дождь	1	13:50	14:50	ливневый дождь	0	14:50	15:35	гроза (3)	
31	23.07.30	/									
32	23.07.31	туман	м09:00	09:30		дымка		09:30	11:00	дождь ливневой	
33	число дней с явлениями (всего)										
34	дождь	12									
35	морось	2									
36	гроза	11									
37	дымка	2									
38	град	1									
39	туман	1									

Рисунок 2.5 — Сводная таблица атмосферных явлений за месяц, составленная метеорологами-наблюдателями на ГО ИМКЭС [Геофизическая обсерватория ИМКЭС...]

## 2.2. Проведение экспедиционных измерений

Для оценки влияния ландшафтов и геометрии территории было использовано оборудование ГО ИМКЭС, и организованы экспедиционные измерения в некоторых типичных ландшафтах юга Сибири. Выбор пунктов наблюдений основывался на схожих с установкой метеорологических площадок требованиях [Наставление..., 1985].

- Выбирается на характерном для окружающей местности участке (преобладающая для района форма рельефа и удаленный от источников влаги (море, озеро, река, водохранилище) на расстояние не менее 100 м от уреза воды);

- Учитывается удаленность от препятствий на расстоянии не меньше 10-кратной высоты этих препятствий (при условии, что не исследуются орографические или ландшафтные особенности местности).
- Оборудование и приборы были размещены таким образом, чтобы на них не оказывали влияние соседние установки (например, датчик электрического поля располагался на достаточном удалении около 5—7 м от других приборов). Бензиновый генератор электроэнергии был удален на расстояние 50 м от оборудования с учетом преобладающего для данной местности направления ветра. Аэрозольный датчик располагался рядом с измерителями концентраций лёгких ионов.

Таким образом, были определены несколько категорий ландшафтов:

1. селитебные;
2. водно-болотные и пойменные;
3. низкогорные подтаёжные, степные;
4. среднегорные темнохвойные таёжные и пойменные, высокогорные полупустынные и степные ландшафты;
5. высокогорные гольцы, таёжные, степные, тундрово-альпийско-луговые ландшафты;

Карта-схема расположения пунктов экспедиционных наблюдений представлена на рисунке 2.6, а их описание приведено в таблице 2.1.

Первый пункт наблюдений (шифр — **TO-GeO**) — геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН, подробное описание было представлено в разделах 2.1 и 2.2. Измерения производятся с 2006 по настоящее время.

В августе 2020 г. были проведены измерения в Тункинском районе Республики Бурятия:

- у безымянного водопада на реке Кынгарга (**BU-ArW**; 51,8° с. ш., 102,5° в. д., 540 м н. у. м.) вблизи поселка Аршан, а также на прилегающей к поселку территории. Водопад состоит из нескольких каскадов, на реке Кынгарга в Во-

сточном Саяне. Образован в месте пересечения рекой твердых кристаллических пород. Имеет значительный уклон и высоту падения, создавая мощный шум и водяную взвесь. Окружен хвойно-кедровой тайгой, формирующей специфический микроклимат с повышенной влажностью;

- в Тункинской котловине (**BU-TuD**;  $51,77^{\circ}$  с. ш.,  $102,58^{\circ}$  в. д., 770 м н. у. м.) — впадине в западной части Байкальской рифтовой зоны, протяженностью 200 км (с запада на восток) и до 30-50 км (с севера на юг). Дно котловины холмисто-равнинное, с террасами; окружена крутыми склонами гор: Тункинский хребет (Пик Стрельникова, 3284 м) на севере и горами Хамар-Дабан (г. Хан-Ула, 2996 м) на юге;
- на южном склоне Тункинского хребта (**BU-TGR**;  $51,95^{\circ}$  с. ш.,  $102,58^{\circ}$  в. д., 1440 м н. у. м.). Склон характеризуется крутым и сильно расчленённым рельефом, в ПН основание покрыто травами и кустарниками.

В летний период 2022 г. были проведены экспедиционные работы в северо-западном направлении от Томска на территории (TO-VaS;  $56,95^{\circ}$  с. ш.,  $82,50^{\circ}$  в. д., 120 м н. у. м.), расположенной на водоразделе малых рек Бакчара и Иксы, входящих в состав речных систем Чая и Оби. На этой территории расположено Бакчарское болото — нативное верховое болото, входящее в крупнейшую систему водно-болотных угодий в мире — Большого Васюганского болота. Подробное описание точек измерений описано в 4 главе.

В июле-августе 2022 г. была проведена продолжительная комплексная геофизическая экспедиция, где были выполнены полевые исследования на двух ключевых участках на территории Республики Тыва.

- В Монгун-Тайгинском кожууне Республики Тыва, на высокогорном плато (**TU-MTM**;  $50,3^{\circ}$  с. ш.,  $89,9^{\circ}$  в. д., 2490 м н. у. м.) вблизи горного массива Монгун-Тайга (3976 м), которая является наивысшей точкой Тывы и Восточной Сибири. Пункт наблюдения располагался в двух километрах к востоку от крупного озера Хиндиктиг-Холь и в 5 км от гор Монгун-Тайга.

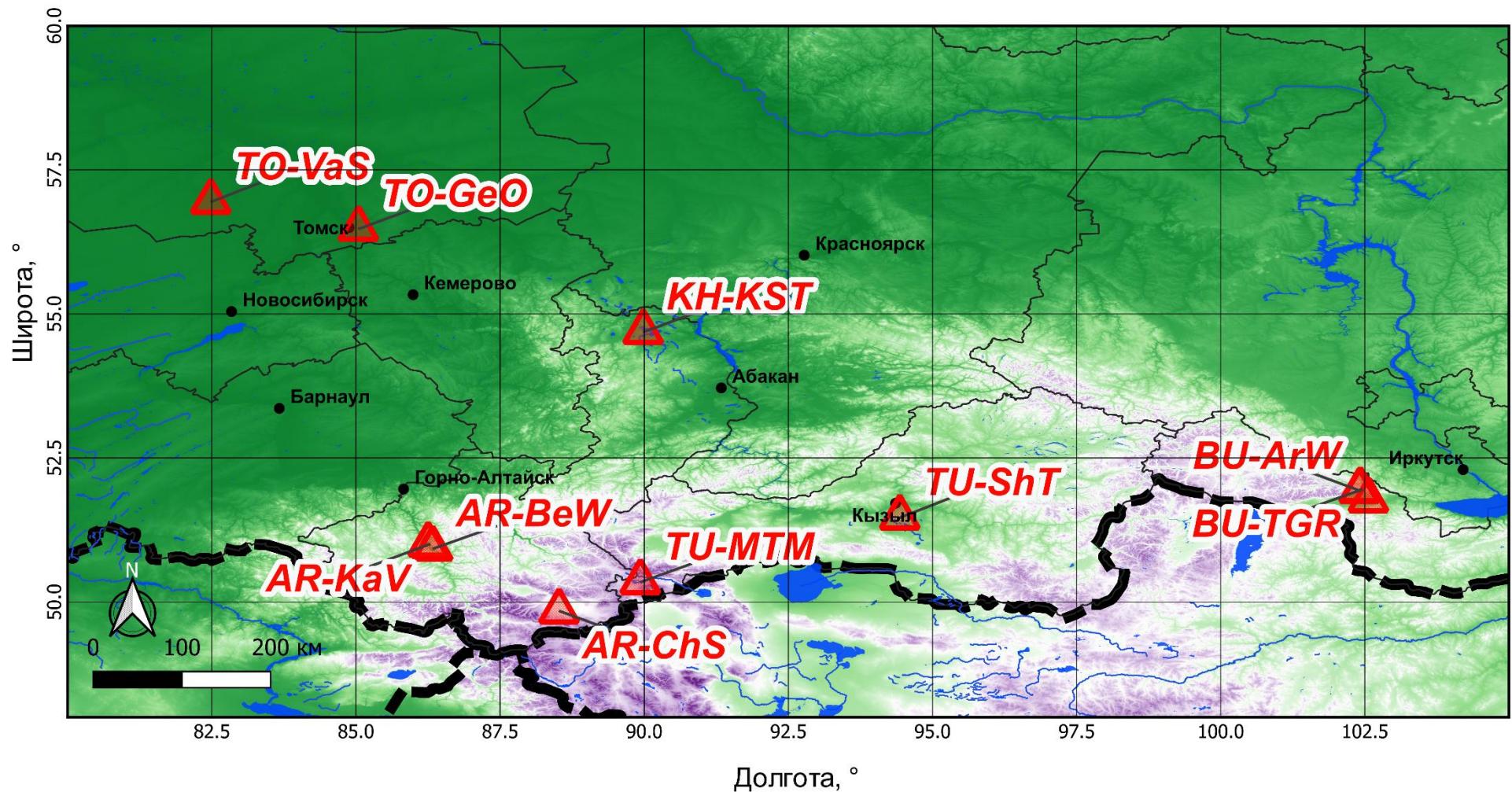


Рисунок 2.6 — Карта-схема расположения мест экспедиционных измерений на юге Сибири (составлено автором в среде QGIS на основе цифровой матрицы высот SRTM)

Плато представляет собой альпийское высокогорье с современными ледниками, карами и троговыми долинами. Преобладают ландшафты гляциальновивального пояса и горных тундр с кустарничковой растительностью и альпийскими травами. Точечно встречаются заболоченные участки, предположительно на участках с вечной мерзлотой [Чистяков и др., 2012].

- В урочище Шоль (TU-ShT 51,5° с. ш., 94,4° в. д., высота 910 м н. у. м), расположенному в межгорной котловине и имеющем полупустынный ландшафт, одним из самых северных в мире. Пункт наблюдения был расположен на песчаном бархане высотой около 4 м.

В августе 2022 г. в Республике Хакасия ключевой участок (KH-KST; 54,7°с. ш., 90,0° в. д., высота 540 м н. у. м.) был расположен на северо-востоке Ширинского района в Ширинской озёрно-котловинной степи, представленной южными степями с травянистой растительностью, солончаками и бессточными озёрами (преимущественно солёными). В качестве пункта наблюдения был выбран участок, расположенный между озёрами Белё и Тус на относительно равном удалении (около 5 км) от их берегов.

В июле 2023 г. экспедиционные работы были проведены на территории Республики Алтай, с характерными для исследуемой территории физико-географическими условиями [Зольников и др., 2008].

- в Чуйской котловине (AR-ChS; 49,8° с.ш., 88,5° в.д., высота 1930 мн. у. м.) Кош-Агачского района Республики Алтай. Пункт наблюдения располагался в центральной части межгорной котловины – обширная впадина между Сайлюгемским (г. Сары-Нохойт, 3502 м) и Курайским (г. Верховье Ортолыка, 3446 м) горными хребтами. Рельеф равнинный, с участками холмов и террас. Преобладают полупустынные и степные ландшафты с полынно-злаковой растительностью на каштановых почвах.
- в долине р. Катунь (AR-KaV; 50,98° с.ш., 86,27° в.д., высота 550 м н. у. м.), Чемальский район Республики Алтай. Пункт наблюдения располагался в

среднем течении реки, ландшафт которой представляет собой типичную горную долину с развитой поймой и террасами. Перепад высот между дном долины и вершинами склонов составляет около 1200—1700 метров.

- у водопада Бельтертуюк, расположенному на одноименной реке, вблизи ее впадения в р. Катунь (AR-BeW; 50,96° с. ш., 86,29° в. д., 540 м н. у. м.), недалеко от села Куюс. Расположен в глубоком ущелье с крутыми скальными стенами, общая высота падения составляет около 70 метров (основной каскад — 30 м, остальное — система ступеней).

В пунктах наблюдений были проведены измерения различных метеорологических и атмосферно-электрических характеристик приземного слоя. Были получены экспериментальные данные об изменчивости объемного содержания аэроионов на высоте 1 м и градиента потенциала (напряженности) электрического поля на высоте 2 м.

Таблица 2.1

## Координаты пунктов и периоды наблюдений.

Шифр	Пункт наблюдения	Ландшафт	Тип рельефа	Широта, ° с. ш.	Долгота, ° в. д.	Высота, м н. у. м.	Период наблюдения
TO-GeO	Геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС, г. Томск)	селищебные	—	56,5	85,1	170	2006—2025 гг.
TO-VaS	Бакчарское болото (Бакчарский район Томской области)	водно-болотные и пойменные	равнина	57,0	82,5	120	15—20.06.2022 г. 4—8.08.2023 г.
KH-KST	Урочище Красная Сопка (Ширинский р-он Республики Хакасия)	низкогорные подтаёжные, степные	склон	54,7	90,0	540	11—14.08.2022 г.
TU-MTM	Массив Монгун-Тайга (Монгун-Тайгинский кожуун Республики Тыва)	высокогорный тундрово-альпийско-луговой		50,4	90,0	2490	24—29.07.2022 г.
TU-ShT	Урочище Шоль (Тандинский кожуун Республики Тыва)	высокогорный полупустынnyй		51,5	94,4	910	1—6.08.2022 г.
BU-TGR	хр. Тункинские гольцы, плечо на южном склоне (Республика Бурятия, Тункинский р-он)	высокогорные гольцы		51,95	102,44	1440	12—13.08.2020 г.
BU-TuD	Тункинская котловина (Республика Бурятия, Тункинский р-он)	низкогорные подтаёжные, степные	котловина	51,77	102,58	770	17—18.08.2020 г.
AR-ChS	Чуйская котловина (Кош-Агачский р-он Республики Алтай)	среднегорные степные		49,8	88,5	1930	9—16.07.2023 г.
AR-KaV	Долина Катуни (Чемальский р-он Республики Алтай)	водно-болотные и пойменные	узкая долина	51,0	86,3	550	18—23.07.2023 г.
BU-ArW	Водопад у пос. Аршан (Тункинский район Республики Бурятия)	водно-болотные и пойменные	—	51,8	102,6	770	17—18.08.2020 г.
AR-BeW	Водопад «Бельтертуюк» (Чемальский и Онгудайский районы Республики Алтай)	водно-болотные и пойменные	—	51,0	86,3	540	23.07.2023 г.

Были проведены измерения содержания аэрозольных частиц классов  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ , накопленных часовых доз гамма-излучения, объёмной активности радона, основных метеорологических величин (температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра), а также энергетической освещённости в ультрафиолетовой и видимой спектральных областях на длинах волн 305, 312, 320, 340, 380 и 400–700 нм. Расположение оборудования на некоторых из пунктов наблюдений представлено на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 — Расположение измерительного оборудования в некоторых пунктах наблюдений TO-VaS, KH-KST, TU-MTM, TU-ShT, AR-ChS, AR-BeW (а—е, соответственно) (фото Пустовалова К. Н.)

### 2.3. Применение данных спутникового мониторинга и данных сети Росгидромет

Для определения типа облачности во время измерений были использованы данные на основе видимых и ИК-каналов радиометра MODIS, а также данные с геостационарного спутника Himawari-8. Изображения строятся по данным дневных пролётов спутников Terra, Suomi NPP и Aqua [NASA Worldview...] и Himawari-8 [JAXA Himawari Monitor...].

Радиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) установлен на борту американских спутников Terra (запущен с 1999 г.) и Aqua (с 2002 г.), даёт псевдореальные изображения облачности и подстилающей поверхности с разрешением  $500 \times 500$  м. Полученные по данным MODIS изображения (рис. 2.8a) позволяют геолоцировать облачность и определить ее вид.

В данном исследовании были использованы облачные продукты второго уровня обработки (MODIS Cloud Products, Collection 06, L2):

- оптическая толщина облаков (Cloud Optical Thickness);
- эффективный радиус облачных частиц (Cloud Effective Radius);
- температура на вершине облаков (Cloud Top Temperature);

Изображения оптической толщины облаков, эффективного радиуса облачных частиц строятся по данным только дневных пролётов спутников Terra и Aqua и имеют пространственное разрешение  $1 \times 1$  км, а изображения температуры на вершине облаков и фазового состояния облачных частиц — по данным, как дневных, так иочных пролётов спутников и имеют разрешение  $5 \times 5$  км.

Спектрорадиометр AHI (Advanced Himawari Imager) установлен на борту японского метеорологического спутника Himawari-8 (запущен в 2014 г.). Он обеспечивает получение псевдореальных изображений облачности и подстилающей поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах с высоким пространственным (до 0.5—1 км) и исключительно высоким временным разрешением (до 2.5 минут) для региона Восточной Азии и западной части Тихого океана. Снимок в ИК-диапазоне прохождения фронта в вечернее время представлен на рисунке 2.8б.

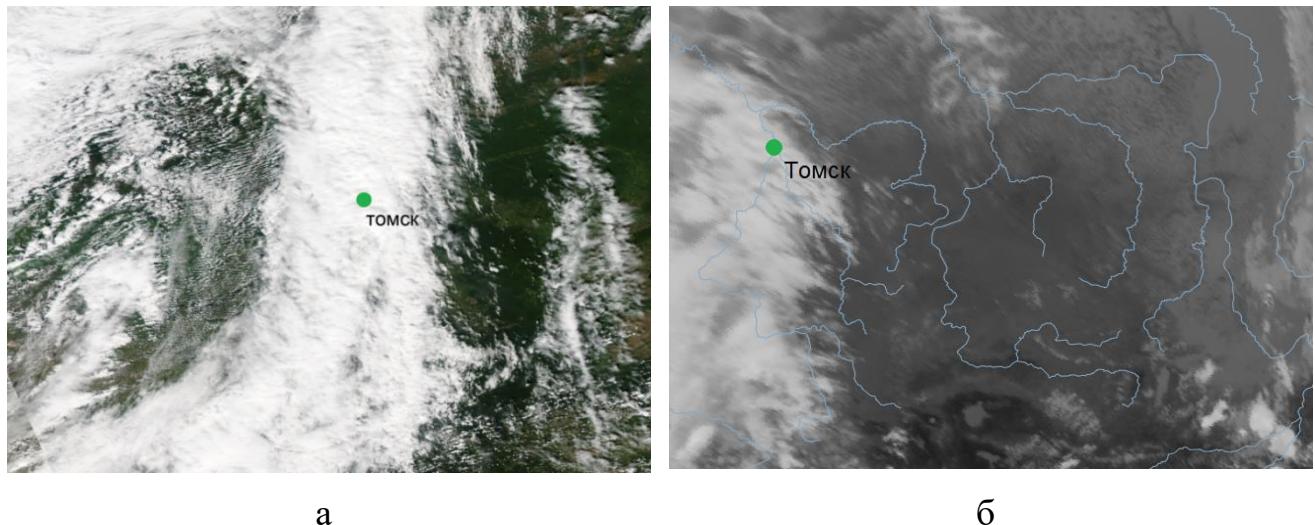


Рисунок 2.8 — Примеры RGB-изображения облачности по данным MODIS Terra [NASA Worldview] за 11.08.2018 г. (а) и Himawari-8 за 17.06.2019 г. (б) [JAXA Himawari Monitor...]

Оптическая толщина облаков позволяет наиболее адекватно оценивать пространственную структуру облачности (фронтальная, внутримассовая, вид облачности). Этот продукт является результатом оценки отражённой солнечной радиации от облака в каналах, не зависящих от поглощения водяного пара, и определяется вертикальной мощностью облачности.

Параллельно выделение типа облачности (фронтальная, внутримассовая) производилось и по приземным синоптическим [Карты фактической погоды...] и кольцевым картам погоды [Карты погоды...]. Основные синоптические карты погоды выставляются на указанном сайте 4 раза в сутки в 00, 06, 12, 18 ВСВ и дают информацию об условиях погоды над территорией России и над прилегающими территориями, а также об атмосферных явлениях в срок и между сроками наблюдений. Пример такой карты представлен на рисунке 2.9, который соответствует рассмотренным далее случаям прохождения фронта.

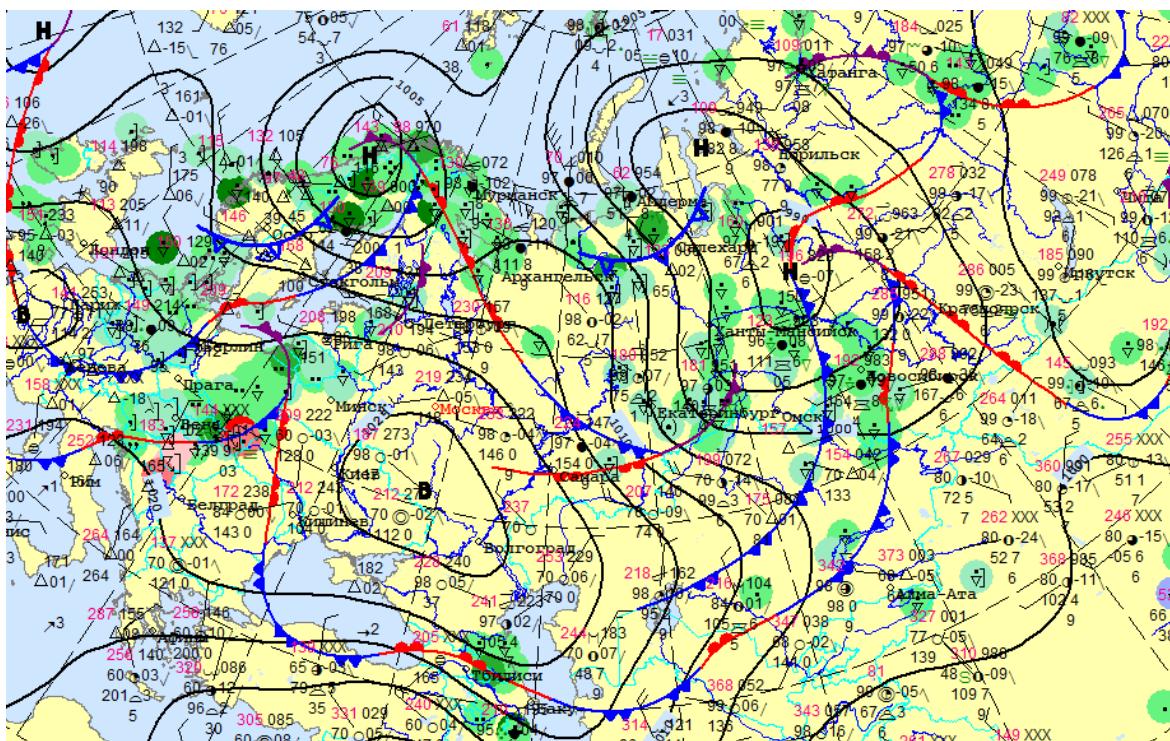


Рисунок 2.9 — Основная синоптическая карта с приземным анализом от 11.08.2018 за 06 ч ВСВ [Карты фактической погоды...]

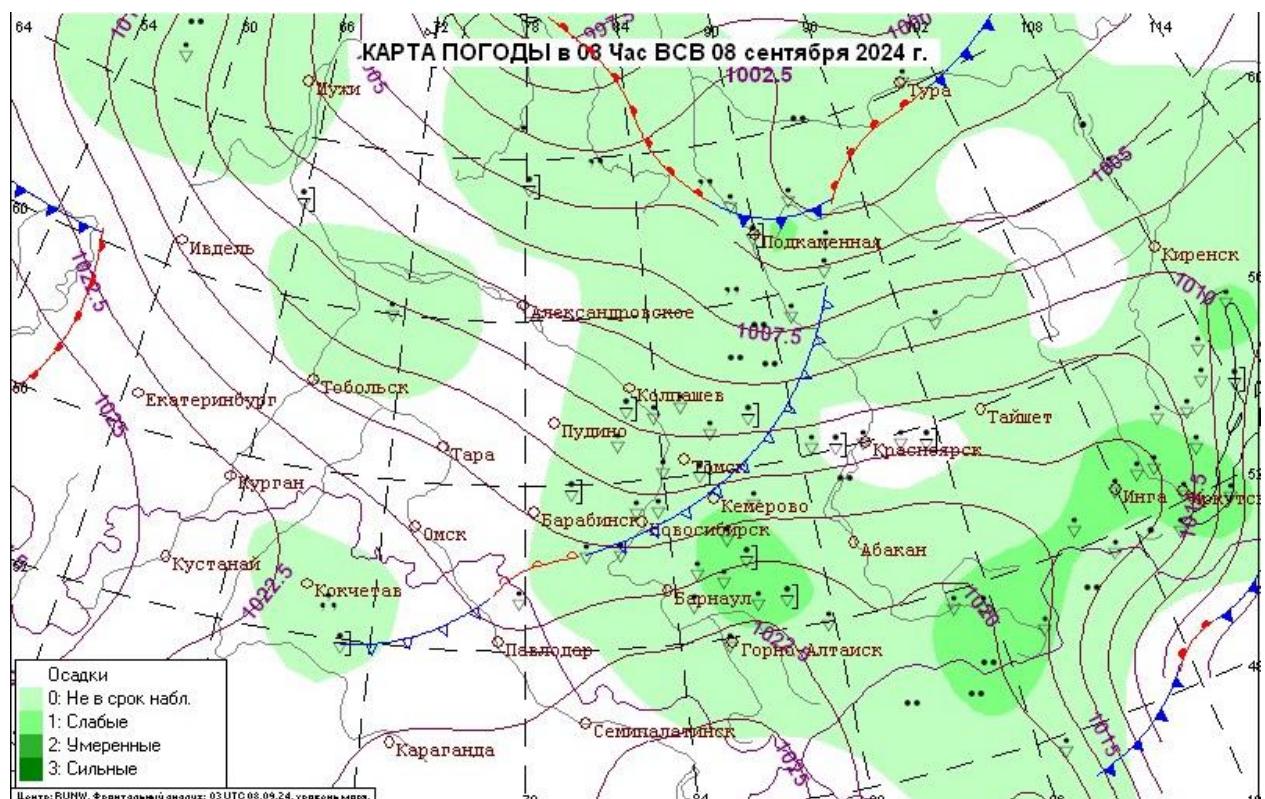


Рисунок 2.10 — Кольцевая карта погоды с приземным анализом от 08.09.2024 за 03 ч ВСВ [Карты погоды...]

Кольцевая карта (охватывает несколько административных единиц, областей) погоды выставляется на указанном выше сайте и дает более подробную информацию об условиях погоды над территорией юга Западной Сибири, а также об атмосферных явлениях в срок и между сроками наблюдений. Пример такой карты для рассмотренного ниже в работе случая прохождения внутримассовой облачности представлен на рисунке 2.10.

Кроме задач по определению тапа облачности, карты погоды и данные спутникового мониторинга использовались при планировании и организации экспедиционных работ.

#### **2.4. Оценка изменчивости концентрации лёгких ионов в условиях «хорошей погоды» в Томске**

Для оценки влияния атмосферных явлений необходимо предварительно оценить изменчивость ионов в условиях «хорошей погоды» (количество облаков не более 5 баллов; отсутствуют нижняя облачность и облака вертикального развития; отсутствуют грозы, осадки, туман, мгла, метель, пыльная буря и задымление, средняя скорость ветра не более 6 м/с) [Красногорская, 1972; Harrison, Nicoll, 2018]. В Томске такие условия обычно складываются в нескольких синоптических ситуациях: в антициклонах, в теплом секторе циклонов, или в малоградиентном поле давления в летний период [Руководство по краткосрочным прогнозам..., 1966] (определяет местный режим погоды: нет активного переноса воздушных масс, погода определяется не крупномасштабными процессами, а местными и суточными циклами).

##### *Материалы и методы исследования*

Исследование было основано на данных измерений концентрации лёгких ионов ( $n_{\pm}$ ) и градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\phi$ ), метеорологических величинах, полученных в тёплый период (май–сентябрь) в ГО ИМКЭС за 2014–2016 гг. Измерения концентраций лёгких ионов выполнялись с помощью счётчика ионов «Сапфир-3М». Измерения метеорологических характеристик выполнялись с

помощью автоматизированной метеорологической информационно-измерительной системы (АМИИС).

Отбор, обработка и статистический анализ данных, а также визуализация полученных результатов выполнялись посредствам программного кода (скрипта) на языке программирования MATLAB, GNU Octave.

Прежде чем оценивать влияние осадков на электрическое состояние приземного слоя атмосферы, необходимо иметь представление электродного слоя в спокойной атмосфере. Для этого производился отбор концентраций лёгких ионов в соответствии с условиями «хорошей погоды», а также допускалось наличие облаков верхнего яруса ( $Ci$ ,  $Cs$ ,  $Cc$ ,  $Ac$ ) эти формы облачности, как правило, не дают осадков, а объёмные заряды в облаках этих форм на несколько порядков меньше, чем в кучевых, кучево-дождевых или слоистообразных. Поэтому влияние облаков этих форм на изменчивость  $n_{\pm}$  у поверхности земли предполагалось несущественным. Кроме того, было введено дополнительное условие отбора – значения  $n_{\pm}$  исключались, если  $\nabla\phi$  был больше 1000 В/м или меньше -500 В/м [Пустовалов и др., 2024б], так как, такие значения не характерны для условий «хорошей погоды». Далее проводилась статистическая обработка и анализ результатов.

Анализ измеренных концентраций лёгких ионов позволил оценить их изменчивость, а также определить характерные значения для условий «хорошей погоды».

Гистограмма распределения изменчивости концентраций лёгких ионов имеет асимметричное распределение, близкое к степенному (рис. 2.11). Высокая повторяемость малых концентраций указывает на существование условий с интенсивной рекомбинацией ионов. Резкий спад в распределении ионов при высоких концентрациях может свидетельствовать об относительно редких событиях высокой скорости ионизации, связанные с локальными процессами или метеорологическими условиями. «Тяжелый хвост» в правой части графика указывает на наличие выбросов или редких значений в этой области.

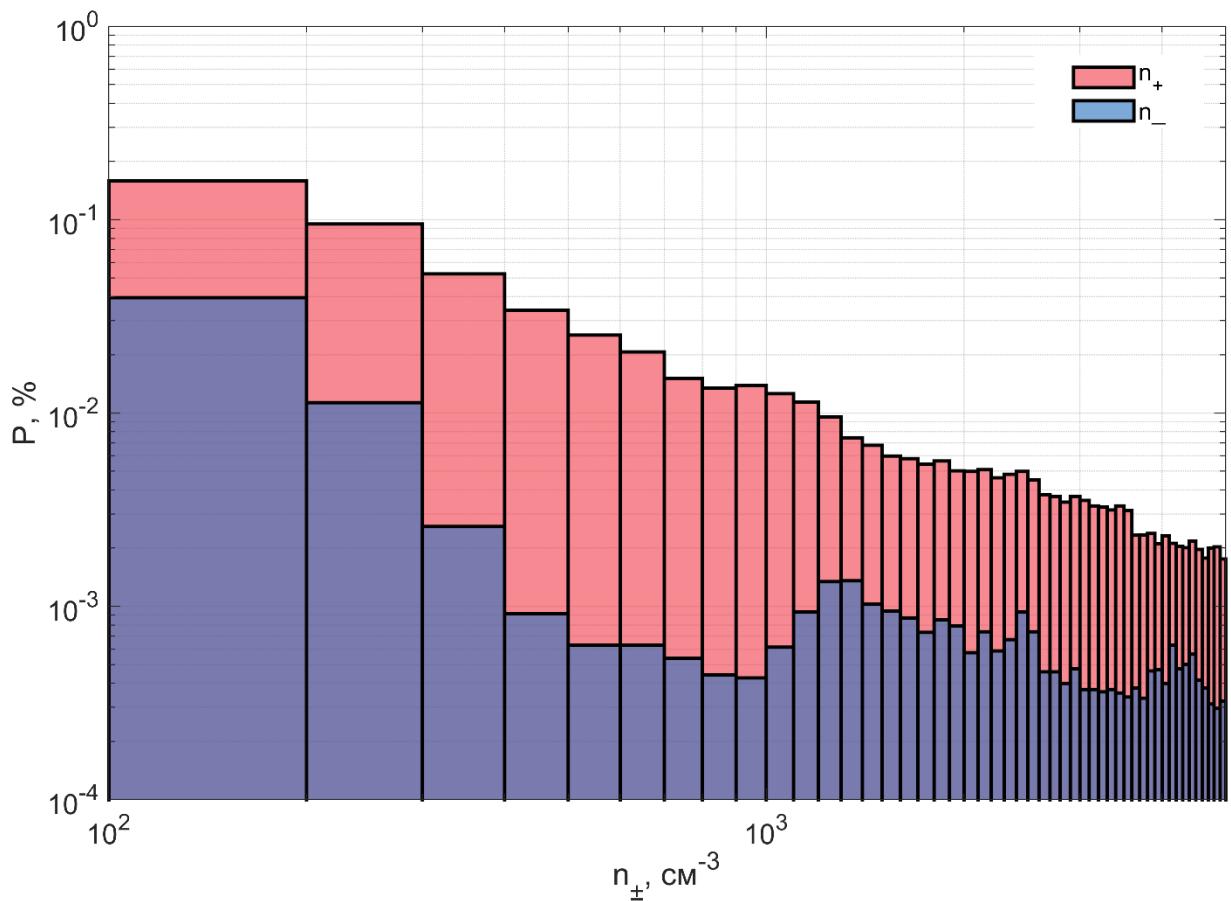


Рисунок 2.11 — Диаграмма распределения медианных концентраций положительных и отрицательных ионов в условиях «хорошей погоды»

При этом, наибольшая повторяемость концентраций как положительных, так и отрицательных ионов наблюдается в диапазоне  $10—500 \text{ см}^{-3}$ . Сопоставимые концентрации ионов, в том числе измеренные аналогичным прибором были получены для Хельсинки, Режекне [Skromulis, 2018], в Такхузе (Эстония) [Hõrrak et al., 2003], Пуне (Индия) [Pawar et al., 2012]. Медианная концентрация положительных ионов преобладает над отрицательными  $10^3$  и  $10 \text{ см}^{-3}$ , соответственно. Диапазон изменчивости для положительных ионов составляет около  $1,1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , для отрицательных —  $750 \text{ см}^{-3}$ . Распределение концентрации отрицательных ионов имеет несколько мод, предположительно, связанных с изменением метеорологических условий (например, направление ветра).

Несмотря на то, что производился отбор данных по ионам, соответствующих условиям «хорошей погоды», концентрации могут достигать достаточно высоких

значений ( $1,46 \cdot 10^5$  и  $8,6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  для положительных и отрицательных ионов, соответственно), вероятно, связанных с тем, что после прохождения фронтов или туманов и достаточно низкой влажностью, на измеряющих пластинах могла оставаться влага, которая приводила к искажениям в показаниях прибора.

Таблица 2.2

Медиана ( $Me$ ), интерквартильный размах ( $IQR = P_{75} - P_{25}$ ), а также значения, соответствующие 5-, 25-, 75- и 95-процентилям ( $P_5$ ,  $P_{25}$ ,  $P_{75}$  и  $P_{95}$ ), концентрации лёгких ионов ( $\text{см}^{-3}$ ) в условиях «хорошей погоды» в г. Томске

	$Me$	$IQR$	$P_5$	$P_{25}$	$P_{75}$	$P_{95}$
$n_+$	$10^3$	$1,1 \cdot 10^4$	10	130	$1,1 \cdot 10^4$	$1,46 \cdot 10^5$
$n_-$	10	750	10	10	750	$8,6 \cdot 10^4$

В атмосфере постоянно существуют два параллельных процесса: рекомбинация и адсорбция ионов на аэрозольных частицах, которые ответственны за снижение концентрации ионов. Адсорбция лёгких ионов на аэрозольных частицах приводит к образованию заряженных аэрозольных частиц или крупных аэроионов. При этом направление ветра в городских условиях играет важное значение, т.к. адвекция воздуха из промышленного района будет приводить к увеличению концентраций аэрозоля и, следовательно, к уменьшению концентрации лёгких ионов, и наоборот — адвекция из природных территорий или приход чистых воздушных масс с севера будут способствовать увеличению концентрации ионов.

Распределение медианных значений  $n_{\pm}$  в зависимости от направления ветра, как следует из диаграммы (рис. 2.12), показало, что наибольшие концентрации ионов отмечаются при северном и северо-восточном направлениях для отрицательных и положительных ионов, соответственно.

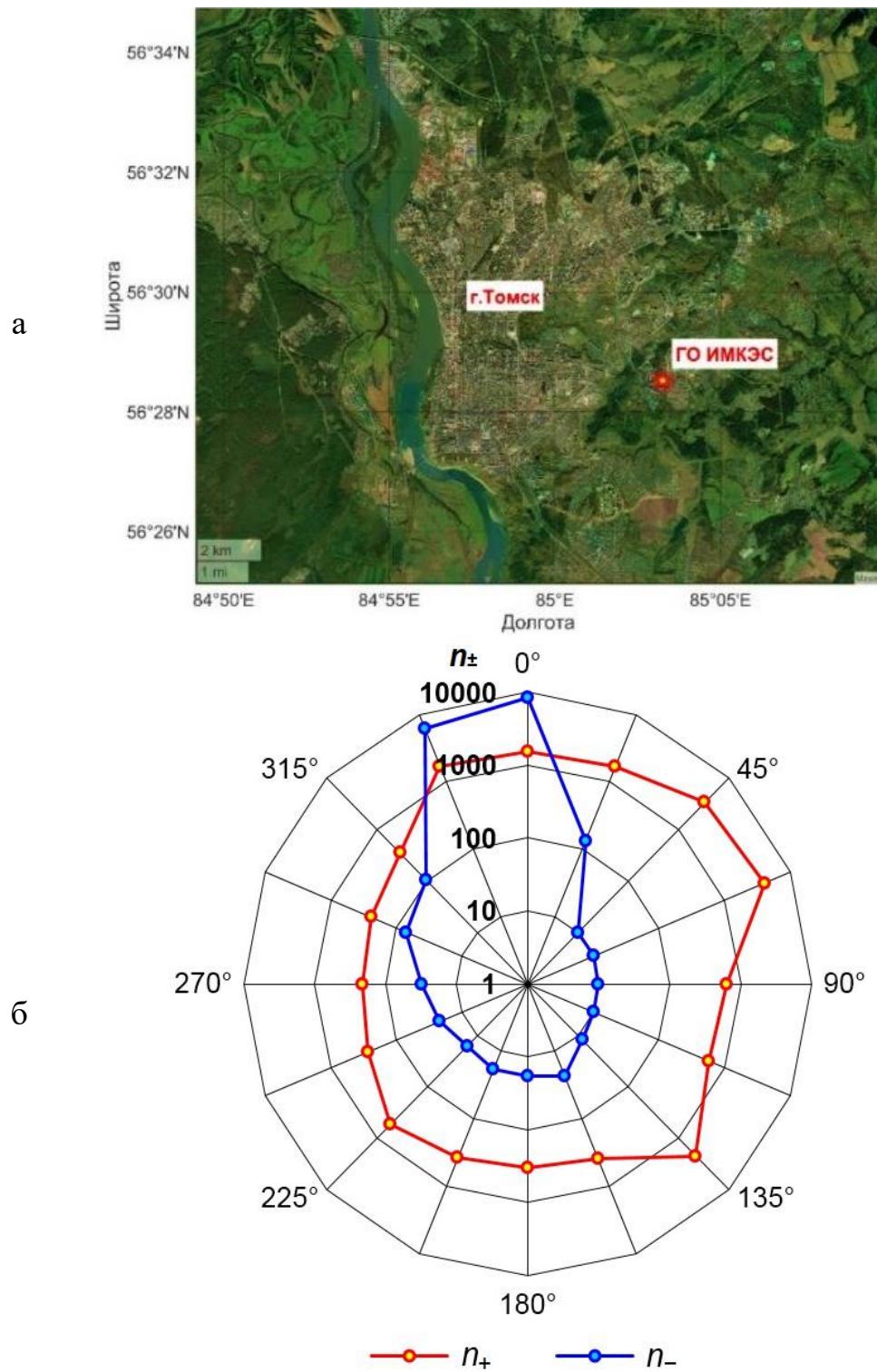


Рисунок 2.12 — Карта-схема расположения ГО ИМКЭС (а) и диаграмма распределения медианных значений  $n_{\pm}$  (в  $\text{cm}^{-3}$ ) в зависимости от направления ветра

Предположительно, это связано с тем, что на момент измерений (2014—2016 гг.) с севера, северо-востока Томск не был застроен, что позволяло поступать чистым Арктическим воздушным массам с севера. Подобные зависимости отмечаются аналогичным прибором были получены для Хельсинки [Skromulis, 2018], в Такхузе (Эстония) [Hõrrak et al., 2003], Санкт-Петербурге [Зайнетдинов, 2025]. При южном и юго-восточном направлениях часто отмечается приход теплых, запыленных масс с территории Центральной Азии, особенно при развитии циклонов, когда его теплый сектор находится над территорией исследования, что способствует процессу стока ионов на аэрозоль и снижению концентрации ионов. Восточные направления ветра часто связаны с установлением местных антициклонов, которые с восточных окрестностей Томска приносят загрязненный воздух от расположенных там крупных полигонов отходов и животноводческих комплексов, которые могут приводить к снижению концентраций ионов отрицательной полярности [Pawar et al., 2012].

#### *Суточная изменчивость концентрации лёгких ионов*

Важный фактор, оказывающий влияние на приземное электрическое поле в электрически невозмущённых атмосферных условиях — локальные условия окружающей среды (влажность воздуха, содержание аэрозоля в воздухе, радиационный фон и другие факторы). В селитебных (антропогенных) ландшафтах влияние загрязнённости воздуха, зданий и сооружений, линий электропередач и других антропогенных объектов на приземное электрическое поле может доминировать над физико-географическими факторами.

Суточные вариации концентрации лёгких ионов представлены на рис. 2.13. Четко прослеживается выраженный суточный ритм с минимумом в ночные часы (20—06 ч) и максимумом в дневное время (10—16 ч). Концентрация положительных ионов ( $n_+$ ) превышает концентрацию отрицательных ( $n_-$ ) на протяжении всех суток, что характерно для приземного слоя атмосферы. Утренний рост концентраций отрицательных ионов начинается после 06 ч и достигает пика к 21 ч, что коррелируется с солнечной радиацией и развитием турбулентности. Ночное снижение

обусловлено ослаблением турбулентного перемешивания и усилением рекомбинационных процессов. Амплитуда суточных колебаний составляет около  $2000 \text{ см}^{-3}$ , демонстрируя высокую чувствительность ионного режима к солнечной активности и метеорологическим условиям.

Анализ данных концентраций лёгких ионов за три теплых периода года показал следующее. В Томске основной максимум  $n_-$  приходится на  $\sim 23\text{--}02$  ч, а минимум — ранним утром 3—6 ч для отрицательных, и на послеполуденные часы для положительных концентраций ионов ( $\sim 13\text{--}17$  ч местного времени). Вечернее повышение может быть связано с ослаблением турбулентности и конвекции, при этом инверсионное распределение еще не сформировалось. При этом выход радона продолжается, а накопление аэрозоля в приземном воздухе за счет инверсии еще не началось. С июля по сентябрь в Томске часто наблюдается инверсионное распределение температуры воздуха (при низкой относительной влажности воздуха) как вочные, так и в утренние часы [Жукова и др., 2021].

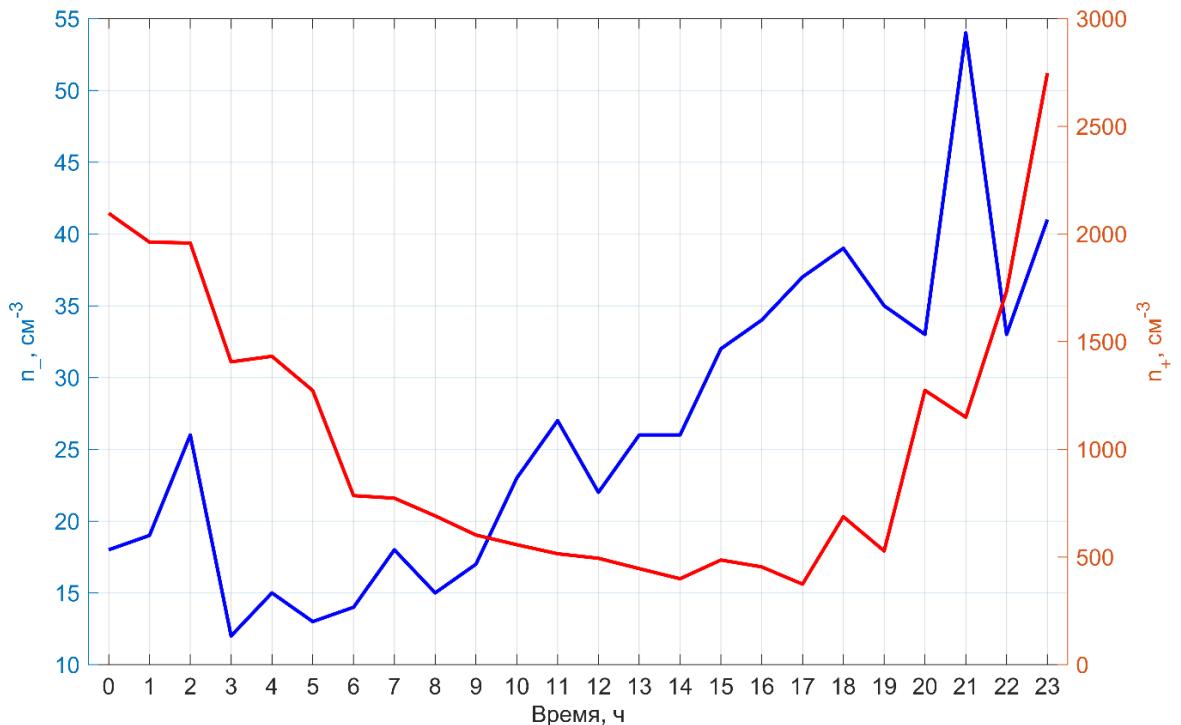


Рисунок 2.13 — Среднесуточная изменчивость  $n_{\pm}$  в условиях «хорошей погоды»

Такое состояние воздуха благоприятствует накоплению аэрозольных частиц. Это, в свою очередь, способствует оседанию на них лёгких ионов, что приводит к

снижению их концентрации в приземном воздухе [Тверской, 1949; Anisimov et al., 2014]. Также, во время интенсивного прогрева воздуха от подстилающей поверхности ( $\sim 07\text{--}12$  ч) прослеживается плавное уменьшение концентрации положительных лёгких ионов. На этом отрезке времени происходит последующее слабое снижение или стабилизация основного минимума, обусловленные действием «конвективного генератора» [Anisimov et al., 2014], в то время как концентрация отрицательных ионов возрастает (прибор был установлен на крыше пятиэтажного здания).

## 2.5 Выводы по главе

В ходе исследования были получены следующие основные результаты.

1. Статистические характеристики концентраций лёгких ионов в Томске в условиях «хорошей» погоды показывают на асимметричное распределение, где наибольшая повторяемость значений приходится на диапазон  $10\text{--}500\text{ см}^{-3}$ , при этом медианная концентрация положительных ионов ( $10^3\text{ см}^{-3}$ ) превалирует над отрицательными ( $10\text{ см}^{-3}$ ).
2. Направление ветра является критически важным фактором при оценке изменчивости ионов в городских условиях: в Томске наибольшие концентрации ионов наблюдаются при северных направлениях ветра, приносящих «чистые» арктические воздушные массы, тогда как южные и восточные ветра, несущие загрязняющие вещества в виде аэрозольных частиц, приводят к резкому снижению концентраций лёгких ионов из-за их стока на аэрозоли.
3. Суточный ход концентраций лёгких ионов демонстрирует четкий ритм с дневным минимумом ( $10\text{--}16$  ч), связанный с поступлением солнечной радиации и развитием турбулентных и конвективных процессов в приземном слое, и ночных максимумом, обусловленным поступлением радона из почвы, ослаблением перемешивания и усилением рекомбинации за счет инверсий.
4. Атмосферные процессы, такие как температурные инверсии, способствуют накоплению аэрозоля и последующему снижению концентрации лёгких ионов, в то время как дневной прогрев и действие «конвективного генератора» также вносят свой вклад в их изменчивость.

## **ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ВОДНОГО АЭРОЗОЛЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ**

Основными вопросами, рассмотренными в этой главе, являются: оценка изменчивости электропроводности воздуха под воздействием водного аэрозоля различного происхождения: ливни, водопады. Основные результаты главы опубликованы в [Kalchikhin et al., 2020; Pustovalov et al., 2022; Nagorskiy et al., 2022; Симонова и др., 2024; Пустовалов и др., 20246].

### **3.1. Первичный этап отбора и обработки данных**

Для оценки влияния сильных ливневых осадков и синоптических условий производился автоматизированный отбор данных электропроводностей воздуха, измеренных в ГО ИМКЭС в 2018 и 2019 гг. по следующим категориям:

- прохождение внутримассовой конвективной облачности с осадками;
- прохождение холодных фронтов с осадками;
- прохождение фронтов окклюзий с осадками;
- другое (теплые фронты, вблизи «точки окклюзии»);

Определение категорий производилось по спутниковым изображениям, также привлекались данные электрического поля, для более точной привязки ко времени явлений [Нагорский и др. 2013; Пустовалов, Нагорский, 2016].

На следующем этапе из выбранных данных были исключены все случаи, когда максимальная интенсивность осадков не превышала 5 мм/ч. Из-за отсутствия у «Электропроводность-2» автокалибровки и места нуля, было принято учитывать не абсолютные значения электропроводности воздуха, а величину отклонения  $\lambda_-$  в % относительно невозмущенных условий, предшествующих прохождению фронта или внутримассовой облачности. Соответственно средневзвешенное  $\lambda_-$  в невозму-

щенных условиях, а также в период максимальной интенсивности осадков и рассчитывался эффект. В подавляющем большинстве случаев, изменчивость регистрировалась у отрицательной электропроводности. Для положительной, рост был не значителен или отсутствовал совсем. В результате за исследованный период было выявлено и проанализировано 37 случаев (или  $\sim 10^6$  значений атмосферно-электрических и метеорологических величин за 2 года) сильных ливневых осадков различного генезиса.

### **3.2. Оценки изменчивости электропроводности в различных синоптических условиях**

В таблице 3.1 представлены: даты отобранных случаев сильных осадков (интенсивностью более 5 мм/ч); время начала их выпадения; величина отклонения  $\lambda_-$  в % относительно невозмущенных условий; диапазоны изменчивости градиента потенциала электрического поля и интенсивности осадков. Также в таблице приведены синоптические условия и основной тип облачности, и сопутствующие атмосферные явления.

Анализ данных, представленных в таблице 3.1, показал, что случаи с эффектом роста  $\lambda_-$  и его отсутвием для фронтальных ливневых дождей составляют 95 % и 5 % соответственно, а для внутримассовых ливневых дождей — 13 % и 87 % соответственно. В 22 случаях (49 %) наблюдался значительный, весьма кратковременный рост отрицательной электропроводности, в 15 случаях (33 %) увеличение  $\lambda_-$  не зафиксировано, а 8 случаях (18 %) имела место неопределенная ситуация, когда вариации отрицательной электропроводности нельзя было определить однозначно. В подавляющем большинстве случаях *Cb*, относящихся к внутримассовой облачности, «взрывного» роста отрицательной электропроводности зарегистрировано не было, в то время как все случаи «взрывного» роста  $\lambda_-$  связаны с фронтальными *Cb* (рисунок 3.1а).

Таблица 3.1.

## Связь электропроводности воздуха с синоптическими условиями.

№	Дата	Время начала	Эффект значительного увеличения $\lambda_+$ (% от предыдущих невозмущенных значений $\lambda_-$ ) %, макс	$\nabla\phi$ , $\times 10^3$ В/м	$I$ , мм / ч	Синоптическая ситуация	Облачность и атмосферные явления
1	20.06.2018 г.	22:50	+ (666 %)	-12,1 ÷ +11,0	5,0 ÷ 48,0	Холодный фронт циклона на АФ	<i>Cb, Ac, Ci</i> ; гроза
2	20.07.2018 г.	07:30	+ (3900 %)	-8,2 ÷ 0,0	10,0 ÷ 90,0	Холодный фронт циклона на АФ	<i>Sc, Ac</i> ; осадков на ГМС Томск не отмечалось
3	28.07.2018 г.	13:40	+ (2500 %)	-1,4 ÷ 2,7	5,0 ÷ 20,0	Фронт окклюзии циклона на АФ	<i>Cb, Sc, As</i>
4	29.07.2018 г.	16:50	+ (300 %)	-12,6 ÷ +9,9	3,0 ÷ 12,0	Холодный фронт циклона на АФ	<i>Sc, Ac, Ci</i> ; осадков на ГМС Томск не отмечалось
5	11.08.2018 г.	14:40	+ (900 %)	-6,0 ÷ +2,7	5,0 ÷ 38,0	Холодный фронт циклона на АФ	<i>Cb, Ac</i>
6	22.08.2018 г.	17:50	+ (500 %)	-2,2 ÷ +2,7	3,0 ÷ 17,0	Холодный фронт циклона на ПФ	<i>Cb, Sc</i>
7	23.08.2018 г.	20:00	+ (4600 %)	-3,3 ÷ +3,3	10,0 ÷ 100,0	Фронт окклюзии циклона на ПФ	<i>Cb, Sc, Ac</i>
8	26.08.2018 г.	13:30	+ (250 %)	-12,6 ÷ +9,3	3,0 ÷ 23,0	Фронт окклюзии циклона на ПФ	<i>Cb</i> ; гроза

9	22.09.2018 г.	16:00	<sup>+</sup> (766 %)	-7,7 ÷ +13,2	5,0 ÷ 50,0	Фронт окклюзии циклона на ПФ	<i>Cb, Sc, Ac; гроза</i>
10	15.05.2019 г.	16:30	<sup>-</sup> (90 %)	-13,7 ÷ +24,7	3,0 ÷ 24,0	Внутримассовая ситуация (АВ)	<i>Cb, Ci</i>
11	19.05.2019 г.	14:15	<sup>-</sup> (100 %)	-17,6 ÷ +22,0	0,5 ÷ 5,0	Внутримассовая ситуация (УВ)	<i>Sc, Ac, Cb</i>
12	21.05.2019 г.	18:45	<sup>-</sup> (71 %)	-20,3 ÷ +11,0	2,5 ÷ 17,0	Внутримассовая ситуация (УВ), периферия фронта окклюзии (ПФ)	<i>Cb, Sc, Ac</i>
13	30.05.2019 г.	17:00	<sup>+</sup> (675 %)	-11,0 ÷ + 6,6	5,0 ÷ 75,0	Холодный фронт циклона на АФ	<i>Cb, Sc, Ac; гроза</i>
14	31.05.2019 г.	15:00	<sup>+</sup> (533 %)	-19,2 ÷ +19,2	2,5 ÷ 40,0	Холодный фронт циклона на АФ	<i>Cb; гроза</i>
15	31.05.2019 г.	18:30	<sup>+</sup> (833 %)	-5,5 ÷ +3,3	3,0 ÷ 22,0	Вторичный холодный фронт в тылу циклона на АФ	<i>Cb</i>
16	04.06.2019 г.	01:20	<sup>+</sup> (314 %)	-8,2 ÷ +9,3	6,0 ÷ 50,0	Центр циклона на АФ, слияние тёплого и холодного фронтов («точка окклюзии»)	<i>Cb, Ac</i>
17	04.06.2019 г.	02:50	<sup>+</sup> (300 %)	-7,7 ÷ +10,4	5 ÷ 35		<i>Cb, Sc</i>
18	04.06.2019 г.	11:15	<sup>+</sup> (1000 %)	-1,9 ÷ +1,6	5 ÷ 60	Фронт окклюзии циклона на АФ	<i>Cb</i>
19	08.06.2019 г.	15:15	<sup>+</sup> (300 %)	-5,5 ÷ +5,5	4 ÷ 32	Вторичные холодный (-ые) фронт (-ы) в тылу циклона на АФ, на котором (-ых) развивается линия (-ии) шквалов	<i>Cb</i>
20	08.06.2019 г.	17:00	<sup>+</sup> (625 %)	-8,2 ÷ +9,9	5 ÷ 45		<i>Cb</i>

21	13.06.2019 г.	16:45	— (80 %)	-13,7 ÷ +11,0	1 ÷ 7	Внутримассовая ситуа-ция (УВ)	<i>Cb, Cs;</i> осадков на ГМС Томск не отмеча-лось
22	13.06.2019 г.	18:50	— (100 %)	-7,7 ÷ +6,6	2 ÷ 17	Фронт окклюзии цик-лона на ПФ	<i>Cb;</i> гроза
23	17.06.2019 г.	14:15	+ (550 %)	-5,5 ÷ +0,55	3 ÷ 25	Внутримассовая ситуа-ция (AB)	<i>Cu med, Cu cong;</i> осадков на ГМС Томск не отмеча-лось
24	17.06.2019 г.	18:00	+ (450 %)	-10,4 ÷ +9,9	5 ÷ 45	Холодный фронт цик-лона на АФ	<i>Cb, Ac, Ci</i>
25	23.06.2019 г.	01:55	— (125 %)	-10,4 ÷ +6,6	4 ÷ 25	Внутримассовая ситуа-ция (УВ)	<i>Cb, Sc, Ac</i>
26	10.07.2019 г.	00:00	+ (633 %)	-13,7 ÷ +9,9	2 ÷ 14	Внутримассовая ситуа-ция (УВ)	<i>Cb, Sc;</i> гроза
27	17.07.2019 г.	11:20	— (100 %)	-10,4 ÷ +10,4	3 ÷ 11	Внутримассовая ситуа-ция (УВ)	<i>Cb, Ac</i>
28	03.08.2019 г.	07:40	+ (580 %)	-15,4 ÷ +8,2	10 ÷ 80	Холодный фронт цик-лона на ПФ	<i>Cb, Ci;</i> гроза
29	10.08.2019 г.	19:00	— (115 %)	-0,55 ÷ +1,6	3 ÷ 13	Внутримассовая ситуа-ция (AB)	<i>Sc, Cb;</i> осадков на ГМС Томск не отмеча-лось
30	18.08.2019 г.	20:05	— (100 %)	-8,8 ÷ 0,0	3 ÷ 9	Внутримассовая ситуа-ция (УВ)	<i>Cb, Ac, Ci</i>
31	20.08.2019 г.	17:45	— (105 %)	-8,2 ÷ +7,1	1 ÷ 7	Внутримассовая ситуа-ция (AB)	<i>Cb, Sc, Ac</i>

32	27.08.2019 г.	19:40	— (160 %)	-6,6 ÷ +11,0	3 ÷ 18	Внутримассовая ситуа- ция (УВ)	<i>Cb, Ac;</i> осадков на ГМС Томск не отмеча- лось
33	30.08.2019 г.	21:00	— (100 %)	-6,6 ÷ +2,7	2 ÷ 15	Внутримассовая ситуа- ция (УВ)	<i>Ci, Cb;</i> гроза
34	03.09.2019 г.	15:40	+ (1100 %)	-13,7 ÷ +13,7	10 ÷ 100	Фронт окклюзии цик- лона на АФ	<i>Cb, Ac;</i> гроза, осад- ков на ГМС Томск не отмечалось
35	04.09.2019 г.	15:15	— (110 %)	-8,2 ÷ +27,5	1 ÷ 8	Внутримассовая ситуа- ция (AB)	<i>Ci, Sc, Cb;</i> гроза
36	17.09.2019 г.	21:00	— (97 %)	-12,1 ÷ 10,4	2 ÷ 14	Внутримассовая ситуа- ция (УВ), периферия фронта окклюзии	<i>Ci, Ac, Cb;</i> гроза
37	23.09.2019 г.	13:40	+ (200 %)	-2,7 ÷ +1,1	5 ÷ 18	Холодный фронт цик- лона на АФ	<i>Cb, As</i>

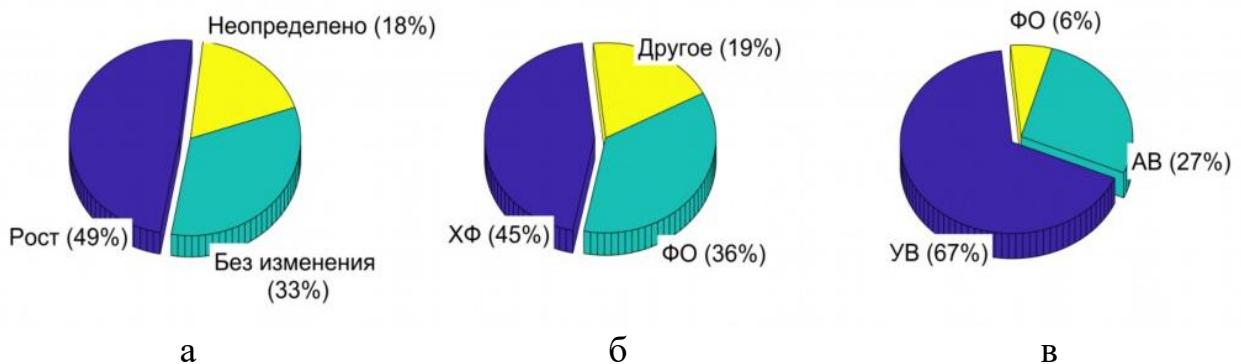


Рисунок 3.1 — Соотношение повторяемостей различных типов изменения  $\lambda_-$  при выпадении ливневого дождя (а), а также синоптических условий, при которых отмечался (б) и отсутствовал (в) значимый рост  $\lambda_-$

При этом рост электропроводности в 80 % случаев происходит во время выпадения осадков фронтального происхождения (рис 3.1б). В то же время выпадение осадков из внутримассовых кучево-дождевых облаков не дает значимого изменения электропроводности воздуха (рис 3.1в). Таким образом, во всех случаях *Cb*, относящихся к внутримассовой облачности, роста отрицательной электропроводности зарегистрировано не было. В то время как все случаи «взрывного» роста  $\lambda_-$  связаны с фронтальными *Cb*.

Рассмотрим подробнее влияние внутримассовых и фронтальных осадков на электропроводность воздуха на примере двух случаев: прохождения внутримассовых *Cb* и фронтов с ливневыми осадками. Выбранные случаи представляют собой типичный пример прохождения *Cb* с обильными осадками, зафиксированными в 2018—2019 годах.

17 июня 2019 года над Томском проходила система облаков холодного фронта (*Cb*, *Ac*, *Ci* и сильный дождь), образованного на Арктическом фронте окклюдированного циклона с центром в районе г. Салехард (рис. 3.2). Во время прохождения фронта, грозовая деятельность отсутствовала, при этом были зарегистрированы сильные ливневые осадки высокой интенсивности (до 45 мм/ч), зарегистрированной на ГО ИМКЭС.

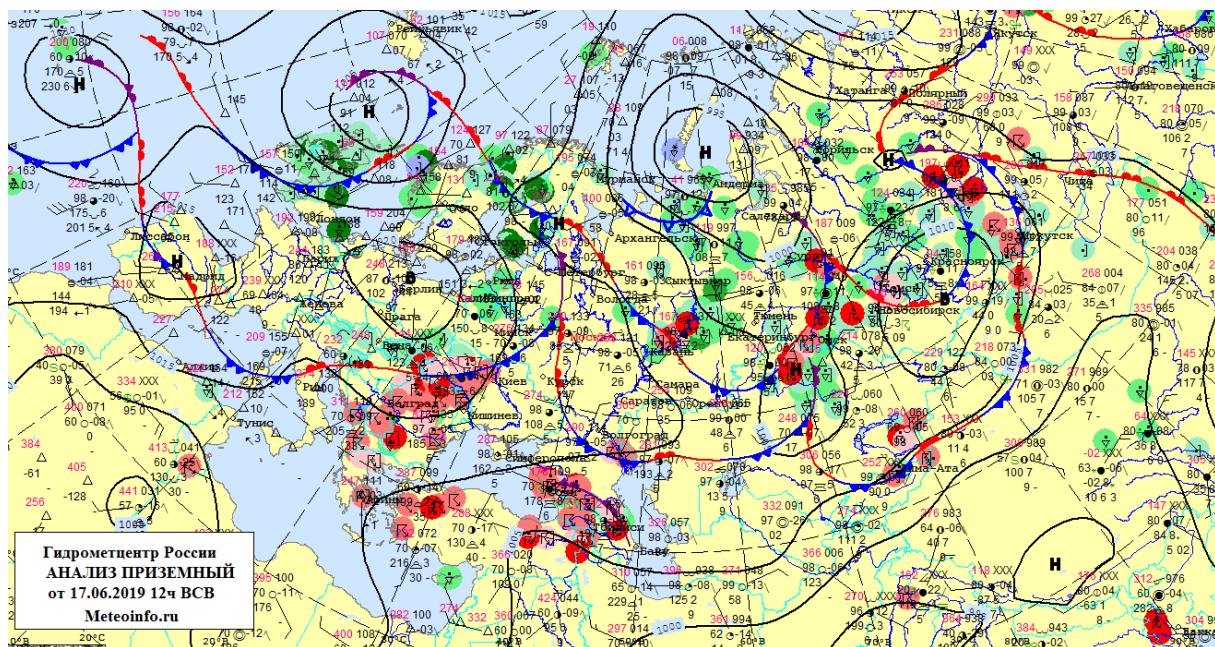


Рисунок 3.2 – Синоптическая карта с приземным фронтальным анализом за 17.06.2019 за 12 часов ВСВ [Карты фактической погоды...]

В ночь с 22 на 23 июня 2019 года над Томском проходила внутримассовая облачность (*Cb*, *Sc*, *Ac*, гроза и ливень), образованная в поле облачности за ХФ окклюдированного циклона на полярном фронте (рис 3.3). В первом случае максимальная скорость  $I_p$  примерно равна 45 мм/ч и почти в два раза больше, чем во втором ( $\sim 25$  мм/ч).

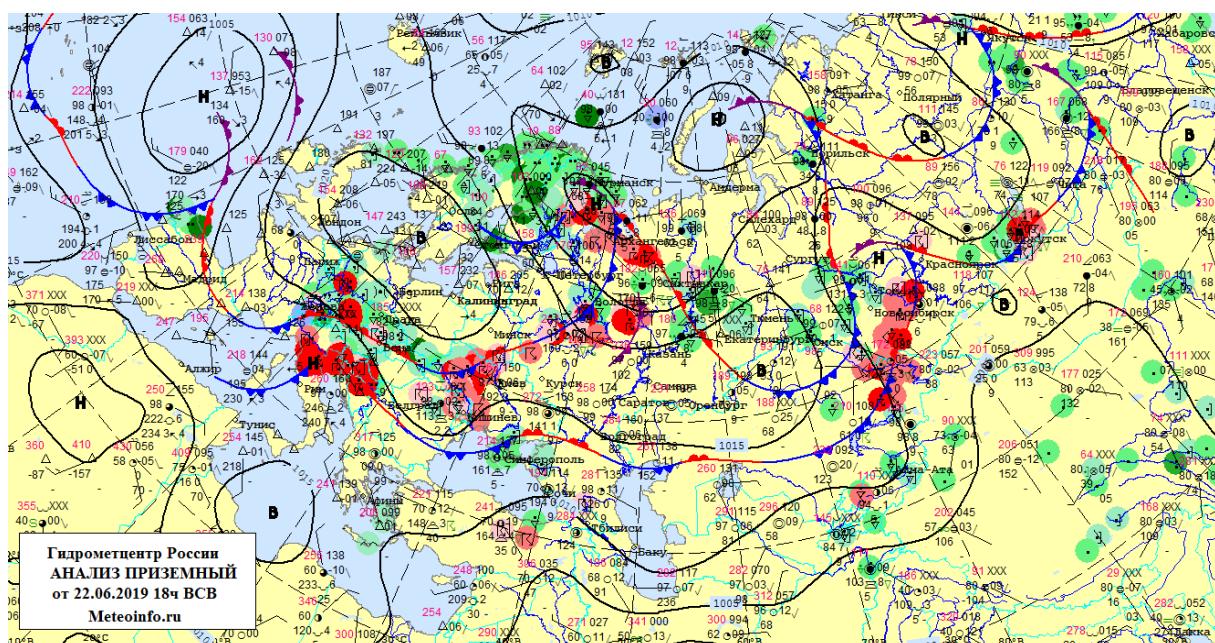


Рисунок 3.3 — Синоптическая карта с приземным фронтальным анализом за 22.06.2019 за 18 часов ВСВ [Карты фактической погоды...]

На рисунке 3.4 представлены распределения атмосферных электрических величин и характеристик фронтальных осадков 17 июня 2019.

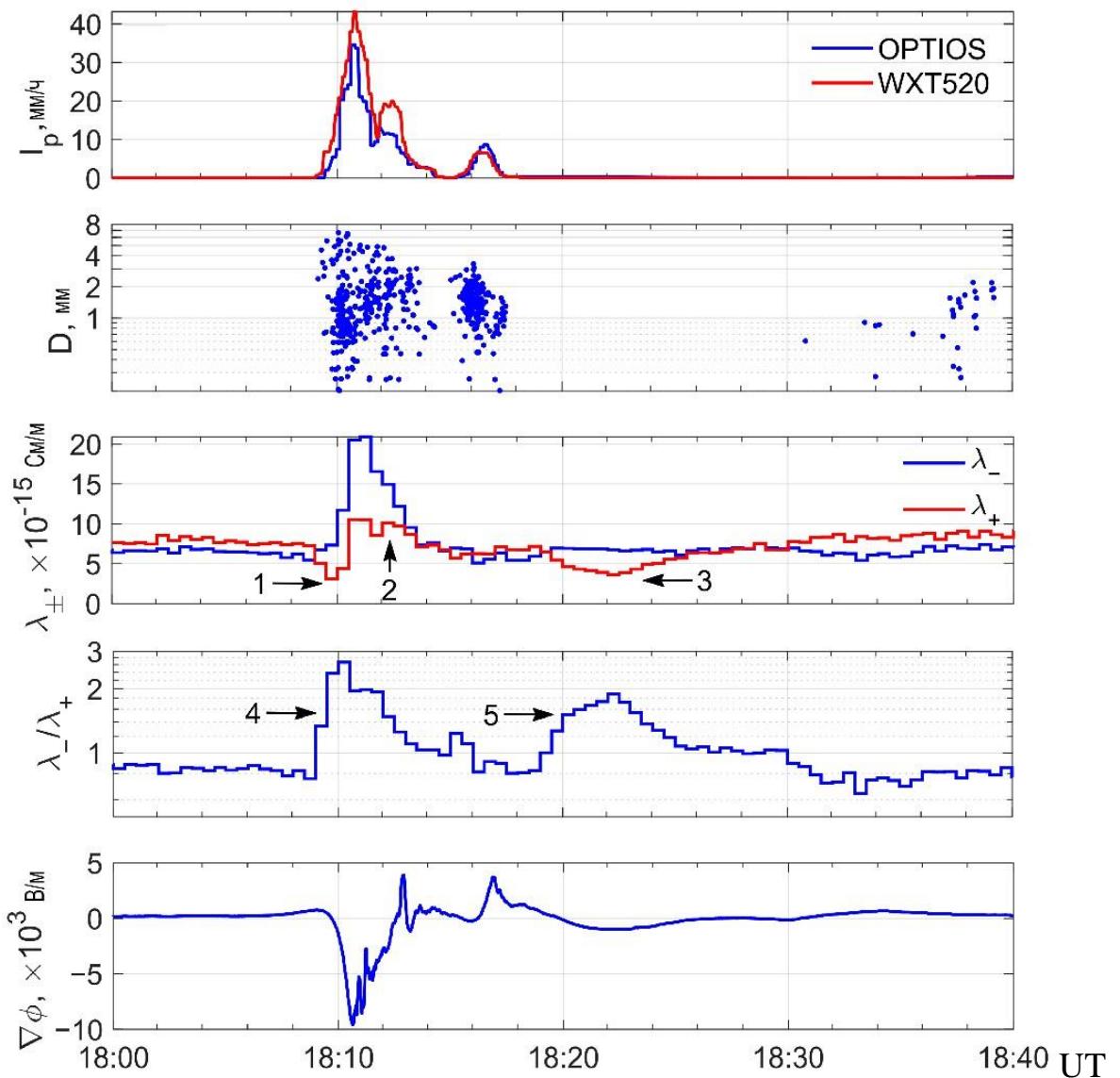


Рисунок 3.4 — Распределение атмосферных электрических величин и характеристик фронтальных осадков 17 июня 2019 г. На графиках (сверху вниз) показано изменение интенсивности осадков  $I_p$ , плотности капель в координатах «время — диаметр капель»  $D$ , электропроводности  $\lambda_-$ ,  $\lambda_+$ , коэффициента электропроводности  $\lambda_-/\lambda_+$  и градиента потенциала ( $\nabla\phi$ )

Изменение отношения электропроводности различной полярности ( $\lambda_-/\lambda_+$ ) под влиянием сильного дождя, Первый максимум должен коррелировать с увеличением количества лёгких отрицательных ионов под влиянием сильного дождя

(стрелка 4). Как следствие, в приземной атмосфере образуется отрицательный объемный заряд. Второй максимум  $\lambda_-/\lambda_+$ , обозначенный стрелкой 5, возникает после окончания дождя из-за уменьшения количества лёгких положительных ионов (стрелка 3).

Далее анализируются данные, полученные при прохождении *Cb* внутримассового происхождения (рисунок 3.5). В этом случае, как и в других подобных ситуациях, не наблюдается быстрого роста числа  $\lambda_-$ .

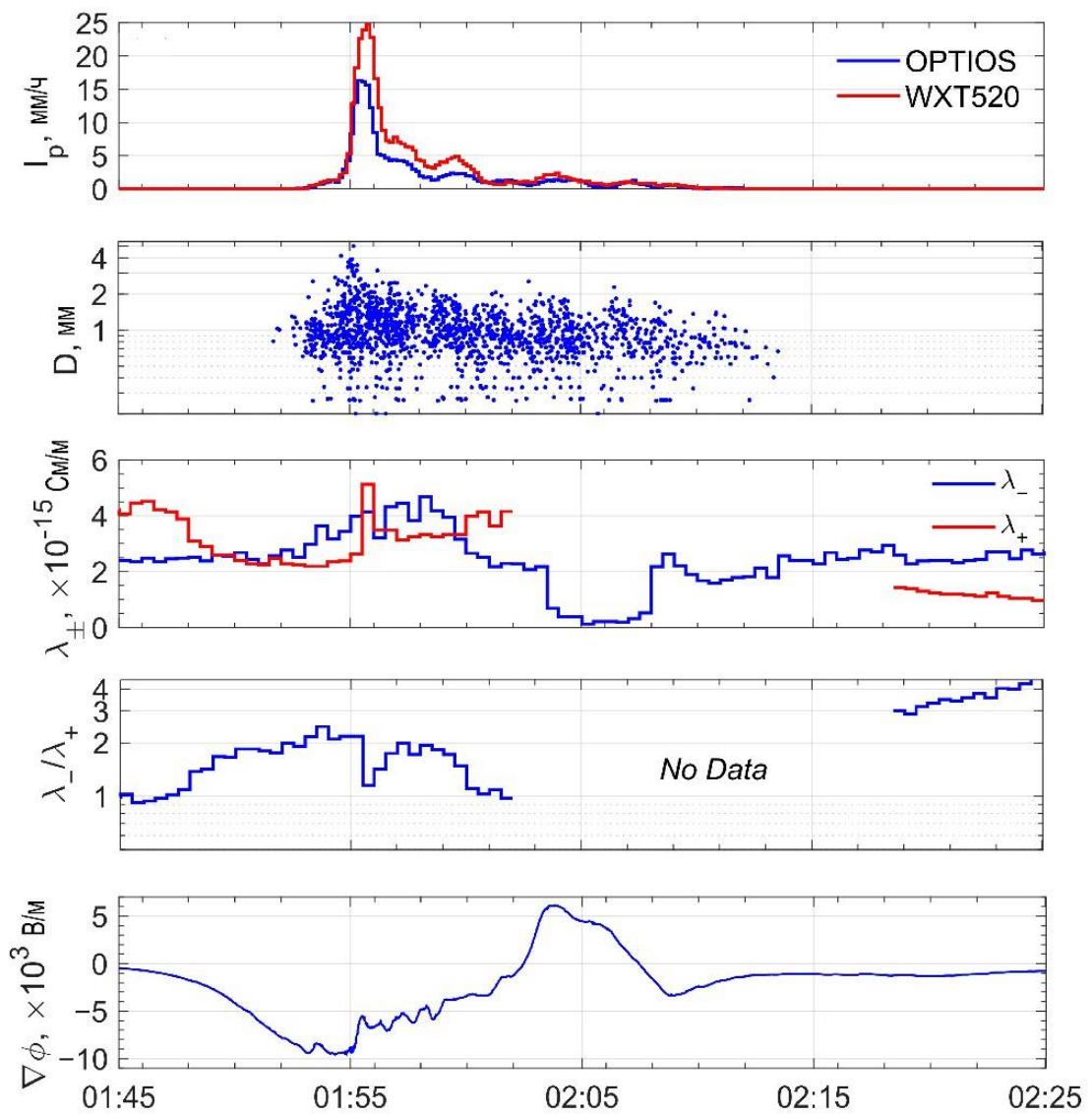


Рисунок 3.5 — Распределение атмосферных электрических величин и характеристик внутримассовых осадков за 23 июня 2019 г. На графиках (сверху вниз) показано изменение интенсивности осадков  $I_p$ , плотности капель в координатах «время

– диаметр капель»  $D$ , электропроводности  $\lambda_-$ ,  $\lambda_+$ , коэффициента электропроводности  $\lambda_-/\lambda_+$  и градиента потенциала ( $\nabla\phi$ )

Был зарегистрирован только плавный рост  $\lambda_-$  (рис. 3.5), начавшийся до выпадения осадков. В то же время не было отмечено реакции  $\lambda_-(t)$  на резкое увеличение интенсивности осадков до 15—25 мм/ч. Падение отрицательной электропроводности почти до нуля связано с увеличением  $\nabla\phi$  до +1000 В и более и образованием объёмного заряда в электродном слое, состоящем в основном из положительных лёгких ионов. В работе [Nagorsky et al., 2014] более подробно рассматриваются процессы образования пространственного заряда в поверхностном слое под воздействием градиента потенциала, создаваемого изолированной грозовой ячейкой. При этом в случае прохождения фронтальной облачности с осадками, такого эффекта не наблюдается — осадки в данном случае играют доминирующую роль в образовании ионов, а, следовательно, и увеличении электропроводности.

Изменение атмосферного электрического потенциала ( $\nabla\phi$ ) в соответствии с классификацией, приведённой в [Pustovalov, Nagorskiy, 2018] указывает на то, что грозовая ячейка, вызвавшая осадки, сначала характеризовалась отрицательными, а затем положительными отклонениями  $\nabla\phi$  на поздней стадии зрелости. Более того, было замечено, что первое возмущение превышало второе как по продолжительности, так и по абсолютным значениям  $\nabla\phi$ . В работе [Симонова и др., 2024], авторы рассматривали влияние осадков из МКС на изотопный состав и указывают на значимость стадии развития облачности, для которой характерно различное соотношение ливневых и обложных осадков.

Проанализировав 37 случаев прохождения внутримассовой и фронтальной облачности с ливневыми осадками, было установлено, что «взрывное» увеличение  $\lambda_-$  коррелирует с осадками, при которых диаметр капель превышает 4 мм. Диапазон размеров капель в случаях осаждения с эффектом роста  $\lambda_-$  и без него составляет 0,5—7 мм и 0,5—4 мм соответственно.

Указанные эффекты могут быть связаны с несколькими процессами:

1. Эффект Ленарда (или баллоэлектрический эффект), представляет собой процесс дробления (разбивания о твёрдую поверхность) капель воды на более мелкие, при котором мельчайшие капли приобретают отрицательный заряд, а более крупные – положительный []. При отрицательные дольше, за счет меньших размеров могут находиться в воздухе и с большей вероятностью могут быть зарегистрированы прибором, а крупные положительные – оседают на подстилающей поверхности, не внося вклад в положительную электропроводность воздуха.
2. Фронтальная облачность, проходя над большими территориями (например, над территорией Сибири характерно частое прохождение южных циклонов [Руководство по краткосрочным..., 1966]), может аккумулировать в себе различные вещества, в том числе и радиоактивные, при выпадении которых может увеличиваться ионизация воздуха [Яковлева и др., 2020]. Внутrimассовая облачность с осадками над территорией юго-западной Сибири, которая имеет среднее время жизни около 30–50 мин, не успевает за время своего существования аккумулировать большое количество этих веществ и, как следствие, выпадающие из неё осадки не способны оказывать сопоставимое влияние на электропроводность воздуха.
3. Фронтальная облачность, представляющая собой протяженную по пространству систему, генерирует продолжительные осадки над большой территорией, которые могут «вымывать» аэрозоль из атмосферы [Тверской, 1964]. Осадки, выпадающие из одиночных кучево-дождевых облаков, являются локальными по пространству и непродолжительные по времени и, как следствие, не могут оказывать сильного влияния на аэрозоль, а, следовательно, и на концентрацию лёгких ионов.

Таким образом, анализ данных показывает, что изменчивость электропроводности в приземном слое атмосферы принципиально отличается для фронтальных и внутrimассовых ливней. Поэтому, при исследовании атмосферно-электрических величин необходимо учитывать, как синоптические условия, так и стадию развития облачности.

### 3.3. Влияние водных объектов на электрическое состояние ПС

Особый интерес с точки зрения функционирования ГЭЦ представляют собой водопады как локальные, непрерывно действующие источники значительного количества лёгких ионов.

#### *Методика измерений*

Для оценки влияния различных характеристик (высота свободного падения, расстояние от точки падения) водопадов были проведены экспедиционные измерения в августе 2020 года у безымянного водопада вблизи курорта Аршан (Республика Бурятия), а также в июле 2023 у водопада Бельтертуюк вблизи пос. Куюс (Республика Алтай) (рис. 3.6).

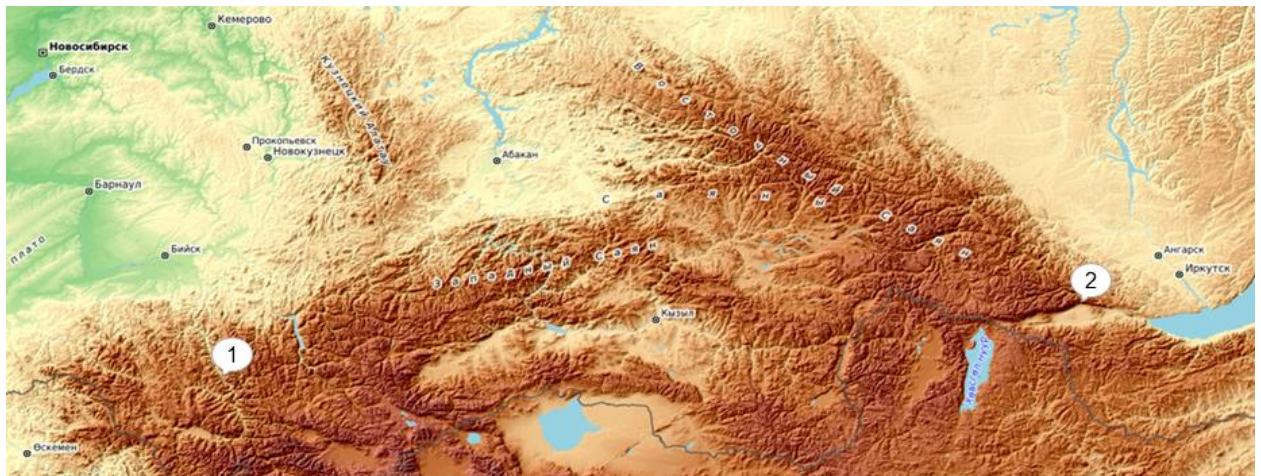


Рисунок 3.6 — Места расположения мест измерений,  
ПН-1 — вдп. Бельтертуюк, ПН-2 — безымянный водопад вблизи пос. Аршан (составлено автором в среде QGIS на основе цифровой матрицы высот SRTM)

В первом случае использовалось следующее оборудование: счетчик аэроионов Air Ion Counter Model AIC2, ручной термогигрометр MS6508 и анемометр MS6252A. Измерение концентраций лёгких ионов производилось в условиях «хорошей» погоды в течение 10 минут с частотой дискретизации 5 с. Во втором случае к вышеперечисленному оборудованию добавился датчик пыли SDS011. Измерения ионов производилось в условиях «хорошей» погоды в течение 20 минут с

частотой дискретизации 1 с. Все датчики размещались на штативе-треноге на высоте 1 м над подстилающей поверхностью (рис. 3.7). Измерения проводились в условиях «хорошей погоды», в околополуденные часы, для того чтобы нивелировать влияние суточной изменчивости метеорологических величин и электрического поля.



Рисунок 3.7 – Пример установки приборов в ПН-2 – (а) и ПН-1 (б)  
(фото автора, 2020, 2023)

По данным экспедиционных измерений содержания лёгких ионов в приземном слое, выполненных в тёплые периоды 2020 и 2023 гг. вблизи водопадов, получены оценки их пространственной изменчивости.

Детально рассмотрим полученные оценки на примере вдп. Бельтертуюк. В результате проведённого анализа определена концентрация ионов, которая изменилась в пределах  $0,3 \div 0,8 \times 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$  для положительных и  $2,9 \div 13 \times 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$  для отрицательных ионов у водопада Бельтертуюк (рис. 3.8).

Для безымянного водопада в Аршане  $n_+$  изменяется от  $0,8$  до  $1,0 \times 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$ , и для  $n_-$  —  $10 \div 13 \times 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$ .

Для исследования пространственной изменчивости были проведены маршрутные измерения, анализ данных которых показал значительную изменчивость концентрации ионов на различном удалении от водопада — источника ионизации. На рисунке 3.8 представлены гистограмма распределения (слева) и диаграмма раз-

макса (справа) концентраций аэроионов (*a, б*) и взвешенных частиц (*в, г*), построенные по данным измерений в условиях «хорошей погоды» в непосредственной близости от нижнего каскада водопада. Визуализация данных позволяет выявить ключевые закономерности состояния приземного слоя атмосферы в данной локации. Как и ожидалось, в зоне действия водопада наблюдается ярко выраженный аэроионизирующий эффект: распределение  $n_-$  (рис. 3.8*б*) смещено в область существенно более высоких значений по сравнению с  $n_+$  (рис. 3.8*а*), что подтверждается положением медианы и размахом на соответствующих диаграммах размаха. Этот результат согласуется с физическим механизмом Ленарда, при котором интенсивное дробление воды приводит к преобладанию лёгких отрицательных ионов, формирующих характерный ионный состав воздуха, типичный для гидрологических объектов.

Особый интерес представляет многомодальный характер распределения концентраций отрицательных ионов ( $n_-$ ) и частиц  $PM_{2,5}$  (*в*), что указывает не на случайную изменчивость, а на переключение системы между несколькими устойчивыми состояниями.

Анализ массовой концентрации аэрозольных частиц демонстрирует чёткое различие в поведении фракций. Данные по  $PM_{10}$  (*г*) показывают более широкий разброс и повышенную медианную концентрацию, что непосредственно связано с локальным поступлением в воздух крупнодисперсной водяной взвеси, содержащей частицы почвы и глины, характерные для горных рек. Наиболее важным выводом является взаимосвязь, выявленная через форму распределений: многомодальность в данных по  $PM_{2,5}$  и отрицательным ионам, вероятно, свидетельствует о постоянном динамическом процессе коагуляции. В данном процессе лёгкие аэроионы активно осаждаются на поверхности мелкодисперсных частиц  $PM_{2,5}$ , приводя к их укрупнению и переходу во фракцию  $PM_{10}$ . Таким образом, представленные данные количественно описывают не только статическое состояние воздуха, но и ключевой механизм трансформации аэрозолей в уникальных условиях ионизированного микроклимата водопада.

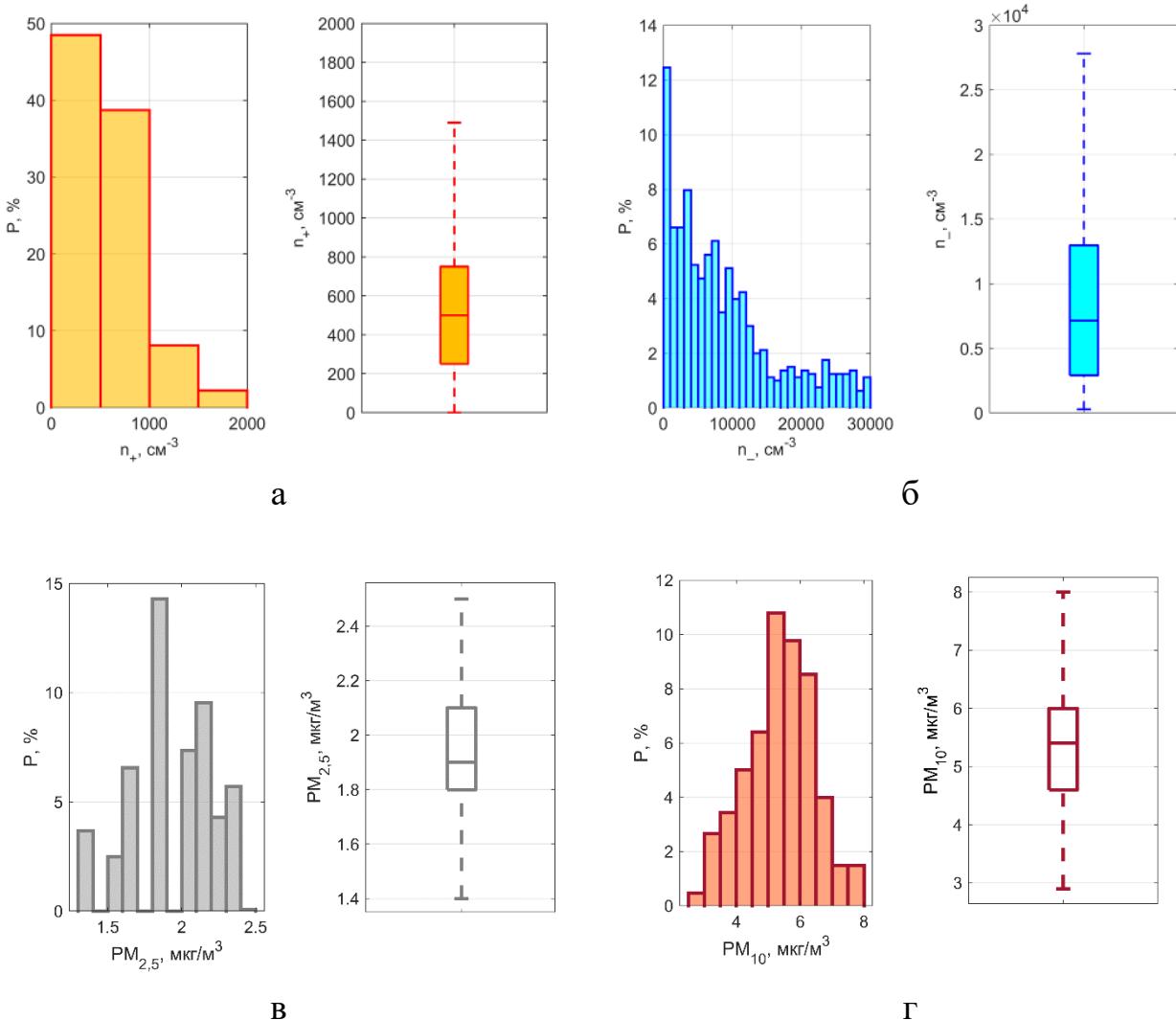


Рисунок 3.8 — Гистограмма распределения (слева) и диаграмма размаха (справа) для значений концентрации положительных (а) и отрицательных (б) ионов, а также массовая концентрация аэрозольных частиц  $PM_{2,5}$  (в) и  $PM_{10}$  (г), в условиях «хорошей погоды» в ПН 1 (точка 8 — нижний каскад водопада)

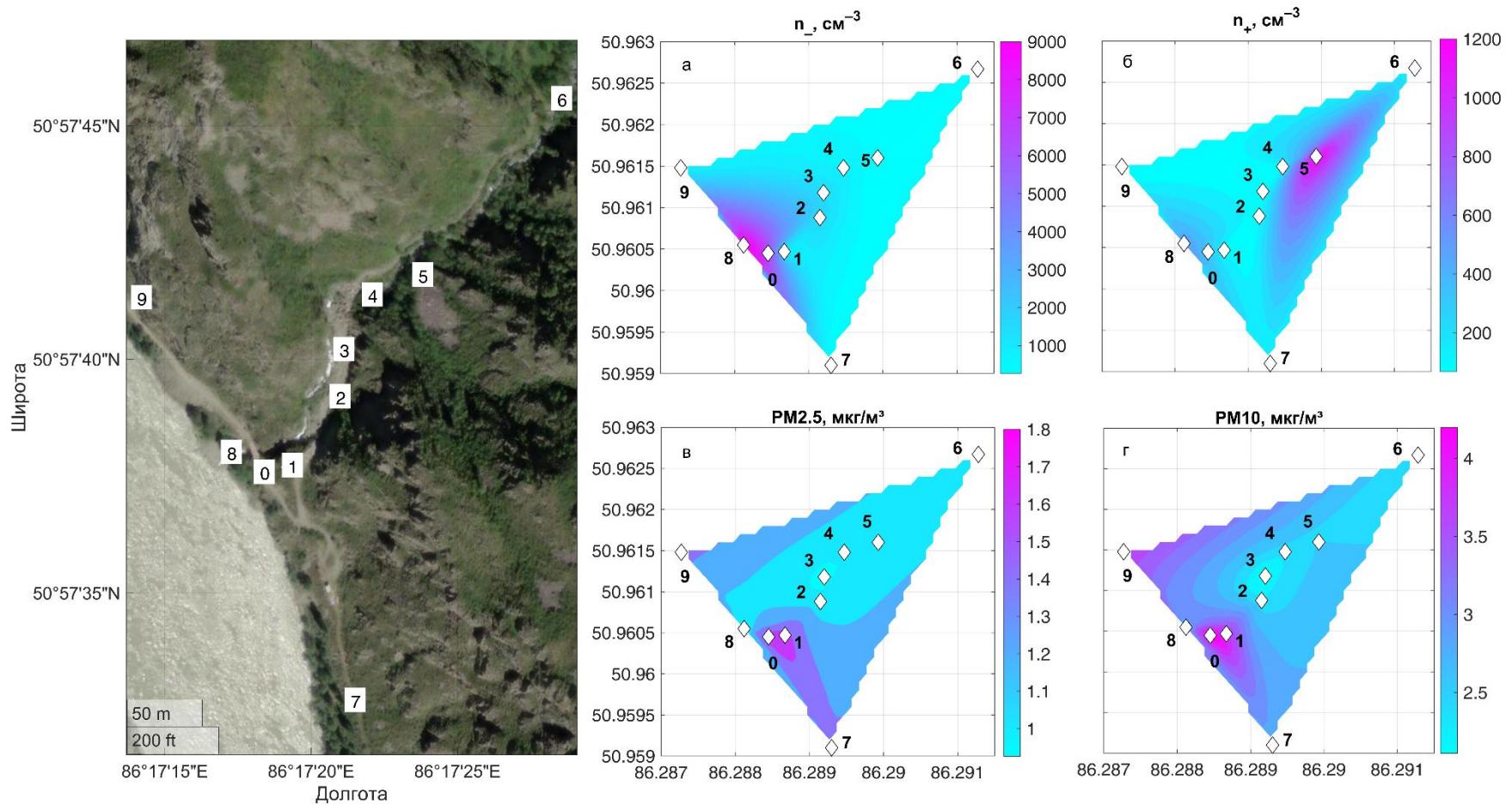


Рисунок 3.9 — Карта-схема расположения точек измерения содержания лёгких ионов в окрестностях водопада Бельтертуюк (слева) и интерполированное пространственное распределение концентрации положительных (а) и отрицательных (б) ионов, рассчитанное по данным измерений, а также концентрации аэрозольных частиц  $\text{PM}_{2.5}$  (в) и  $\text{PM}_{10}$  (г)

Вблизи водопада были зарегистрированы высокие концентрации отрицательных ионов, многократно превышающие фон. На рисунке 3.10 представлены динамические по изменчивости ионов вблизи водопада и на удалении (брались данные с 3 точек измерений вблизи и 3 точек разном удалении от вдп.) Средние медианные концентрации отрицательных аэроионов ( $5,7 \times 10^3$  и  $11,9 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ ) в ~ 28 и 12 раз больше, чем фон. При этом их максимальные значения достигают  $25 \times 10^3$  и  $16 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ , для водопада Бельтертуюк и водопада вблизи Аршана.

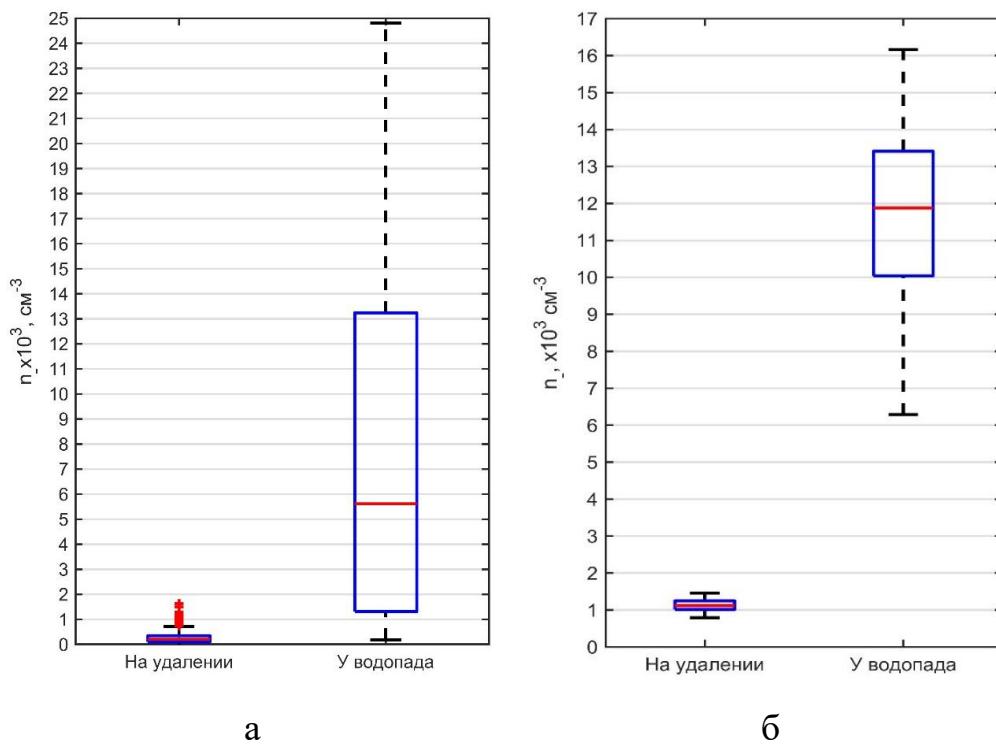


Рисунок 3.10 — Распределения значений концентраций отрицательных ионов ( $n_-$ ) на удалении и вблизи водопада Бельтертуюк (а) и у первого водопада в пос. Аршан (б)

В результате проведенных экспедиционных исследований содержания лёгких ионов в приземном слое атмосферы вблизи водопадов в теплые периоды 2020 и 2023 гг. были получены следующие результаты по оценке пространственной изменчивости концентрации лёгких ионов (рис. 11). Установлено, что  $n_{\pm}$  существенно различаются в зависимости от положения пункта измерений относительно локаль-

ного источника ионизации. У водопада Бельтертуюк концентрация  $n_+$  варьировалась в диапазоне  $0,3\text{--}0,8 \times 10^3$  ионов/см<sup>3</sup>, а отрицательных —  $2,9\text{--}13 \times 10^3$  ионов/см<sup>3</sup>. В районе безымянного водопада в Аршане зафиксированы значения  $n_+ 0,8\text{--}1,0 \times 10^3$  ионов/см<sup>3</sup> и  $n_- 10\text{--}13 \times 10^3$  ионов/см<sup>3</sup>. Выраженная изменчивость характерна для концентраций отрицательных ионов, что обусловлено спецификой механизмов ионизации. При этом концентрации положительных ионов у водопадов демонстрируют более ограниченное пространственное распределение. Статистический анализ выявил существенную корреляционную зависимость

$$y = ax + b, \quad (3.1)$$

где  $x$  — расстояние,  $a, b$  — коэффициенты линейной регрессии, между содержанием отрицательных ионов и расстоянием от источника ионизации. Коэффициент детерминации составил 0,56 и 0,58 для ПН в русле р. Бельтертуюк и р. Кынгарга. Для положительных ионов подобная зависимость не выявлена ( $R^2 = 0,002$  и — 0,015).

Таблица 3.2

Коэффициенты линейной регрессии ( $a, b$ ) и детерминации ( $R^2$ ) для зависимостей концентраций лёгких ионов от расстояния

	Все точки для $n_-$	Точки вдоль реки, $n_-$	Все точки, $n_+$	Точки вдоль реки, $n_+$
$a$	-0,0025	-0,0034	0,0004	0,00016
$b$	3,3	3,5	2,21	2,3
$R^2$	0,304	0,536	0,015	0,002

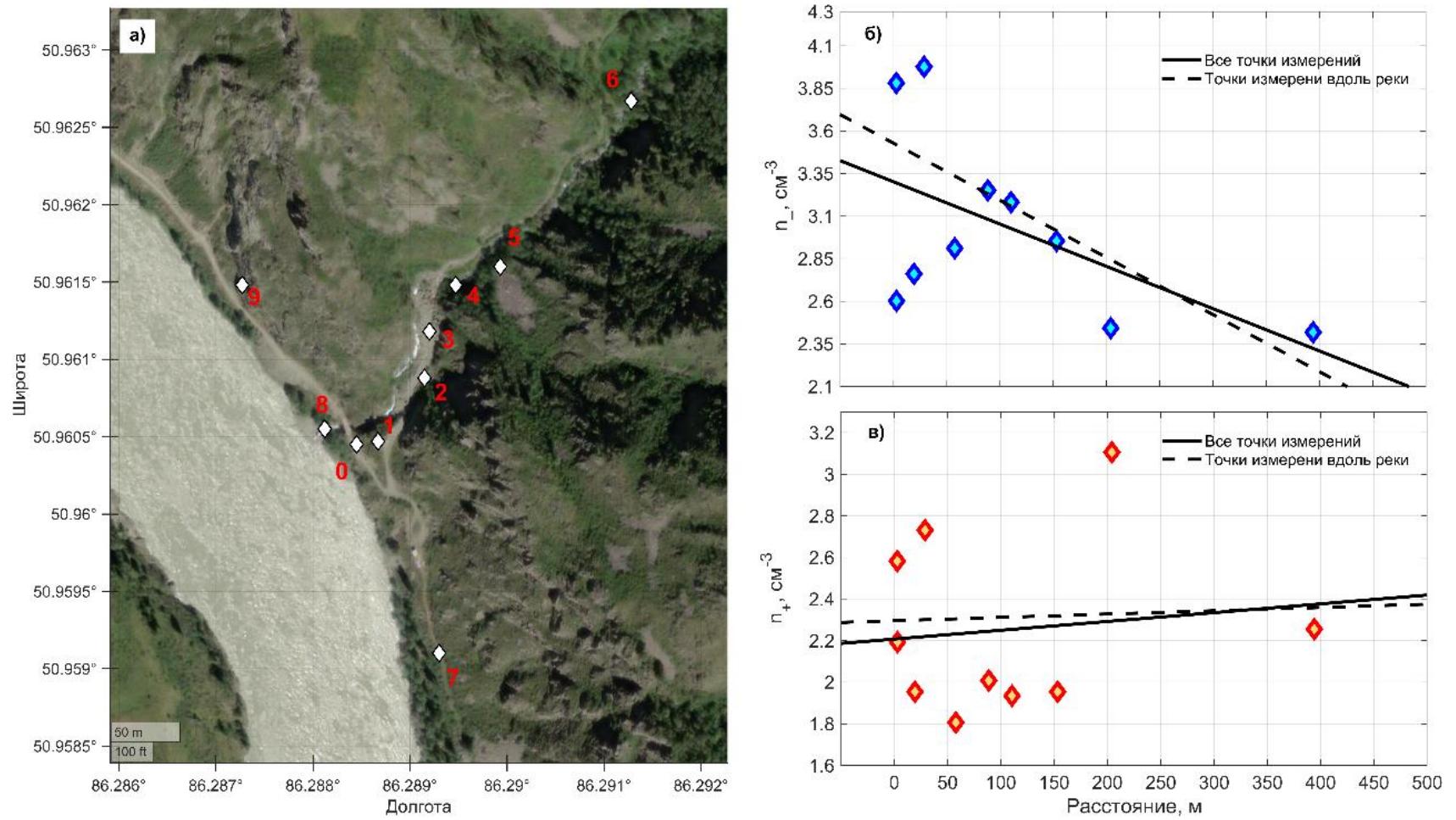


Рисунок 3.11 — Карта-схема расположения точек измерения содержания лёгких ионов в окрестностях водопада Бельтертуюк (а) и отрицательных (б) ионов, рассчитанное по данным измерений, а также концентрации аэрозольных частиц  $PM_{2.5}$  (в) и  $PM_{10}$  (г)

Полученные результаты демонстрируют существенную роль водопадов как природных источников ионизации атмосферы и могут быть использованы для дальнейших исследований влияния природных факторов на аэроионный режим приземного слоя атмосферы, а также для уточнения различных моделей погоды.

Пространственное распределение измеренных концентраций лёгких ионов для исследуемых водопадов связано с траекториями воздушного потока, которые обычно следуют вдоль русла реки, а также описываются его топографией. Вблизи водопадов высокие концентрации ионов быстро снижаются до фоновых концентраций значений через несколько десятков, в случае с водопадом Бельтертуюк и до сотни метров от водопада в Аршане.

Таким образом, водопады являются мощными природными источниками аэроионов, создающими в приземном слое атмосферу с аномально высокой концентрацией лёгких ионов, что особенно важно для изучения Глобальной электрической цепи (ГЭЦ).

Продуцируемый водопадами ионный поток обладает выраженной полярностью: концентрация отрицательных ионов ( $n_-$ ) вблизи водопада многократно (в 10–28 раз) превышает как фоновые значения, так и концентрацию положительных ионов ( $n_+$ ), которая возрастает незначительно.

Пространственное распределение ионов определяется топографией и направлением воздушного потока: высокая концентрация ионов, особенно отрицательных, быстро снижается до фоновых значений по мере удаления от источника, преимущественно распространяясь вдоль русла реки.

Концентрация отрицательных ионов достоверно снижается с увеличением расстояния от водопада. Для точек, расположенных в русле реки, эта зависимость является сильной (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,56—0,58$ ), в то время как для положительных ионов подобная связь отсутствует ( $R^2 \approx 0,002$ ). Зафиксированы количественные характеристики ионного поля для двух конкретных водопадов. У водопада Бельтертуюк концентрация  $n_-$  достигала 13 000 ионов/см<sup>3</sup>, а у водопада в Аршане — 16 000 ионов/см<sup>3</sup>, при этом концентрация  $n_+$  у обоих объектов не превышала 1 000 ионов/см<sup>3</sup>.

### 3.4. Выводы по главе

В ходе работы были получены следующие основные результаты.

1. Влияние типа осадков: наблюдается чёткая зависимость между синоптическим происхождением ливней и реакцией электропроводности: резкий рост отрицательной электропроводности ( $\lambda_-$ ) характерен для фронтальных осадков (95 % случаев), в то время как для внутримассовых ливней он практически незначителен.
2. Эффект увеличения  $\lambda_-$  во время фронтальных ливней является значительным (от 250 % до 4600 %) и весьма кратковременным, что указывает на интенсивный, но локальный по времени процесс разделения зарядов.
3. Изменчивость под воздействием осадков регистрируется преимущественно у отрицательной электропроводности ( $\lambda_-$ ), в то время как рост положительной электропроводности ( $\lambda_+$ ) был незначителен или отсутствовал.
4. «Взрывное» увеличение  $\lambda_-$  коррелирует с выпадением осадков, содержащих капли диаметром более 4 мм при интенсивности более 5—10 мм/ч.
5. Водопады являются мощными локальными источниками лёгких ионов, создавая в непосредственной близости концентрации отрицательных ионов ( $n_-$ ), много-кратно (в 10—28 раз) превышающие фоновые значения.
6. Вблизи водопадов регистрируется значительное преобладание концентраций отрицательных ионов ( $2.9\text{--}13 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ ) над положительными ( $0.3\text{--}1.0 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ ), что указывает на специфический механизм разделения зарядов, генерирующий в основном отрицательные ионы.
7. Наблюдается выраженная пространственная изменчивость концентраций ионов, причём концентрация отрицательных ионов статистически значимо снижается с увеличением расстояния от водопада ( $R^2 = 0.56\text{--}0.58$  вдоль русла), в то время как для положительных ионов такая зависимость отсутствует.

8. Пространственное распределение числа лёгких ионов от водопадов определяется топографией местности (геометрической формой) и направлением воздушного потока, который обычно следует вдоль русла реки, при этом высокие концентрации спадают до фоновых значений на расстоянии нескольких десятков или сотен метров, в зависимости от высоты падения и, возможно, расхода воды.

## **ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ РЕЛЬЕФА И ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЮГА СИБИРИ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОДНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ**

В этом разделе представлены результаты исследований пространственной изменчивости электрических характеристик под воздействием физико-географических особенностей ландшафтов юга Сибири. Основные результаты главы опубликованы в статьях (Оглезнева и др., 2022; Pustovalov et al., 2023 Пустовалов и др., 2024а; Pustovalov et al., 2024; Оглезнева и др., 2025).

### **4.1. Особенности электрическое состояния ПС в болотных ландшафтах**

В данном разделе представлены результаты исследований проведенных в теплый период (май-сентябрь) 2020–2021 гг. на Бакчарском болоте (северо-восточная часть Большого Васюганского болота). Измерение счётной концентрации лёгких ионов производилось двумя приборами Air Ion Counter. Измерения метеорологических величин производилось с помощью портативных приборов (раздел 2.1.1, 2.1.2). Инструментальные наблюдения дополнялись визуальными наблюдениями за облачностью и атмосферными явлениями. В каждой точке наблюдения было выполнено описание его ландшафта.

#### **4.1.1. Проведение измерений атмосферно-электрических величин и отбор проб на болоте, описание лабораторного анализа**

Стационар «Васюганье» является опорным экспедиционным пунктом института и предназначен для обеспечения климатоэкологических инструментальных наблюдений и научных экспериментальных исследований региональных, мезо- и микроклиматических изменений в естественных условиях большой заболоченной территории. Точки измерений были расположены на территории стационара, а

также в лесоболотной зоне (в лесу и на болотном ландшафтном профиле на северо-восточной границе Васюганского болота). 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.

В рамках исследования были проведены подробное ландшафтное описание, а также лабораторный хроматографический анализ образцов, которые были проведены к.б.н. Веретенниковой Е. Э. и были опубликованы в совместной статье (Оглезнева и др., 2022). Ландшафтное описание и технические аспекты условий проведения хроматографического анализа представлены далее.

Стационар (точка 7) расположен в районе д. Полынянка Бакчарского района Томской области. Точки измерений 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 находится на водоразделе малых рек Бакчара и Иксы, которые входят в состав речных систем Чая и Оби. Район водораздела относится к подзоне южной тайги и представляет собой северо-восточную часть крупнейшей системы водно-болотных угодий в мире – Большого Васюганского болота.

С точки зрения ландшафтных условий, территория исследования в точках 5 и 6 представляет собой смешанный лес. Ландшафт в точке измерения 4 также представляет смешанный, но заболоченный лес с березово-сосново растительным сообществом. Поверхность обладает резко выраженным микрорельефом, образованным приствольными повышениями, упавшими стволами, моховыми кочками, корягами, выворотнями. Древостой заболоченного леса двухъярусный. Первый ярус образован сосной обыкновенной и кедром со средней высотой древостоя 15 м. Второй ярус представлен сосной сибирской и березой пушистой, средняя высота древостоя 10 м. Кустарничковый ярус развит слабо. Травяная растительность представлена хвощем лесным, майником двулистным, морошкой, вейником

Лангсдорфа. 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 ряма (точка измерений 3) представляет собой окраину верхового водораздельного массива. Микрорельеф представлен моховыми подушками и приствольными буграми высотой до 50 см. Растительность высокого ряма принадлежит к сосново-кустарничково-сфагновой ассоциации. Древесный ярус состоит из сосны со средней высотой древостоя 18 м. Подрост представлен в основном сосновой и единичными экземплярами кедра и березы высотой 5–10 м. Кустарничковый ярус развит пышно, достигает высоты 50 см. Доминантами являются ба-гульник болотный, кассандра болотная, бруслица и клюква. Доминантами мохового покрова являются сфагновые мхи. Торфяная залежь в высоком ряме имеет мощность не более 1 м.

За высоким ряром по направлению к центру болота ландшафт переходит в форму низкого ряма (точка измерений 2) с сосново-кустарничково-сфагновой ассоциацией. Поверхность низкого ряма 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 сосновой со средней высотой древостоя 2–3 м, кустарничковым ярусом. Травяный ярус развит слабо. Торфяная залежь достигает мощности 3 м.

Осоково-сфагновая топь (точка измерений 1) занимает центральную часть болотного массива. Микрорельеф представлен незначительными микроповышениями высотой до 20 см. В современном растительном покрове преобладают пушкица и осока. Моховой ярус представлен различными видами сфагновых мхов, формирующими микрорельеф. Торфяная залежь здесь достигает мощности 3 м.

Следует отметить существенную разницу в уровне болотных вод (УБВ): на осоково-сфагновой топи он значительно выше, чем на возвышенных участках низкого и высокого ряма, поскольку топь представляет собой наиболее обводнённую зону болота (Инишева, 2009).

Поскольку, используемое оборудование AIC2 имеет ограничение работы (относительная влажность  $\geq 80\%$ ), а изменчивость электрического поля, влияющая на перенос и распределение ионов в ПС минимальна днем, измерения проводились вдоль ландшафтного профиля Бакчарского болота в околополуденные часы и до захода солнца.

Расположение точек наблюдений на территории исследования показано на рис. 4.1, для полного понимания ландшафтных особенностей подстилающей поверхности их положения они показаны на крупномасштабной топографической карте (рис. 4.1 $a$ ) и на спутниковом снимке Landsat (рис. 4.1 $b$ ).

Географические координаты и абсолютная высота точек наблюдений представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1  
Координаты точек наблюдений

Координаты	Точки наблюдений						
	1	2	3	4	5	6	7
Широта, с. ш.	56°58,3'	56°58,4'	56°58,3'	56°58,1'	56°58,0'	56°57,8'	56°56,97'
Долгота, в. д.	82°37,1'	82°36,7'	82°36,2'	82°35,9'	82°34,3'	82°33,2'	82°30,3'
Высота н. у. м., м	115	113	111	111	130	117	114

В пределах болотных ландшафтов измерения проводились на краю дощатых настилов, имеющихся в точках: 1–4; на площадках 5–7 измерения выполнялись непосредственно на подстилающей поверхности. Счётчики аэроионов устанавливались на штативы на высоте 1 м параллельно основному направлению переноса (определялся по анемометру). Измерения концентраций лёгких ионов 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, атмосферные явления (при их наличии). Пример

размещения счётчика аэроионов в ПН на разных болотных ландшафтах показан на рис. 4.2 *a–e*, и в заболоченном лесу рис. 4.2 *г*.

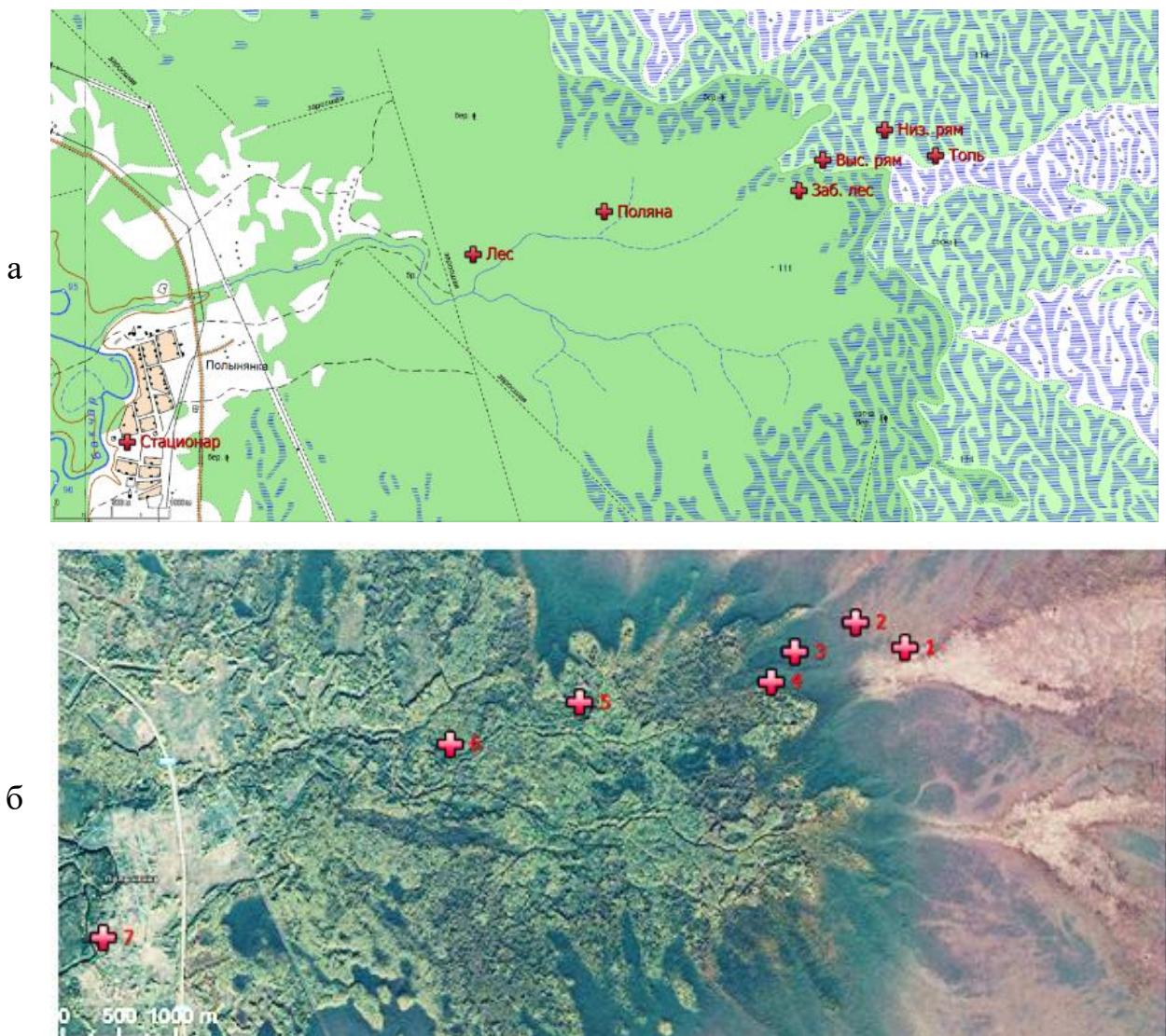


Рисунок 4.1 – Топографическая карта (*а*) и спутниковый снимок Landsat (*б*) мест измерения вдоль ландшафтного профиля Бакчарского болота (составлено автором в среде QGIS)

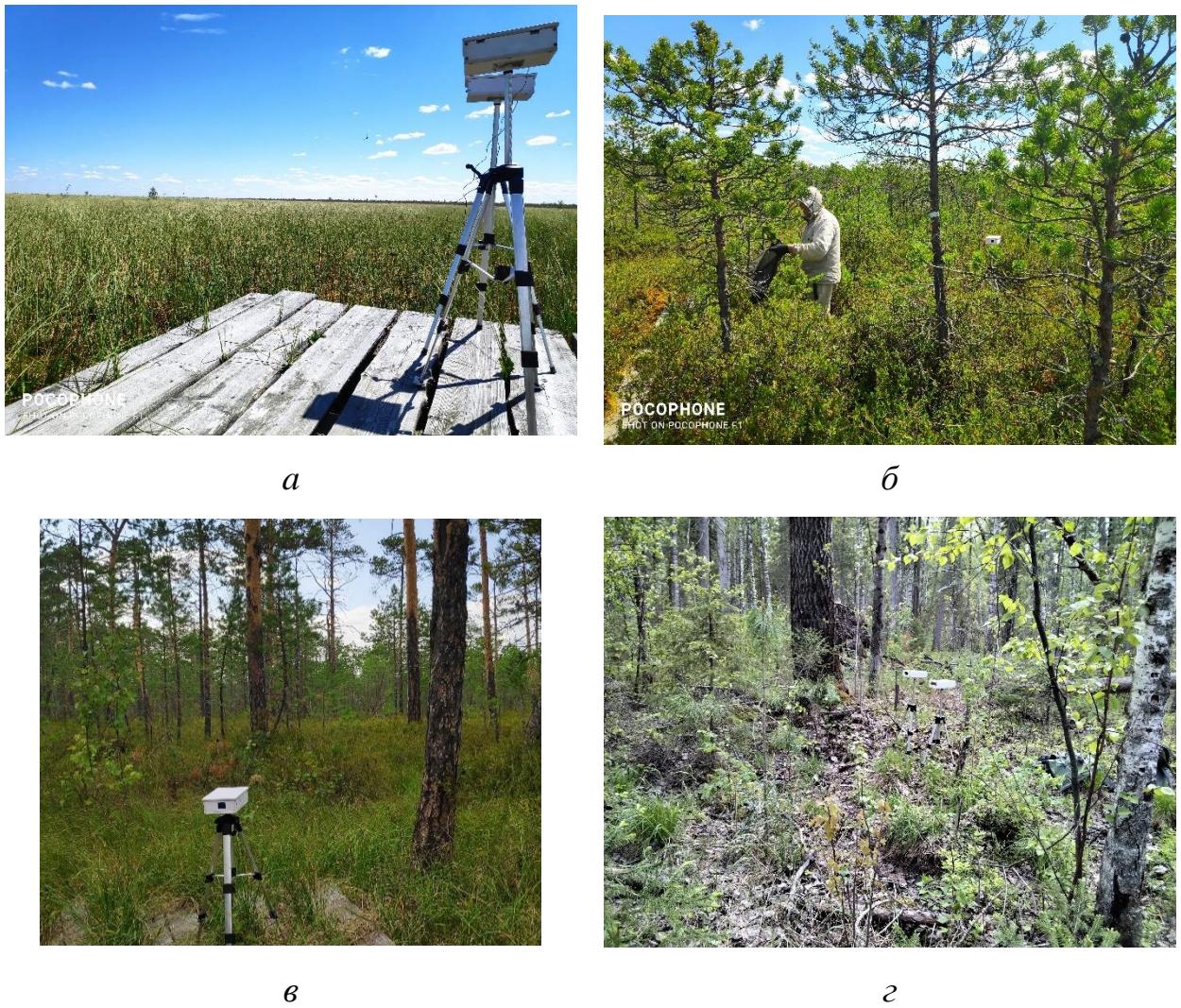


Рисунок 4.2 – Измерения концентрации аэроионов на осоково-сфагновой топи (а), измерительная площадка в низком (б) и высоком ряме (в), и в заболоченном лесу (г) (фото а, б Сат А. А., фото в, г автора, 2020)

Большая скорость выделения и высокая реакционная способность ЛОС, в частности терпенов, обусловливают их сильнейшее влияние на газовый и аэрозольный состав приземной атмосферы в пределах различных лесных сообществ, в том числе и болотных экосистем. Поэтому для косвенной оценки интенсивности выделения ЛОС производился отбор образцов болотной растительности и их лабораторный анализ. Отбор образцов для хроматографического анализа проводился в низком ряме (рис. 4.2. б). 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.

Для отбора проб выбиралась площадка около 2,5 м<sup>2</sup> с достаточно близким расположением сосен, каждое дерево в пределах площадки маркировалось. Срез образцов проводился с деревьев со средней и верхних его частей.

Отобранные лапки сосны в лабораторных условиях мелко 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 [Ткачёв, 2008]. После экстракции масло отделялось, сушилось безводным сульфатом натрия и помещалось в стеклянные хроматографические виалы. Выход эфирного масла рассчитывался в процентах от абсолютной сухой массы, для чего навески сырья высушивали в бюксах в сушильном шкафу при температуре +40 °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 составляет 280°C, объём пробы – 1 мкл, разделение потока – 100:1. Температурный режим колонки: 50°C (2 мин), 50–240°C (4°/мин), 240-280°C (20°/мин), 280°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.

#### 4.1.2. Влияние болотных ландшафтов на изменчивость концентраций лёгких ионов

Ландшафтный профиль расположен вдали от крупных городов и поселков и на нативном олиготрофном болоте, таким образом оно может считаться фоновым природным объектом.

При рассмотрении общей изменчивости, стоит отметить, что медианная концентрация лёгких ионов изменяется в пределах  $750\text{--}850\text{ см}^{-3}$  для положительных и  $200\text{--}700\text{ см}^{-3}$  для отрицательных ионов. На большинстве точек измерений преобладали положительные ионы (табл. 4.2, рис. 4.3). Отмечается, что с уменьшением обводнённости почвы, по направлению от топи к заболоченному лесу, медианные значения концентрации положительных ионов снижаются с  $1000$  до  $750\text{ см}^{-3}$ , а отрицательные, наоборот, возрастают более чем в 3 раза. Также противоположно изменяются значения дисперсии у обоих полярностей ионов (рис. 4.3). При этом практически во всех пунктах наблюдений наблюдалась также очень низкая концентрация ионов – около  $10\text{ см}^{-3}$ , являющаяся нижним пределом чувствительности счётчика.

Иная ситуация наблюдалась на ландшафтах с относительно сухой подстилающей поверхностью (точки измерений 5–7). Концентрации ионов обоих полярностей, как и их дисперсии, возрастают при удалении от болота. При этом измерения на стационаре 7 показали, что концентрация отрицательных аэроионов на селитебной территории в населённом пункте более чем в 3 раза ниже концентрации в лесу. Несмотря на то, что в поселке проживает около 10 жителей, аэрозольная загрязнённость в населенном пункте и у автотрассы выше, чем на болоте (рис. 4.1).

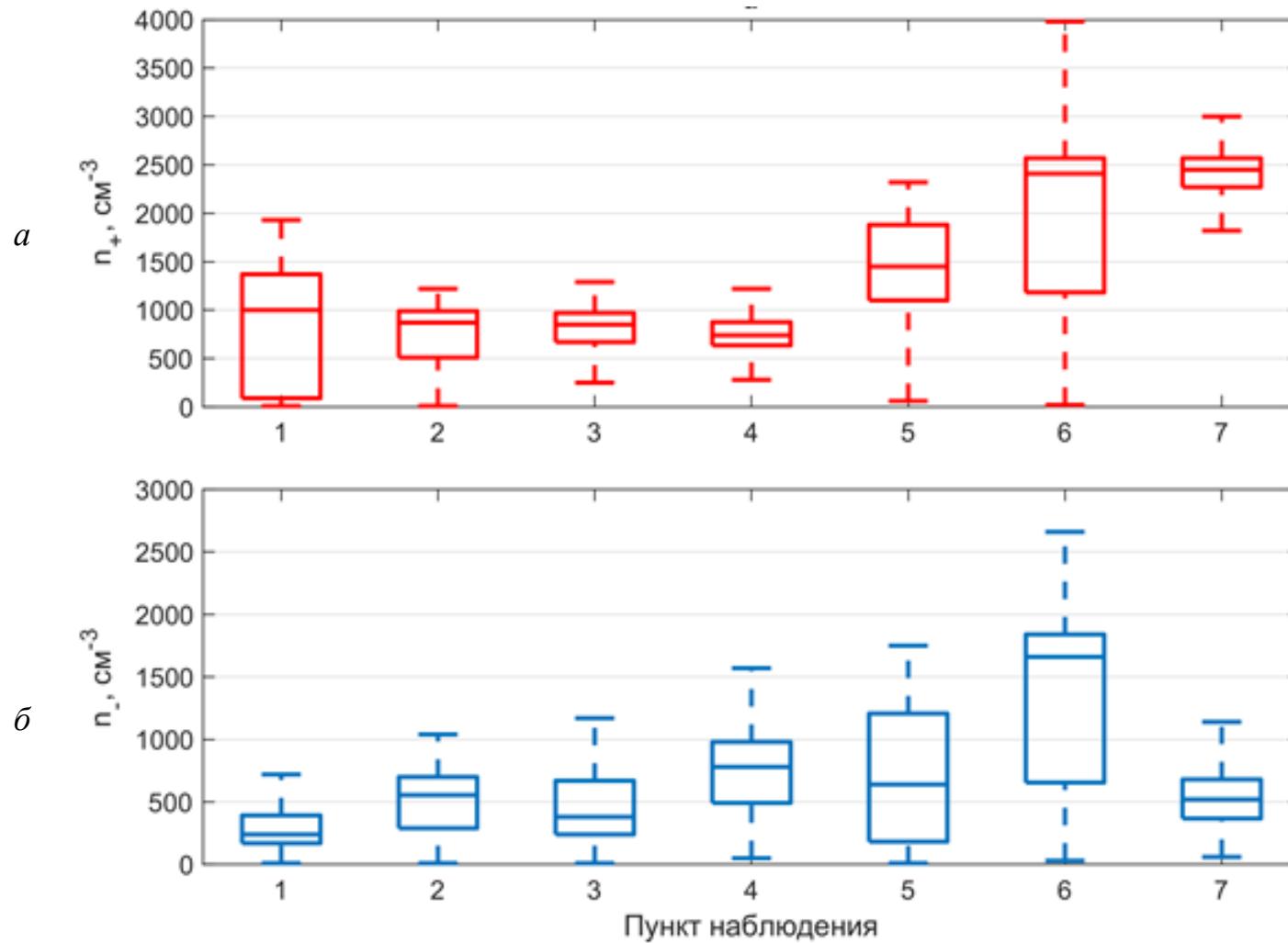


Рисунок 4.3 – Изменчивость содержания положительных (а) и отрицательных (б) лёгких ионов в пунктах наблюдений по данным измерений на ландшафтном профиле Бакчарского болота в 2020—2021 гг. [Оглезнева и др., 2022]

Следует также отметить общую тенденцию к увеличению концентрации всех аэроионов в направлении от болота к лесу, которая хорошо видна на рис. 4.3, что, как будет показано далее, вероятно связана с ЛОС, выделяемыми растительностью, в первую очередь, хвойными деревьями и кустарничками, обильно произрастающим на рямах и в лесу.

Таблица 4.2.

Основные статистические величины изменчивости содержания положительных/отрицательных лёгких ионов ( $\times 10^3$  ионов/см $^3$ ) в точках измерений на ландшафтном профиле Бакчарского болота по данным измерений в 2020—2021 гг.

[Оглезнева и др., 2022]

Статистическая величина	Точки наблюдения						
	1	2	3	4	5	6	7
$M$	0,86/0,33	0,74/0,5	0,74/0,46	0,75/0,72	1,43/0,72	1,97/1,29	2,1/0,53
$ME$	1,0/0,24	0,87/0,55	0,85/0,38	0,74/0,78	1,45/0,64	2,41/1,66	2,45/0,52
$IQR$	1,28/0,22	0,48/0,41	0,3/0,43	0,24/0,49	0,78/1,03	1,39/1,19	0,3/0,31
$P_5$	0,01/0,01	0,01/0,01	0,25/0,01	0,28/0,05	0,06/0,01	0,02/0,3	1,82/0,6
$P_{25}$	0,09/0,17	0,5/0,29	0,67/0,24	0,64/0,49	1,1/0,18	1,18/0,66	2,27/0,37
$P_{75}$	1,37/0,39	0,99/0,7	0,97/0,67	0,88/0,98	1,88/1,21	2,57/1,84	2,57/0,68
$P_{95}$	1,93/0,72	1,22/1,04	1,29/1,17	1,22/1,57	2,32/1,75	3,98/2,66	3,0/1,14

На рисунке 4.4 представлен график зависимости концентрации положительных лёгких ионов от отрицательных, измеренных в различных типах ландшафтов. Данная визуализация демонстрирует существенные различия между болотными (увлажненными) ландшафтами и ландшафтами на минеральном грунте, и позволяют выявить общие закономерности и различия между этими экосистемами.

Визуальный анализ диаграммы рассеяния выявляет четкую кластерную структуру данных. Наблюдаются три основных группы точек:

- I. Плотное скопление в области низких концентраций обоих типов ионов, соответствующие болотным ландшафтам (нативные, переувлажненные территории с высоким УБВ, небольшим, по сравнению с минеральными ландшафтами растительностью);
- II. Высокие положительные и относительно низкие концентрации отрицательных лёгких ионов (стационар, расположенный на территории с минеральным грунтом и низкой антропогенной нагрузкой);
- III. Область высоких концентраций ионов обоих полюрностей (лес с большим видовым разнообразием растительности на минеральном грунте).

Как было показано выше, лёгкие ионы подвержены влиянию различных геофизических и метеорологических факторов. Поэтому при анализе изменчивости ионов необходимо учитывать изменчивость метеорологических величин, изменения фаз вегетационного периода, обводнённости почв (УБВ) и почвенной эмиссии радона. Далее рассмотрим оценки сезонного содержания и изменчивости аэроионов на различных участках ландшафтного профиля Бакчарского болота.

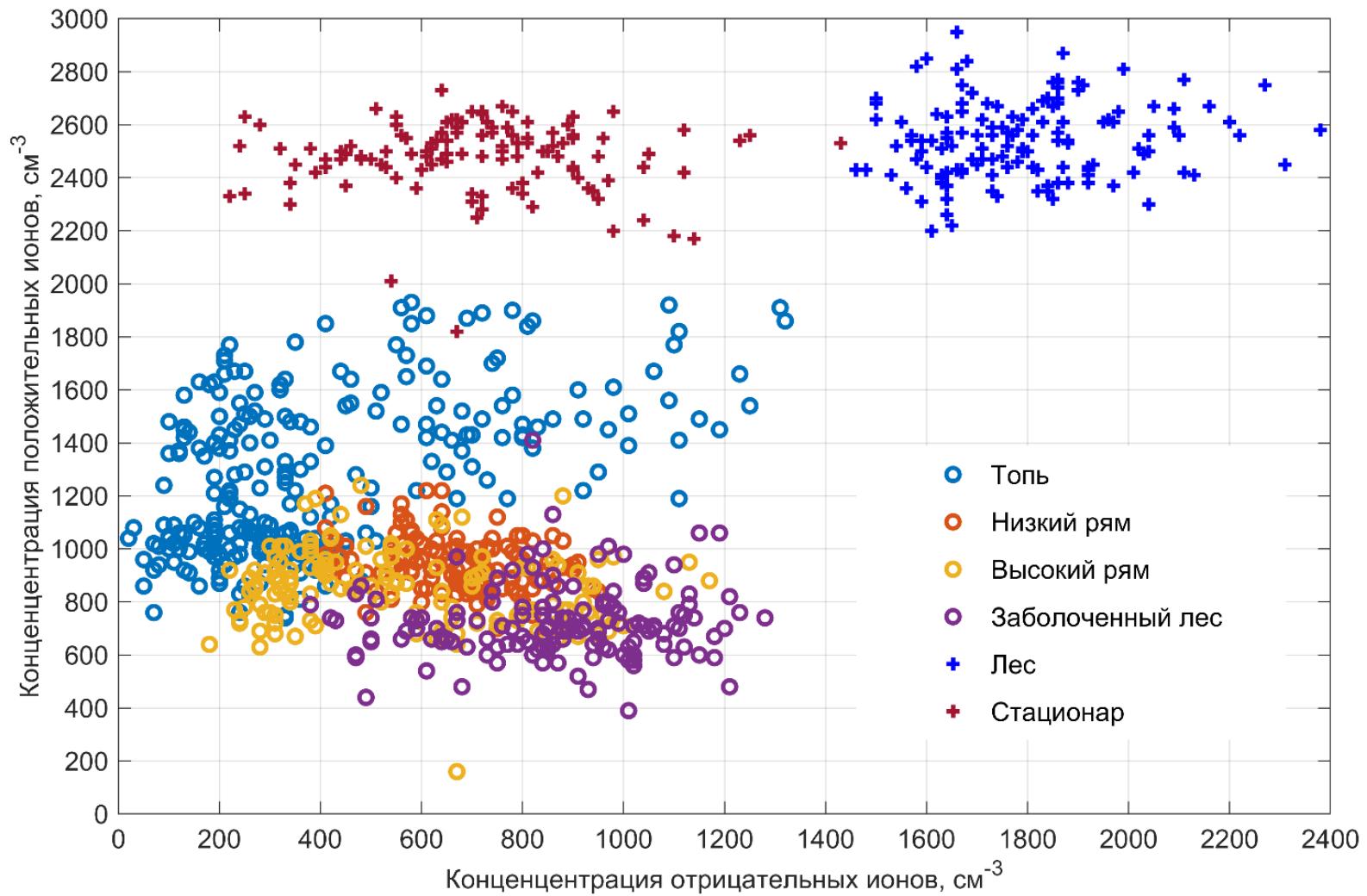


Рисунок 4.4 – Диаграмма рассеяния концентраций положительных и отрицательных лёгких ионов в пунктах наблюдений по данным измерений на ландшафтном профиле Бакчарского болота в 2020–2021 гг.

На рис. 4.5 и 4.6 и в табл. 4.3 приведены обобщённые результаты измерений концентраций положительных и отрицательных ионов, проведённых на разных типах ландшафтов в мае, июне, августе и сентябре 2020–2021 гг.

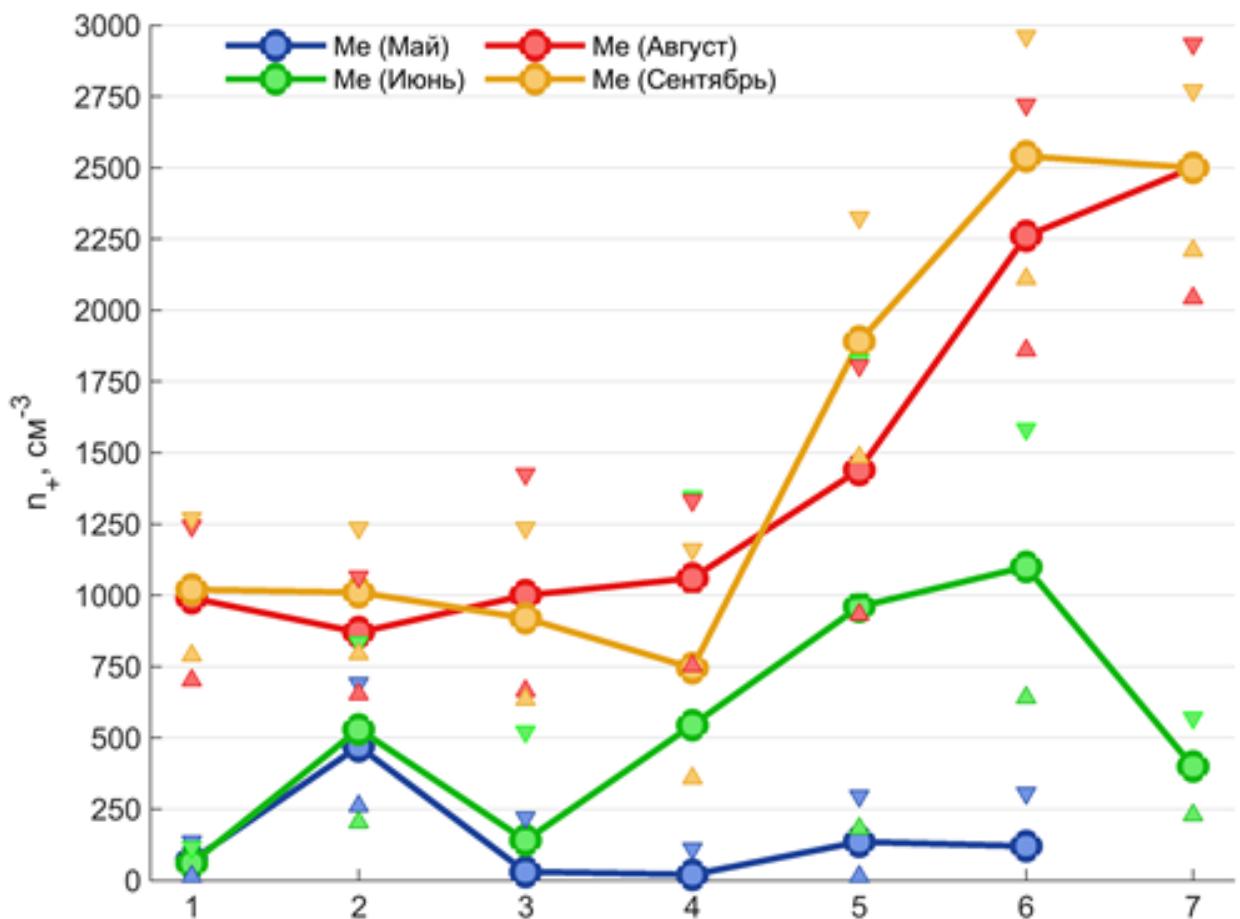


Рис. 4.5. Изменения концентрации положительных аэроионов вдоль ландшафтного профиля по данным измерений в мае—сентябре 2020—2021 гг.: кружки — медианные значения, треугольники — верхняя ( $W_{up}$ ) и нижняя ( $W_{down}$ ) границы доверительного интервала [Оглезнева и др., 2022]

На рис. 4.5 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 обводнённых участках и до  $1000 \text{ см}^{-3}$  на более сухих. В августе и сентябре концентрации значительно возросли – до  $1000 \text{ см}^{-3}$  на болотных ландшафтах и до  $2500 \text{ см}^{-3}$  на поляне и в лесу. В свою

очередь максимальные концентрации положительных аэроионов для августа и сентября в несколько раз выше, чем для тех же точек измерений в мае. Наименьшие концентрации положительных ионов наблюдаются в мае, а отрицательных – в июне.

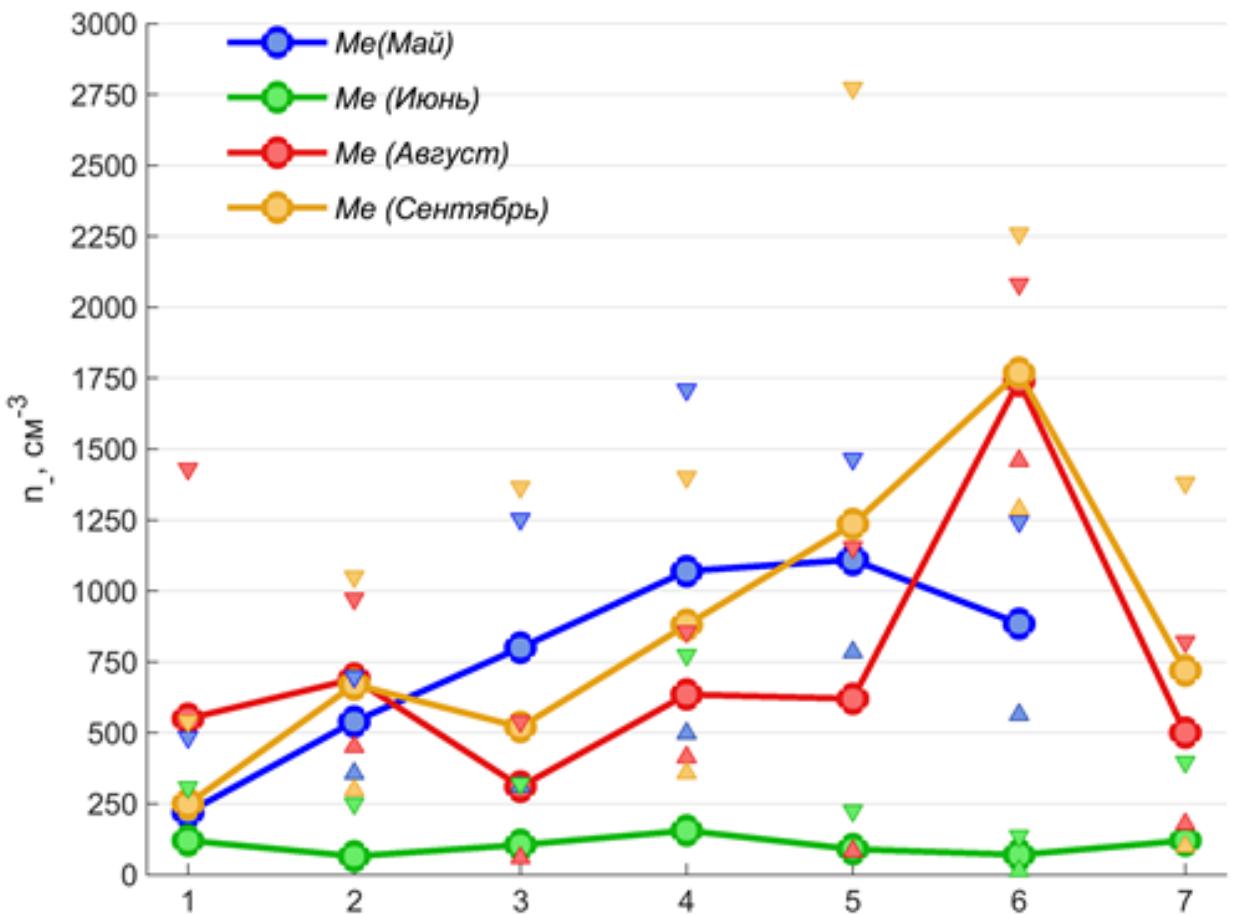


Рис. 4.6. Изменения концентрации отрицательных аэроионов вдоль ландшафтного профиля по данным измерений в мае—сентябре 2020—2021 гг.: кружки — медианные значения, треугольники — верхняя ( $W_{\text{up}}$ ) и нижняя ( $W_{\text{down}}$ ) границы доверительного интервала [Оглезнева и др., 2022]

Доверительные интервалы на рисунках 4.5 и 4.6 определялись по формулам:

$$W_{\text{up}} = P_{75} + 1.5 \times IQR \quad (4.1)$$

$$W_{\text{down}} = P_{25} - 1.5 \times IQR, \quad (4.2)$$

где  $P_{25}$  и  $P_{75}$  – 25- и 75-й процентили,  $IQR$  – межквартильный размах.

Таблица 4.3

Основные статистические характеристики изменчивости содержания положительных/отрицательных лёгких ионов ( $\times 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$ ) в пунктах наблюдений по данным измерений в разные месяцы 2020—2021 гг. [Оглезнева и др., 2022]

Месяц	Стати- чес- кая ве- личина	Пункт наблюдения						
		1	2	3	4	5	6	7
Май	M	0,8/0,24	0,48/0,54	0,07/0,81	0,07/1,08	0,19/1,11	0,18/0,92	нет данных
	Me	0,07/0,22	0,47/0,54	0,03/0,8	0,02/1,07	0,14/1,11	0,12/0,89	
	P <sub>5</sub>	0,04/0,09	0,4/0,44	0,01/0,58	0,01/0,64	0,09/0,93	0,08/0,66	
	P <sub>95</sub>	0,12/0,46	0,61/0,74	0,2/1,09	0,33/1,5	0,46/1,37	0,58/1,29	
Июнь	M	0,06/0,13	0,52/0,12	0,18/0,14	0,58/0,23	0,98/0,12	1,14/0,09	0,4/0,16
	Me	0,06/0,12	0,53/0,07	0,14/0,11	0,55/0,16	0,96/0,09	1,1/0,07	0,4/0,12
	P <sub>5</sub>	0,02/0,04	0,27/0,01	0,04/0,03	0,3/0,06	0,55/0,02	0,79/0,04	0,29/0,08
	P <sub>95</sub>	0,13/0,24	0,7/0,73	0,38/0,44	1,0/0,51	1,35/0,25	1,36/0,15	0,58/0,4
Август	M	0,97/0,56	0,86/0,7	1,03/0,34	1,05/0,65	1,39/0,62	2,27/1,77	2,51/0,51
	Me	0,99/0,55	0,87/0,69	1,0/0,31	1,06/0,64	1,44/0,62	2,26/1,74	2,5/0,5
	P <sub>5</sub>	0,79/0,24	0,75/0,52	0,81/0,21	0,82/0,53	1,08/0,4	1,8/1,55	2,25/0,33
	P <sub>95</sub>	1,11/0,97	0,97/0,88	1,28/0,59	1,27/0,87	1,71/0,85	2,8/2,0	2,94/0,71
Сентябрь	M	1,05/0,25	1,01/0,67	0,93/0,56	0,76/0,87	1,92/1,06	2,54/1,8	2,47/0,73
	Me	1,02/0,25	1,01/0,67	0,92/0,52	0,75/0,88	1,89/1,24	2,54/1,77	2,5/0,72
	P <sub>5</sub>	0,84/0,07	0,87/0,44	0,73/0,26	0,57/0,49	1,7/0,2	2,32/1,54	2,22/0,34
	P <sub>95</sub>	1,45/0,42	1,16/0,89	1,18/0,97	0,98/1,18	2,23/1,63	2,8/2,15	2,65/1,14

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.

#### **4.1.3. Влияние растительности на изменчивость содержания лёгких ионов в вегетационный период**

Для оценки влияния ЛОС на аэроионы в течение мая, июня, августа и сентября 2021 г. были проведены одновременные измерения счётных концентраций аэроионов с помощью двух приборов на двух близкорасположенных участках (удалении друг от друга около 7 м) в низком ряме (точка измерений №2) и отборы образцов растительности (*Pinus sylvestris L.*) на одном из них.

Низкий рям является отличным местом измерений, для исследования влияния растительности на концентрацию ионов. Во-первых, болото является ограничителем основного ионизатора приземного слоя атмосферы — эманаций радиоактивных веществ из почвы (на низком ряме эманации радона из почвы можно принять равными 0, так как между минеральным основанием и подстилающей поверхностью расположен обводненный ~3 м слой торфа, который активно связывает радионуклиды [Яковлев, 2024]). Во-вторых, влияние ГКЛ и фотоионизации на ионизационное состояние ПС можно считать равным для участков несмотря на то, что один из приборов был расположен в условиях более плотного расположения сосен (рис. 4.7). В-третьих, уровень болотных вод хоть и изменяется в течении сезона, но на близкорасположенных участках это разница незначима, а метеорологические условия однотипны — проводились в условиях «хорошей погоды» и в одно и то же

время. Таким образом, можно сделать предположение, что на изменчивость концентрации лёгких ионов на двух участках в один и тот же период измерений будет влиять только растительность, в частности эманации летучих органических соединений.

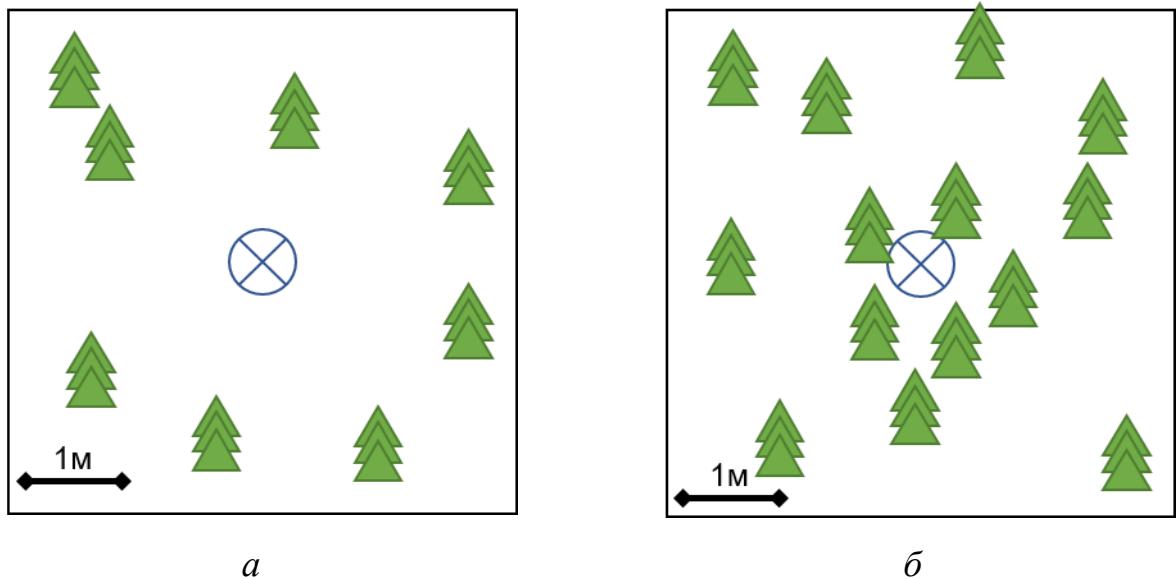


Рисунок 4.7 — Схема установки счетчиков ионов на участке I (а) и участке II (б)

Близкорасположенные участки были выбраны исходя из определения шероховатости подстилающей поверхности (в нашем случае – высота сосен), ниже которого, скорость ветра равна 0, а перемешивание происходит только за счет турбулентных пульсаций. Путь смешения  $I$  [м] над шероховатой поверхностью определялся уравнением [Атмосфера. Справочник...]:

$$I = \chi(z+z_0), \quad (4.3)$$

где  $\chi$  – число Кармана ( $\sim 0,4$ ),  $z_0$  – параметр шероховатости (по лабораторным данным  $z_0 = \varepsilon/30$ , где  $\varepsilon$  – средняя высота неровностей поверхности [м]).

Получим значение пути смешения для низкого ряма: если  $z_0 = 0,1$  м,  $z = 3$  м,  $\chi = 0,4$ , а путь смешения  $I = 1,24$  м. Расстояние между участками в 5,6 раз больше пути смешения для участка с плотным расположением сосен низкого ряма. Таким образом, выбранная дистанция между участками достаточна для адекватной оценки изменчивости концентраций ионов от растительности.

Участок I был относительно открытым, сосны находились на расстоянии нескольких метров от прибора. На участке II измерения проводились в плотном пологе сосен (расстояние до сосен менее 1 м), 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. 4.8 показаны результаты этих измерений.

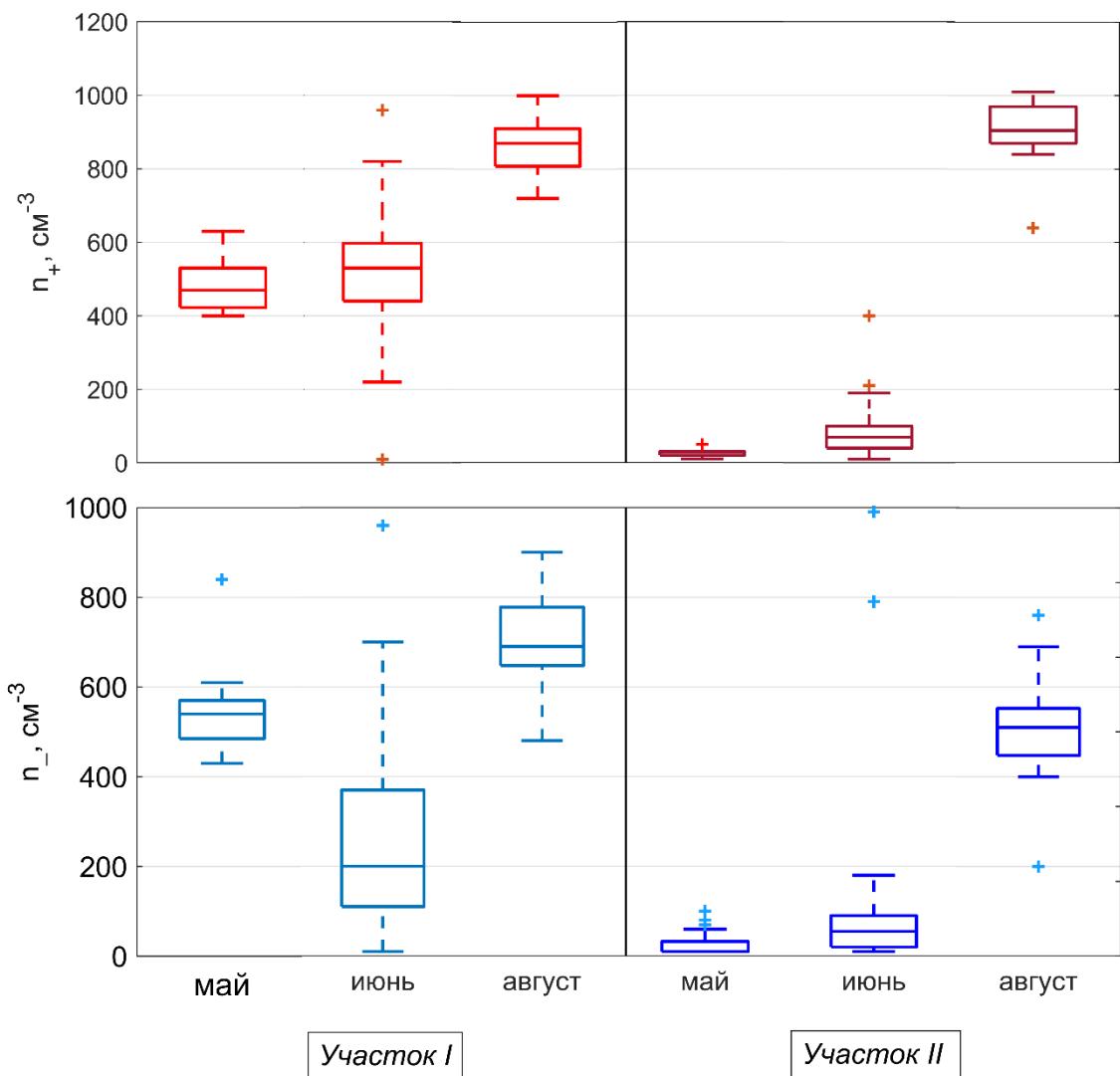


Рисунок 4.8 – Изменение концентраций положительных (а) и отрицательных (б) аэроионов на двух близко расположенных участках в пределах низкого ряма по данным измерений в мае, июне и августе 2021 г.

Как видно, на участке I концентрации положительных и отрицательных ионов в мае более чем в 5 раз выше, чем на участке II. В июне наблюдается схожая

картина, но разница между концентрациями ионов на двух участках уменьшается. Кроме того, в июне отмечается более сильный разброс значений концентраций ионов обоих полярностей на участке I. В августе концентрации ионов обоих полярностей ещё более возрастают и выравниваются на обоих участках. Для качественной оценки влияния растений были привлечены данные хроматографии, показавшие следующие результаты.

Из отобранных образцов лапок сосны по описанной выше методике была проведена экстракция эфирного масла и проведён его хроматографический анализ. Один из результатов анализа в виде хроматограммы эфирного масла, извлеченного из образцов июньской сосны, показан на рис. 4.9. 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).

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. 4.4). Во все месяцы  $\alpha$ -пинен является доминирующим веществом, в минимальном количестве содержатся сабинен,  $\gamma$ -терпинен и борнилакетат.

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, 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 трициклены и борнилакетата в ходе вегетации убывает. Изменения концентраций остальных монотерпенов незначительны на протяжении всего сезона, которые колеблются около среднего для каждого компонента значения.

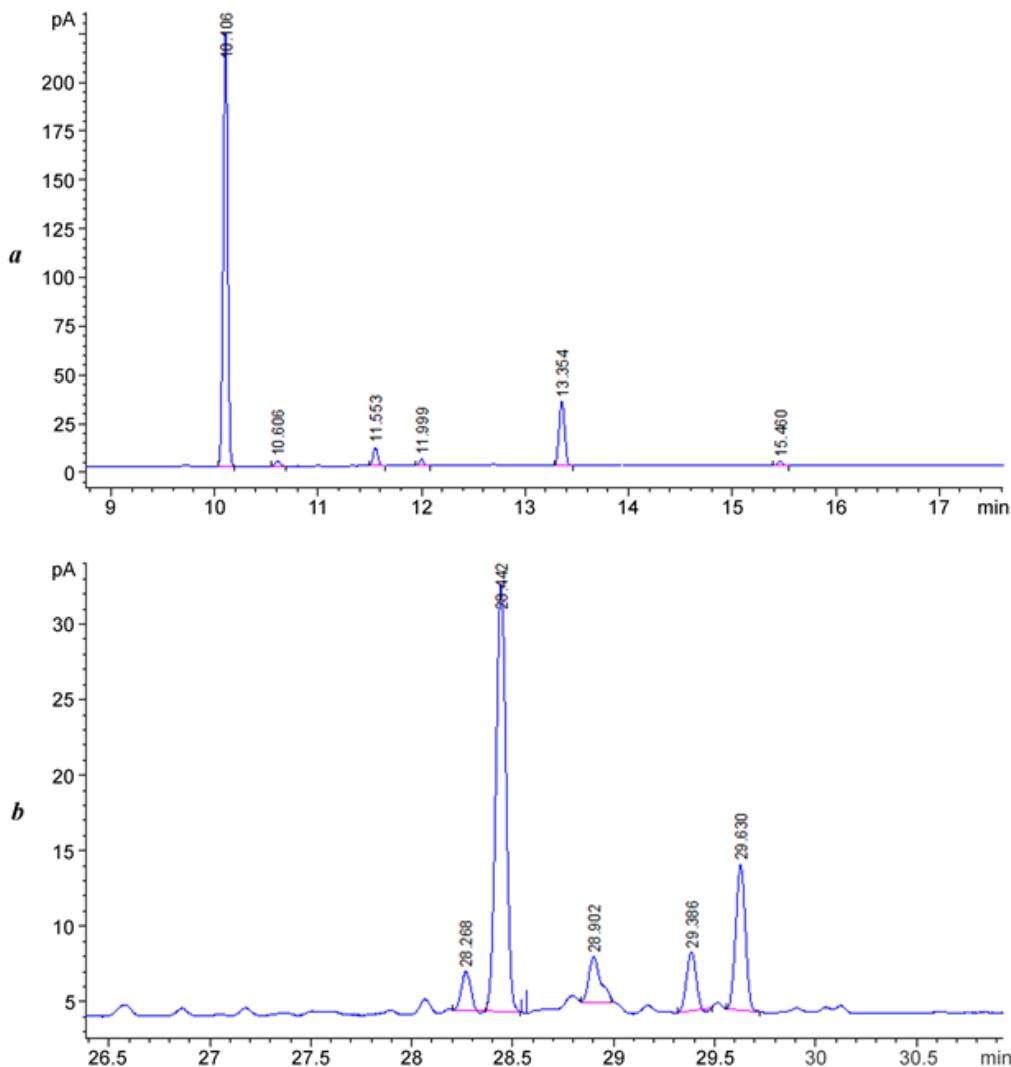


Рисунок 4.9 — Хроматограмма, показывающая наличие основных компонентов эфирного масла в образцах сосны (*Pinus sylvestris* L.), отобранных в низком ряде в июне 2021 г. [Оглезнева и др., 2022]

Ландшафты и экосистемы в точках измерений отличаются произрастающей здесь растительностью. Как было сказано выше, в растительном покрове низкого ряма преобладает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – один из основных источников выделения в атмосферу ЛОС, которые, в свою очередь, в ходе фотохимических реакций и горения могут приводить к образованию мелкодисперсного аэрозоля, или выступать в качестве молекулярных кластеров [Alessio et al, 2004; Fuentes et al, 1999]. Полученные в исследовании результаты хорошо согласуются с резуль-

татами других исследований, где вклад  $\alpha$ -пинена в образование ионов и дальнейший рост аэрозольных частиц [Исидоров, 1994; Kirkby et al., 2016;]. В последующем эти частицы и кластеры могут быть как стоком для лёгких ионов и, в зависимости от их размера и способны формировать средние и тяжёлые ионы, так и превращаться в окисленные производные и выпадать с осадками [Satsumabayashi et al., 2001].

Таблица 4.4.

Временные изменения содержания основных компонентов эфирного масла в образцах сосны (*Pinus sylvestris L.*), отобранных в низком ряме в 2021 г., % [Оглезнева и др., 2022]

Компонент	Июнь	Август	Сентябрь
Трициклен	—	0,96	11,00
$\alpha$ -пинен	41,60	37,50	28,10
Камфен	2,85	3,94	3,53
Сабинен	—	0,50	—
$\beta$ -пинен	1,60	2,97	2,35
$\beta$ -мирцен	5,54	1,83	1,68
$\Delta$ -3-карен	—	12,30	9,77
Лимонен+ $\beta$ -фелландрен	6,53	3,84	4,85
$\gamma$ -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
<i>Примечание: «—» компонент не обнаружен</i>			

Одной из возможных причин наблюдаемого различия между концентрациями аэроионов, зарегистрированных в начале и конце вегетационного периода (рис. 4.4 и 4.5), а также на двух участках на низком ряме (рис. 4.6), является различная интенсивность взаимодействия аэроионов и ЛОС, в частности терпенов. Концентрация ЛОС в воздухе зависит от интенсивности эманации терпенов из рас-

тений, в частности из сосновой хвои, имеющей выраженную сезонную изменчивость, и количества хвойных на разных ландшафтных участках с различной площадью и плотностью покрытия территории.

На основе проведённых измерений получены оценки пространственно-временной изменчивости концентрации аэроионов в различных лесных и болотных ландшафтах. Отмечено, что с увеличением заболоченности наблюдается снижение концентрации лёгких ионов. 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 ряме, показали прямую зависимость содержания летучих органических соединений, входящих в состав биомассы сосны, от фазы вегетационного периода. Это позволило ещё раз подтвердить гипотезу о наличии взаимосвязи ионов с летучими органическими соединениями.

#### **4.2. Исследование особенностей изменчивости концентрации лёгких ионов в типичных геометрических формах горных ландшафтов**

Изменчивость атмосферно-электрических величин в электрически невозмущённых атмосферных условиях (условия «хорошей погоды») в Сибири на сегодняшний день изучена недостаточно. Особенно это касается Южной Сибири, которая имеет сложный рельеф и включает в себя различные природные зоны и типы ландшафтов. Для оценки особенностей изменчивости концентрации лёгких ионов в горных ландшафтах были проведены экспедиционные измерения в Южной Сибири.

##### *Методика измерений*

Измерения проводились в пяти местах наблюдений (см. главу 2) на различной высоте над уровнем моря и в разных ландшафтных зонах.

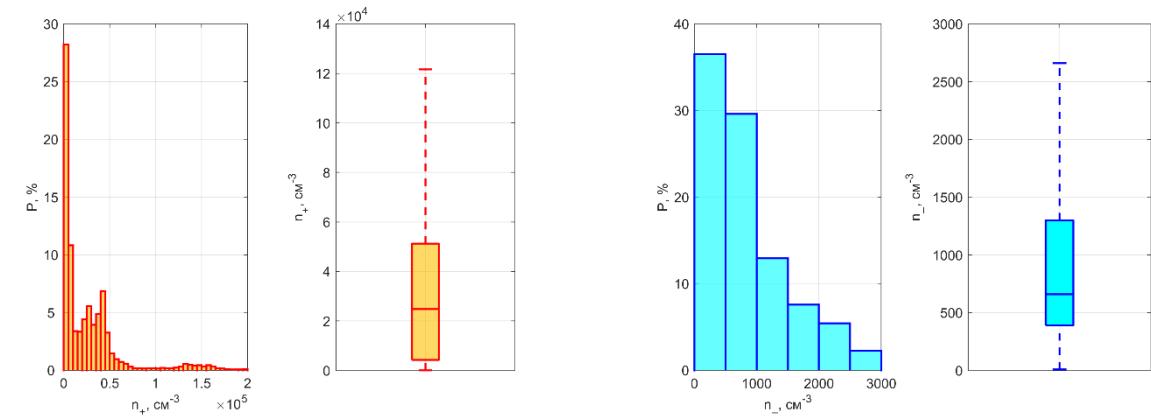
Для проведения измерений на каждом из наблюдательных пунктов были выбраны открытые однородные участки с характерным для данной местности ландшафтом, не подверженные антропогенному воздействию.

На каждом из участков были проведены измерения основных атмосферных электрических и метеорологических величин, содержания аэрозолей и гамма-излучения в условиях электрически невозмущённой атмосферы. Кроме того, была проведена видеозапись состояния неба и измерения солнечной радиации в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. Наблюдения на каждом участке длились от 4 до 7 дней. В целом полученные оценки можно считать репрезентативными для этих территорий и сезона года.

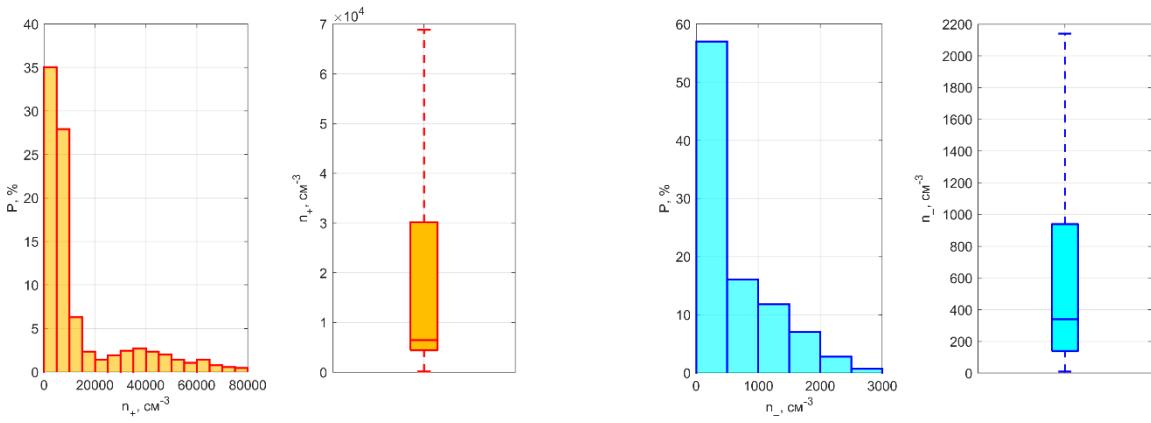
Обработка данных измерений включала выборку данных и статистический анализ. Для интерпретации изменчивости и корреляции исследуемых величин в разных местах наблюдений данные измерений были синхронизированы. Затем были рассчитаны среднечасовые значения за несколько дней. С помощью этих данных была проведена статистическая обработка.

#### *Оценки изменчивости концентрации лёгких ионов*

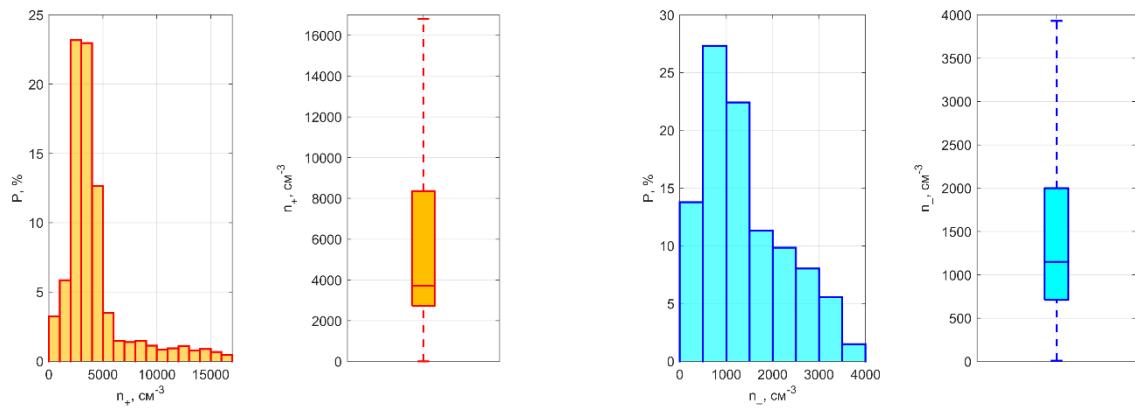
Изменчивость концентрации положительных ионов в КН-KST характеризуется следующими статистическими величинами: среднее арифметическое –  $180 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $430 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $25 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –  $1,7 \div 1400 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $4,3 \div 51 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Изменчивость концентрации отрицательных ионов в этом пункте описывается следующими характеристиками: среднее арифметическое –  $1,0 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $0,9 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $0,7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –  $0,2 \div 3,1 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $0,4 \div 1,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  (рис. 4.8a).



а



б



в

Рисунок 4.8 – Гистограмма распределения (слева) и диаграмма размаха (справа) для значений концентрации положительных и отрицательных аэроионов, в условиях «хорошей погоды» в KH-KST (а), TU-MTM (б), TU-ShT (в); BU-MoD (г); BU-TuD (д)

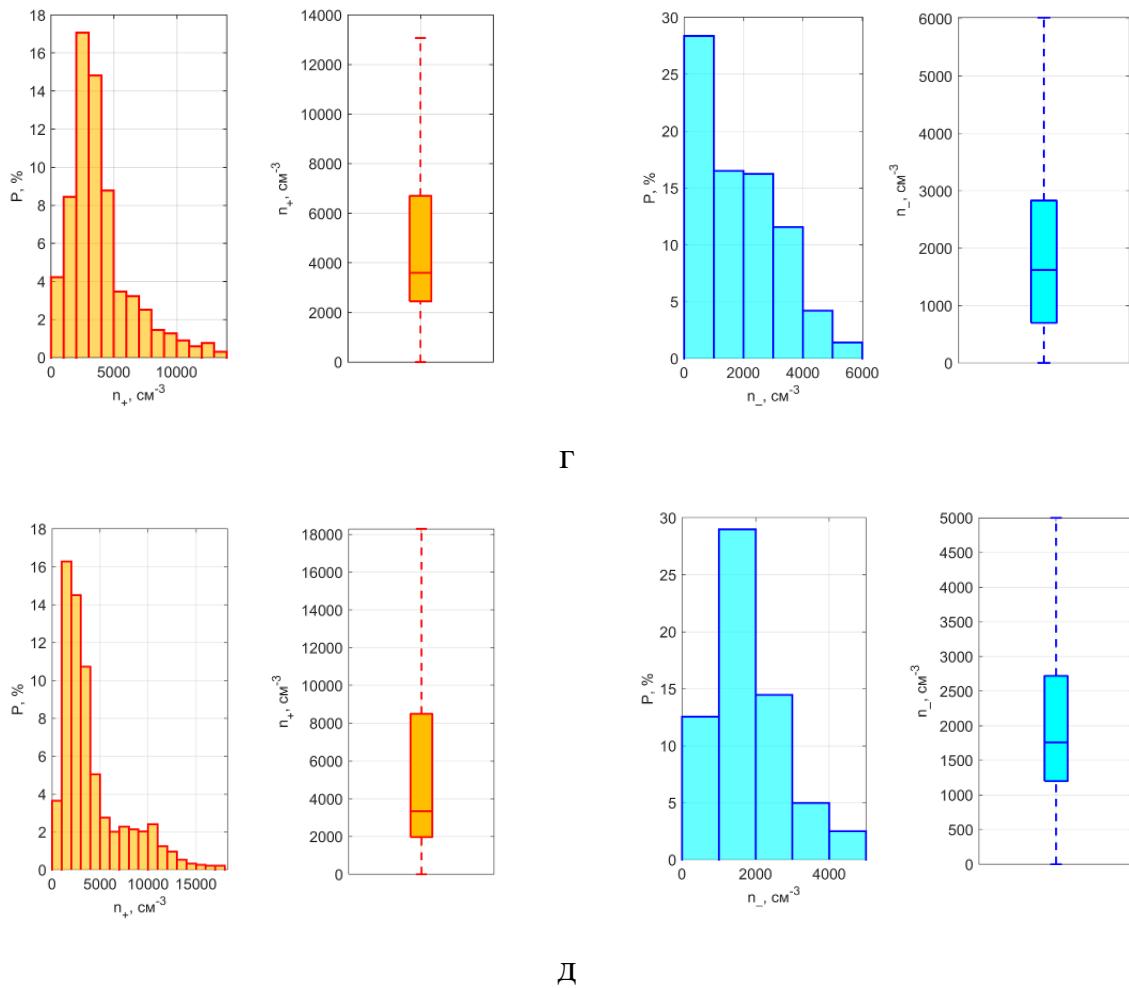


Рисунок 4.8 (продолжение)

Для изменчивости концентрации положительных ионов в TU-MTM характерны следующие статистические величины: среднее арифметическое –  $35 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $78 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $6,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –  $3,0 \div 200 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $4,4 \div 30 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Изменчивость концентрации отрицательных ионов в TU-MTM описывается следующими характеристиками: среднее арифметическое –  $0,6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $0,6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $0,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –  $0,04 \div 1,9 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $0,1 \div 0,9 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  (рис. 4.8б). Для изменчивости концентрации положительных ионов в TU-ShT характерны следующие статистические величины: среднее арифметическое –  $23 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $66 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $3,7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –

$1,4 \div 110 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $2,7 \div 8,4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Изменчивость концентрации отрицательных ионов в этом пункте описывается следующими характеристиками: среднее арифметическое –  $1,4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $4,6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $1,2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –  $0,3 \div 3,1 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $0,7 \div 2,0 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  (рис. 4.8в).

Основные статистические характеристики изменчивости концентрации положительных ионов в BU-MoD следующие: среднее арифметическое –  $13 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $34 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $3,6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –  $0,9 \div 62 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $2,5 \div 6,7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Изменчивость концентрации отрицательных ионов в этом пункте описывается следующими характеристиками: среднее арифметическое –  $1,9 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $1,4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $1,6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –  $0,2 \div 4,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $0,7 \div 2,8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  (рис. 4.8г).

Для изменчивости концентрации положительных ионов в BU-TuD характерны следующие статистические характеристики: среднее арифметическое –  $19 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $61 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $3,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –  $1,0 \div 120 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $2,0 \div 8,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Изменчивость концентрации отрицательных ионов в этом пункте описывается следующими характеристиками: среднее арифметическое –  $5,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , СКО –  $37 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , медиана –  $1,8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , полный диапазон изменчивости –  $0,4 \div 9,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , типичный диапазон изменчивости –  $1,2 \div 2,7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  (рис. 4.8д).

В большинстве исследованных территорий наблюдается преобладание концентрации положительных лёгких ионов над отрицательными. При этом во всех случаях распределение в целом описывается степенной функцией и имеет «тяжелый хвост».

В условиях хорошей погоды рельеф местности может становиться доминирующим фактором, формирующим пространственную изменчивость электрических характеристик приземного слоя атмосферы. Выпуклые формы (холмы, вершины) концентрируют силовые линии электрического поля и генерируют потоки лёгких ионов за счет усиленной солнечной и почвенной ионизации. Вогнутые

формы (долины, котловины), напротив, служат аккумуляторами электрического пространственного заряда, где в условиях застойного воздуха и инверсий накапливаются тяжелые ионы и заряженные аэрозоли. Это может приводить к формированию стабильных локальных аномалий — зон повышенного потенциала на возвышенностях и областей с экранированным полем в понижениях, что делает обязательным учёт рельефа для корректных измерений и интерпретации электрических параметров атмосферы в ясную, малооблачную погоду.

Для примера, рассмотрим суточный цикл концентраций лёгких ионов на территории юга Сибири (рис 4.9). В целом, полученные результаты совпадают с результатами аналогичных исследований, проведённых в других регионах [Hõrrak et al., 2008; Vana et al., 2008]. Минимальные концентрации лёгких ионов, наблюдаются в течение дня, и повышенные концентрации вечером с максимумом ночью можно объяснить суточной изменчивостью концентрации радона и турбулентным перемешиванием в течение дня.

Стоит сразу оговориться, что полученные графики суточной изменчивости концентрации ионов были построены по отобранным значениям относительной влажности и температуре воздуха, а также градиенту потенциала электрического поля и соответствовали условиям «хорошей погоды» и техническим условиям работоспособности приборов (AIC 2). Однако для концентрации положительных ионов в утренние часы были зарегистрированы аномально высокие значения, чего не прослеживается для отрицательных ионов. Поэтому в анализ они не были включены, далее будем рассматривать только дневные и вечерние значения концентраций ионов.

Наибольшие дневные медианные значения  $n_+$  ( $4,3 \cdot 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$ ) были отмечены в горных положительных формах рельефа (склоны, возвышенности, хребты) и с уменьшением высоты,  $n_+$  снижается до  $2,1 \cdot 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$  в протяженных котловинах и до  $1,4 \cdot 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$  в долине горной реки. Для концентрации отрицательных лёгких ионов наблюдается обратная зависимость — на склоне гор медианная концентрация  $n_-$  около  $0,5 \cdot 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$ , в котловине —  $0,8 \cdot 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$ , а в долине  $\sim 2,0 \cdot 10^3$  ионов/ $\text{см}^3$ .

Амплитуда суточного хода максимальна в горах и минимальна в котловинах, где процессы перемешивания и накопления сглаживают разницу между днем и ночью. Форма кривой радикально отличается. В горах — это классический однопиковый ход, повторяющий ход солнечной радиации с минимумом днем и максимумов в вечернее и ночное время. В котловинах — сложная, двухпиковая форма с возможным ночным максимумом, управляемая динамикой приземного слоя. В узкой долине более сглаженный ход, но со сдвинутым ближе к полудню утренним максимумом для отрицательных ионов, причем этот максимум соответствует не периоду восхода Солнца, а солнечному терминатору. В узкой долине терминатор солнца создает очень четкую и быстро движущуюся границу свет-тень на дне котловины, в отличие от более плавного и растянутого перехода в сумеречной зоне на открытой плоской местности. Создавая горно-долинную циркуляцию. Классический электродный эффект работает в предположении однородного, вертикального и постоянного во времени электрического поля над плоской, однородной поверхностью. В узкой долине поле неоднородно и без четкой вертикальной составляющей по некоторым причинам [Тверской, 1949].

- Силовые линии огибают вогнутую форму рельефа, сгущаясь на гребнях и разрежаясь на дне.
- На склонах долины поле имеет значительную горизонтальную составляющую.
- Это приводит к боковому дрейфу ионов вдоль склонов, а не только к их вертикальному разделению. Ионы, рожденные на склоне, могут уноситься вглубь долины или к её центру, а не строго вверх, нарушая формирование положительного заряда.

Даже слабые долинно-склоновые бризы (ночной сток холодного воздуха со склонов, дневной подъем) эффективно перемешивают и переносят ионы, не давая им установиться в равновесное состояние. Таким образом, классическое преобладание положительного заряда будет нарушено. Кроме того, в долинах протекают

горные реки, с высокой скоростью течения, порогами, и могут способствовать генерации отрицательного заряда и приводить к преобладанию отрицательного заряда в приземном слое.

Таким образом, суточный ход для разных пунктов, наглядно подтверждает гипотезу о том, что горный ландшафт может являться главным модулятором ионизационного состояния приземного слоя атмосферы, определяя не только абсолютный уровень концентраций, но и фазу, амплитуду и саму форму суточной динамики.

Полученные количественные оценки изменчивости концентраций лёгких ионов в приземном слое в электрически невозмущённых атмосферных условиях «хорошей погоды» по данным экспедиционных измерений, проведённых на территории Южной Сибири в летние месяцы 2020—2023 гг. показал следующее.

При увеличении абсолютной высоты средние медианные значения концентраций положительных лёгких ионов в общем увеличиваются, отрицательных — снижаются. Однако значительное влияние на их значения и изменчивость могут оказывать орографические и ландшафтные особенности территории в месте наблюдения.

Изменчивость атмосферно-электрических величин в электрически невозмущённых атмосферных условиях (в ясную погоду) в Сибири на сегодняшний день изучена недостаточно. Особенно это касается Южной Сибири, которая имеет сложный рельеф и включает в себя различные природные зоны и типы ландшафтов. Для этого при проведении экспедиционных измерений были выбраны открытые однородные участки с характерным для данной местности ландшафтом, не подверженные антропогенному воздействию, и получены оценки средних значений и изменчивости атмосферно-электрических величин (рис. 1).

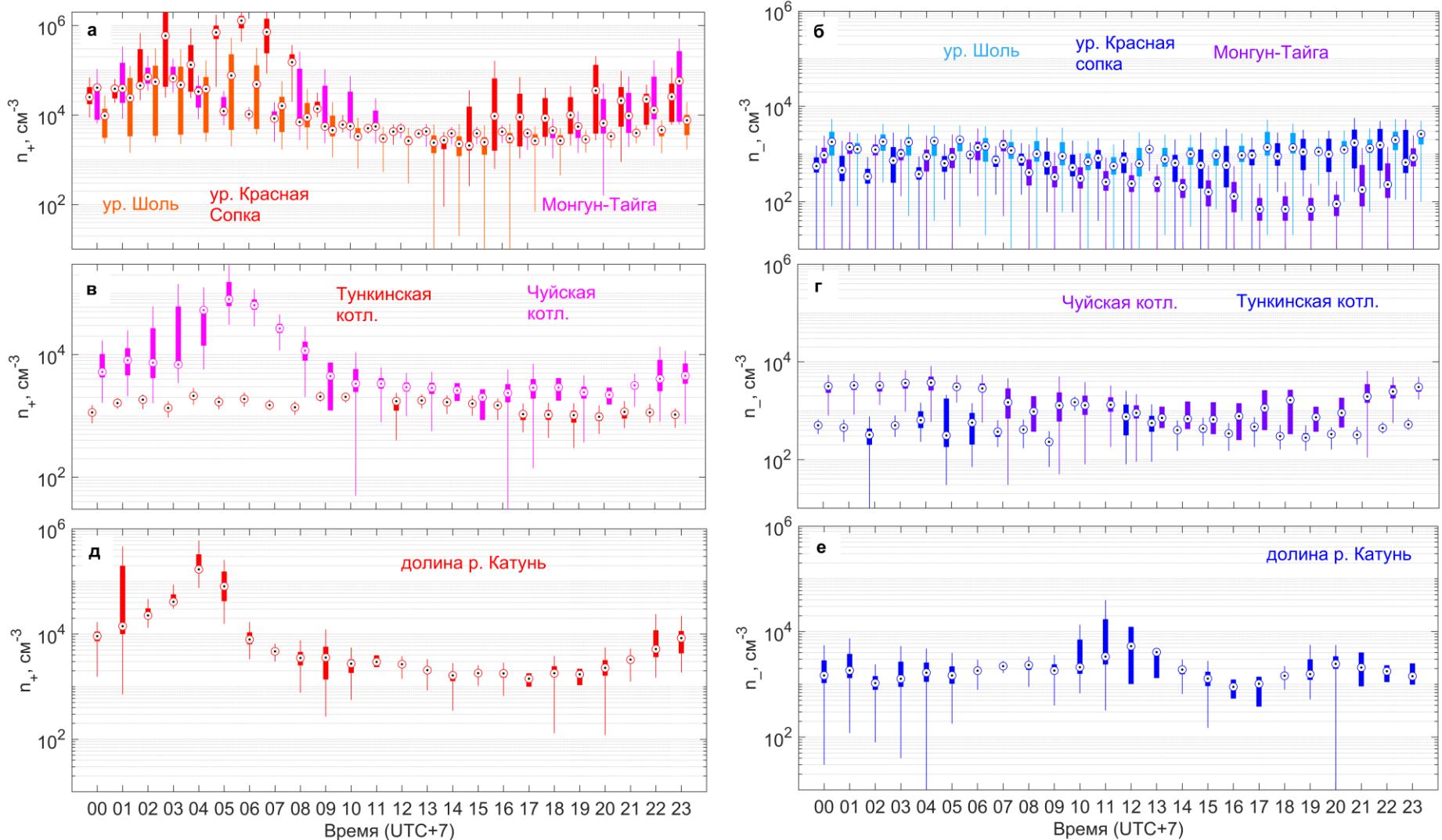


Рисунок 4.9 – Суточная изменчивость среднечасовых значений концентрации ионов за весь период измерений в условиях «хорошей погоды» в пунктах наблюдений, горные склоны, возвышенности, хребты (а, б), протяженные горные котловины (в, г), узкое горное ущелье (д, е).

В целом рельеф исследуемых территорий можно аппроксимировать простыми геометрическими формами — парабола (горный склон, сопка — рис. 4.10 $a$ ; горная речная долина — рис. 4.10 $b$ ); трапеция (высокогорная котловина — рис. 4.10 $c$ ). В первом случае, важным условием является превышение высоты склона (несколько км), над поперечным сечением (десятки, сотни м), во втором, наоборот, горизонтальная протяженность (десятки, сотни км) котловины над хребтами (1,5—2 км).

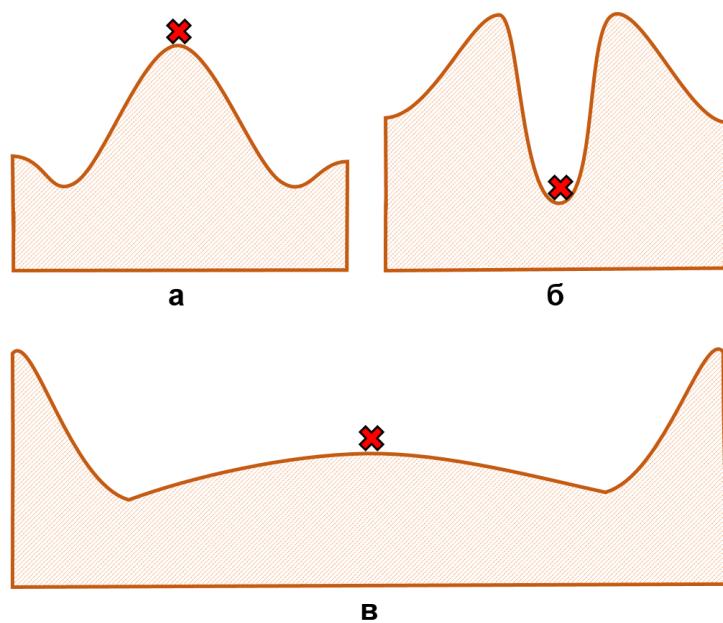


Рисунок 4.10 – Аппроксимация рельефа исследуемых горных территорий простейшими геометрическими формами: хребет ( $a$ ), долина реки ( $б$ ), высоко-горная котловина ( $в$ ). Крестиком обозначено месторасположение оборудования относительно рельефа местности

### 4.3. Выводы по главе

На основании экспедиционных измерений по оценке влияния типичных физико-географических условий и ландшафтов на электрофизическое состояние приземного слоя атмосферы на территории юга Западной Сибири были получены следующие основные результаты.

1. При рассмотрении общей изменчивости медианная концентрация лёгких ионов изменится в пределах  $750—850 \text{ см}^{-3}$  для положительных и  $200—700 \text{ см}^{-3}$  для отрицательных ионов; на большинстве точек измерений преобладали положительные ионы; с уменьшением обводнённости почвы медианные значения концентрации положительных ионов снижаются с 1000 до  $750 \text{ см}^{-3}$ , а отрицательные возрастают более чем в 3 раза.
2. Для ландшафтов с относительно сухой подстилающей поверхностью концентрации ионов обоих поллярностей, как и их дисперсии, возрастают при удалении от болота.
3. Установлена общая тенденция к увеличению концентрации всех аэроионов в направлении от болота к лесу, которая, вероятно связана с ЛОС, выделяемыми растительностью.
4. Существенные различия между болотными (увлажненными) ландшафтами и ландшафтами на минеральном грунте позволили выявить кластерную структуру данных. Наблюдаются три основных группы точек: а) плотное скопление в области низких концентраций обоих типов ионов, соответствующие болотным ландшафтам; б) высокие положительные и относительно низкие концентрации отрицательных лёгких ионов; в) область высоких концентраций ионов обоих поллярностей. Существует статистически значимое различие исследуемых экосистем по величине концентрации лёгких ионов, что отражает различия в физико-химических процессах, происходящих в различных типах природных сред.
5. В Южной Сибири в условиях «хорошей погоды» концентрации лёгких ионов демонстрируют значительную пространственную изменчивость, которая сильно зависит от абсолютной высоты местности, орографических особенностей (хребет, долина, котловина) и геометрического типа ландшафта.
6. В узкой речной горной долине концентрация отрицательных (около  $3500 \text{ см}^{-3}$ ) ионов была выше положительной ( $2100 \text{ см}^{-3}$ ) в течении всего периода измерений. В других типах – на склонах хребтов, равнинах или в широких горных котловинах концентрация положительных ионов всегда была выше отрицательных.

7. Несмотря на различия в абсолютных значениях, во всех исследованных пунктах наблюдений наблюдается схожий суточный ход концентраций ионов с минимумом днем (10:00—19:00) и максимумом ночью, что в первую очередь обусловлено суточной динамикой турбулентного перемешивания и выделения радона из почвы.

8. На электрическое состояние приземного слоя существенное влияние оказывают локальные атмосферные процессы, такие как бризовая циркуляция у озер и горно-долинные ветры, которые могут приводить к адвекции воздушных масс с различными свойствами (например, «чистого» воздуха с водной поверхности) и значительным изменениям концентраций ионов.

9. Выпуклые формы рельефа (хребты, вершины), выступая активными источниками лёгких ионов, демонстрируют повышенные концентрации положительных ионов днём, тогда как вогнутые формы (долины, котловины) служат аккумуляторами, где ночью накапливается положительный заряд, а в долинах рек отмечается аномально высокая концентрация отрицательных ионов.

10. Орография влияет динамику суточного хода концентрации лёгких ионов, амплитуду и форму кривых. В горах наблюдается классический однопиковый ход, в котловинах — сложная двухпиковая форма, а в узких долинах — сглаженный ход со сдвинутым максимумом, связанным с эффектами горно-долинной циркуляции и местными источниками ионизации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем.

Резкий («взрывной») рост отрицательной электропроводности ( $\lambda_-$ ) является специфической реакцией на прохождение фронтальных ливней (95 % случаев), в то время как внутримассовые осадки такого эффекта не вызывают. Это прямо указывает, что ионизационные процессы в атмосфере критически зависят от синоптического происхождения осадков.

«Взрывной» рост  $\lambda_-$  однозначно коррелирует с микрофизическими характеристиками ливней: он наблюдается при выпадении осадков, содержащих крупные капли диаметром более 4 мм, и интенсивностью выше 5–10 мм/ч.

Водопады действуют как интенсивные непрерывные генераторы лёгких ионов, причем продукцируют они в основном отрицательные ионы. В непосредственной близости от них создаются концентрации ( $n_-$ ), в 10–28 раз превышающие фоновые значения, и формируется устойчивый дисбаланс с значительным преобладанием отрицательных ионов над положительными.

Пространственное распределение лёгких ионов, генерируемых водопадами, имеет четкую структуру: концентрация отрицательных ионов статистически значимо снижается с увеличением расстояния вдоль русла реки ( $R^2 = 0.56—0.58$ ), в то время для положительных ионов такая зависимость не выражена. Это распределение определяется топографией (высотой водопада, геометрией русла) и направлением воздушного потока.

В условиях «хорошей погоды» концентрации лёгких ионов демонстрируют выраженную ландшафтную специализацию. Установлено статистически значимое кластерное разделение экосистем: увлажненные (болотные) ландшафты характеризуются низкими концентрациями, а более сухие (лесные) — их увеличением, что отражает различия в физико-химических процессах (например, выделение ЛОС растительностью) и влажности почвы.

В узкой речной горной долине концентрация отрицательных (около  $2000 \text{ см}^{-3}$ ) ионов была выше положительной ( $1300 \text{ см}^{-3}$ ) в течении всего периода измерений. В других типах – на склонах хребтов, равнинах или в широких горных котловинах концентрация положительных ионов всегда была выше отрицательных.

На вариабельность концентраций ионов, помимо ландшафта, решающее влияние оказывают.

- Атмосферные процессы: суточный ход (ночной максимум и дневной минимум) обусловлен динамикой турбулентности и действием температурных инверсий.
- Рельеф: орографические особенности (долины, хребты, котловины) и локальная циркуляция (горно-долинные ветры, бризы) определяют стратификацию, перенос и рекомбинацию ионов.
- Антропогенный фактор: в городских условиях направление ветра становится критическим параметром, так как ветра с промышленных районов резко снижают концентрации ионов из-за их стока на аэрозоль.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

2. Аджиев А. Х. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе / А. Х. Аджиев, Г. В. Куповых. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 137 с.
3. Адушкин В. В. Электрические поля техногенных и природных процессов. / В. В. Адушкин, С. П. Соловьев, А. А. Спивак // М.: — ГЕОС, — 2018. — с. 464
4. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) // Л.: Гидрометеоиздат. — 1991. — с. 508.
5. Геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН : [Электронный ресурс] // URL: <https://imces.ru/index.php?rm=news&action=view&id=899>. (Дата обращения: 01.09.2025).
6. Горбатенко В.П. Молния как звено глобальной электрической цепи / В.П. Горбатенко, Т.В. Ершова. — Томск: Издательство ТГПУ, 2011. — 214 с.
7. Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Нагорский П. М., Самохвалов И. В., Электрооптические явления в атмосфере, Изд-во НТЛ, Томск, 2015. — 316 с.
8. Жукова В. А. Анализ температурных инверсий нижнего слоя атмосферы по данным микроволнового температурного профилемера МТП-5 в городе Томске / В.А. Жукова, Н.П. Красненко, К.Н. Пустовалов, А.С. Раков // Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции. Калининград — 2021. 816—821.
9. Зайнетдинов Б. Г. Теоретические и экспериментальные исследования элементов Глобальной электрической цепи в атмосфере на высокоширотных станциях с учетом влияния аэрозольных частиц: дис. канд. ф.-м. наук. — Санкт-Петербург., 2025, 125 с.
10. Зайнетдинов Б. Г. Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе // Труды ГГО. 2018. № 588. С. 47—61.

11. Зольников И.Д., Мистрюков А.А. Четвертичные отложения и рельеф долин Чуи и Катуни I и.д. Зольников, А.А. Мистрюков; Ин-т геологии и минералогии СО РАН. — Новосибирск: Параллель, 2008. — 182 с.
12. Инишева Л. И. Болотоведение: учебник для вузов /Л. И. Инишева; ГОУ ВПО «Том. гос. пед. университет». — Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2009. — 210 с.
13. Исидоров В. А. Летучие выделения растений: состав, скорость эмиссии и экологическая роль. — СПб.: «Алга-Фонд», Ассоциациф «Алга», 1994. — 188.
14. Каллас Е. В. Почвоведение с основами геологии и агроэкологического землепользования: учебное пособие. ч. 1. — Томск.: изд. Томского государственного университета, 2011. — 334 с.
15. Карты погоды : [Электронный ресурс] // URL: <http://meteo-nso.ru/pages/6>. (Дата обращения: 01.09.2025)
16. Карты фактической погоды — приземный анализ и аэрология: [Электронный ресурс] // URL: <https://meteoinfo.ru/mapsynop/>. (Дата обращения: 01.09.2025)
17. Кашleva Л. В. Атмосферное электричество: учебное пособие. — СПб.: изд. РГГМУ, 2008. — 116 с.
18. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоёв атмосферы и методы его измерения / Н. В. Красногорская. — Л.: Гидрометиздат, 1972. — 323 с.
19. Куповых Г. В. Теория электродного эффекта в атмосфере / Г. В. Куповых, В. Н. Морозов, Я. М. Шварц. — Таганрог: Издательство ТРТУ, 1998. — 123 с.
20. Лушников А. А. Образование наноаэрозолей в тропосфере под действием космического излучения / А. А. Лушников, В. А. Загайнов, Ю. С. Любовцева, А. Д. Гвишиани // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 175—184.
21. Мареев Е. А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН, 2010. — Т. 180, № 5. — 527—534.

22. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. — Л: Гидрометеоиздат, 2000. — 778 с.
23. Морозов В. Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учётом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ / В. Н. Морозов — СПб.: изд. РГГМУ, 2011. — 253 с.
24. Морозов В. Н., Куповых Г. В. Теория электрических явлений в атмосфере. — Изд-во LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG Germany, 2012. — 330 с.
25. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В. Грозовая активность над Западной Сибирью // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 123–134. DOI: 10.17223/25421379/25/8.
26. Оглезнева М. В., Нагорский П. М., Пустовалов К. Н., Сат А. А., Смирнов С. В. Электрическое состояние приземного слоя атмосферы в Горном Алтае по данным экспедиционных измерений в 2022—2023 гг. // Геосферные исследования. — 2025. — № 4. — С. 135—148.
27. 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.
28. Огуряева Л. В., Шварц Я. М. Многолетний ход величин атмосферного электричества в приземном слое // Метеорология и гидрология. — 1987. — №7. — С. 59—64.
29. Орлов А.С., Яковлев Е.Ю. О влиянии физико-химических параметров на накопление и распределение радионуклидов в торфяных залежах Северо-Запада России (на примере Иласского болотного массива Архангельской области) / А.С. Орлов, Е.Ю. Яковлев // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии материалы 35 молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова. Петрозаводск, 2024, С. 117—119.

30. Преобразователь измерительный электрической проводимости воздуха Электропроводность-2 : [Электронный ресурс] // URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/51302-12-elektroprovodnost-2>. (Дата обращения: 01.09.2025).
31. Природно-климатические процессы на территории Сибири в конце XX — начале XXI века: монография / гл. ред. Е. А. Головацкая. — Новосибирск.: СО РАН, 2025 г. — 170 с.
32. Природные экосистемы. Болото // Большая Российская Энциклопедия, 2022 — URL: <https://bigenc.ru/c/boloto-6adf93> (Дата обращения: 01.09.2025)
33. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М., Оглезнева М.В., Сат А.А., Смирнов С.В. Сравнительный анализ изменчивости невозмущённого электрического поля в горных и степных ландшафтах на юге Сибири по данным экспедиционных измерений // Гидрометеорология и экология. — 2024а. — Вып. 75. — С. 234—250. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-75-234-250.
34. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М., Оглезнева М.В., Смирнов С.В. Изменчивость приземного электрического поля под влиянием метеорологических условий по данным наблюдений в г. Томске // Оптика атмосферы и океана. — 2024б. — Т. 37. № 08. — С. 681—687. DOI: 10.15372/AOO20240808.
35. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды [Текст] / [Ред. коллегия: д-р геогр. наук проф. В. А. Бугаев (пред.) и др.] ; Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Центр. ин-т прогнозов. — 2-е изд. (перераб. и доп.). — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1964—1966. — 5 т.; 22 см. Ч. 3, вып. 3: Атмосферные процессы Средней Азии, Казахстана и Западной Сибири. Ч. 3, вып. 3. — 1966. — 275 с. : карт., черт.
36. Севостьянов В. А., Грязькин А. В. / Оценка аэроионной способности древесных растений для создания локальных фитологических ингаляториев. В. А. Севостьянов, А. В. Грязькин // Успехи современного естествознания. — 2016. — № 9. — С. 82—86.
37. Симонова Г.В., Маркелова А.Н., Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Оглезнева М.В., Давыдкина А.Е. Влияние мезомасштабных конвективных систем

на изотопный состав атмосферных осадков в Томске // Оптика атмосферы и океана. — 2024. — Т. 37, № 9. — С. 729—735. DOI: 10.15372/AOO20240902.

38. Смирнов В. В. Ионизация в тропосфере / В. В. Смирнов. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. — 309 с.

39. Счётчик аэроионов «Сапфир-ЗМ». Руководство по эксплуатации : [Электронный ресурс] // URL: <https://ionization.ru/ru/katalog-npf-yantar/15-schetchik-aeroionov-sapfir-3m.html>. (Дата обращения: 01.09.2025).

40. Тверской П. Н. Атмосферное электричество. / П. Н. Тверской. — Л.: Гидрометеоиздат, 1949. — 252 с.

41. Тверской П. Н. Курс метеорологии (физика атмосферы) / П. Н. Тверской. — Л.: Гидрометеоиздат, 1964. — 698 с.

42. Ткачёв А. В. Исследование летучих веществ растений. / А. В. Ткачёв. — Новосибирск: Офсет, 2008. — 969 с.

43. Чистяков К. В. Горный массив Монгун-Тайга / К. В. Чистяков, Д. А. Ганюшкин, И. Г. Москаленко и др. Под ред. К. В. Чистякова. СПб.: «Арт-Экспресс», 2012, — 310 с., с илл.

44. Яковлев Е. Ю. Изотопно-радиогеохимические методы оценки геологической обстановки западного сектора Российской Арктики: дис. д. геол.-мин. наук. — М., 2024, 311с. [URL: [https://www.mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/download/Dissert\\_Yakovlev\\_EYu.pdf](https://www.mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/download/Dissert_Yakovlev_EYu.pdf)]

45. Яковлева В. С. Предварительные результаты анализа вариаций бета-фона приземной атмосферы, обусловленных ливневыми осадками / В. С. Яковлева, П. М. Нагорский, Г. А. Яковлев, А. С. Зелинский, К. Н. Пустовалов, С. В. Смирнов, И. В. Беляева // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. — 2020. — Т. 31, № 2, С. 139—149. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-139-149.

46. Air Ion Counter Model AIC2. [Электронный ресурс] // URL: <https://www.alphalabinc.com>. (Дата обращения: 01.09.2025).

47. Alessio G. A., De Lillis M., Fanelli M., Pinelli P., Loreto F. Direct and indirect impacts of fire on isoprenoid emissions from Mediterranean vegetation. // Functional Ecology. — 2004. — Vol. 18, No. 3. — P. 357—364.

48. Anisimov S. V. Electricity of the convective atmospheric boundary layer: Field observations and numerical simulation / S. V. Anisimov, S. V. Galichenko, N. M. Shikhova, K. V. Afinogenov // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. — 50. — 390—398.
49. Anisimov S. V. Electrodynamiс properties and height of atmospheric convective boundary layer / S. V. Anisimov, S. V. Galichenko, E. A. Mareev // Atmospheric Research. — 2017. — Vol. 194. — P. 119—129. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.04.012.
50. Anisimov S. V. Global and Regional Electricity Components in Undisturbed Midlatitude Lower Atmosphere / S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, A. Prokhorchuk // Izv., Phys. Solid Earth. — 2018. — Vol. 54. — P. 764—774. DOI: 10.1134/S1069351318050038.
51. Bennett A. J. Atmospheric electricity in different weather conditions / A. J. Bennett, R. G. Harrison // Weather. — 2007. — Vol. 62. — P. 277–283. DOI: 10.1002/wea.97.
52. Bianchi F. Highly oxygenated organic molecules (HOM) from gas-phase autoxidation involving peroxy radicals: A key contributor to atmospheric aerosol / F. Bianchi, Th. Kurtén, M. Riva, C. Mohr, M. P. Rissanen, P. Roldin, T. Berndt, J. D. Crounse, P. O. Wennberg, Th. F. Mentel, J. Wildt, H. Junninen, T. Jokinen, M. Kulmala, D. R. Worsnop, J. A. Thornton, N. Donahue, H. G. Kjaergaard, M. Ehn // Chem. Rev. — 2019. — Vol. 119, № 6. — P. 3472—3509. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00395.
53. Bianchi F., Trostl J., Junninen H., Frege C., Henne S., Hoyle C.R., Molteni U., Herrmann E., Adamov A., Bukowiecki N., Chen X., Duplissy J., Gysel M., Hutterli M., Kangasluoma J., Kontkanen J., Kurten A., Manninen H.E., Munch S., Perakyla O., Petaja T., Rondo L., Williamson C., Weingartner E., Curtius J., Worsnop D.R., Kulmala Dommen J., Baltensperger U. New particle formation in the free troposphere: a question of chemistry and timing // Science, 2016. — V. 352, Is. 6289. — P. 1109—1112. DOI: 10.1126/science.aad5456.
54. Blanchard D. C. Electrified droplets from the bursting of bubbles at an air-sea water interface / D. C. Blanchard // Nature. — 1955. — 175. P. 334—336.

55. Chalmers J. A. Atmospheric electricity, 2nd Edition / J. A. Chalmers. — Pergamon Press Ltd, 1967. — 515 p.
56. Composition and temporal behavior of ambient ions in the boreal forest / M. Ehn, H. Junninen, T. Petaja, T. Kurten, V.-M. Kerminen, S. Schobesberger, H. E. Manninen, I. K. Ortega, H. Vehkamaki, M. Kulmala, D. R. Worsnop // *Atmos. Chem. Phys.* — 2010. — Vol. 10. — P. 14897—14946. DOI: 10.5194/acpd-10-14897-2010.
57. Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere / G. A. Bazilevskaya, I. G. Usoskin, E. O. Fluckiger, R.G. Harrison, L. Desorgher, R. Butikofer, M. B. Krainev, V. S. Makhmutov, Y. I. Stozhkov, A. K. Svirzhevskaya, N. S. Svirzhevsky, G. A. Kovaltsov // *Space Sci. Rev.* — 2008. — Vol. 137. — P. 149—173. DOI: 10.1007/s11214-008-9339-y.
58. Dhanorkar S. Diurnal and seasonal variations of the small-, intermediate-, and large-ion concentrations and their contributions to polar conductivity / S. Dhanorkar, A. K. Kamra // *J. Geophys. Res.* — 1993. — Vol. 98. — P. 14895—14908. DOI: 10.1029/93JD00464.
59. Dolezalek H. Electrical processes in atmospheres / H. Dolezalek, R. Reyter, H. Landsberg. — Darmstadt : Steinopff Verlag, 1977. — 866 p. DOI: 10.1007/978-3-642-85294-7.
60. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Arzhanov M.M., et al. Earth System Model of the Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences: Structure and Major Results / A. V. Eliseev, I. I. Mokhov, M. M. Arzhanov, S. N. Denisov, A. V. Chernokulsky, K. E. Muryshev // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* — 2025. — V. 61. — P. 37—55. DOI: 10.1134/s0001433825700069.
61. Fishman G. Discovery of Intense Gamma Rays Flashes of Atmospheric Origin / G. Fishman, P.N. Bhat, R. Mallozzi, J. M. Horack, T. Koshut, C. Kouveliotou, G. N. Pendleton, C.A. Meegan, R.B. Wilson, W.S. Paciesas, S.J. Goodman, H.J. Christian // *Science.* — 1994. — Vol. 264. — P. 1313—1316. DOI: 10.1126/science.264.5163.1313.
62. Fuentes J. D., Baldocchi D. D., Lamb B. Editorial. // *Journal of Applied Meteorology.* — 1999. — Vol. 38. — P. 849—854.

63. Grafetstätter C. Does waterfall aerosol influence mucosal immunity and chronic stress? A randomized controlled clinical trial? / C. Grafetstätter, M. Gaisberger, J. Prossenagger, M. Ritter, P. Kolarz, C. Pichler, J. Thalhamer, A. Hartl // *J. Physiol. Anthropol.* — 2017. — Vol. 36. P. 1—12.
64. Guryanov V. V., Mikhailov R. P., Eliseev A. V. Present—day and future lightning frequency as simulated by four CMIP6 models / V. V. Guryanov, R. P. Mikhailov, A. V. Eliseev // *Pure and Applied Geophysics*. — 2024. — V. 181, N. 11. — P. 3351—3374. DOI: 0.1007/s00024-024-03587-w.
65. Harrison R. G. Fair weather criteria for atmospheric electricity measurements / R. G. Harrison, K. A. Nicoll // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2018. — Vol. 179. — P. 239—250. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.07.008.
66. Harrison R. G. Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere / R. G. Harrison, K. S. Carslaw // *Reviews of Geophysics*. — 2003. — Vol. 41, is. 3. — P. 1012. DOI: 10.1029/2002RG000114.
67. Hatakka J., Aalto T., Aaltonen V., Aurela M., Hakola H., Komppula M., Laurela T., Lihavainen H., Paatero J., Salminen K., Viisanen Y. Overview of the atmospheric research activities and results at Pallas GAW station, *Boreal Environ. Res.*, 2003. — V. 8. — P. 365—383.
68. Hirsikko A. The  $^{222}\text{Rn}$  activity concentration, external radiation dose and air ion production rates in a boreal forest in Finland between March 2000 and June 2006 / A. Hirsikko, J. Paatero, J. Hatakka, M. Kulmala // *Boreal Environment Research*. — 2007. — Vol. 12. — P. 265—278.
69. Hirsikko T. Atmospheric ions and nucleation: A review of observations / T. Hirsikko, S. Nieminen, S. Gagné, K. Lehtipalo, H. E. Manninen, M. Ehn, U. Hõrrak, V.-M. Kerminen, L. Laakso, P. H. McMurry, A. Mirme, S. Mirme, T. Petäjä, H. Tammet, V. Vakkari, M. Vana, M. Kulmala // *Atmos. Chem. Phys.* — 2011. — Vol. 11. — P. 767—798. DOI: 10.5194/acp-11-767-2011.
70. Hoppel W. A. Ion-aerosol attachment coefficients and the steady state charge distribution on aerosols in a bipolar environment / W. A. Hoppel, G. M. Frick // *Aerosol Sci. and Tech.* — 1986. — Vol. 5, № 1. — P. 1—21.

71. Hõrrak U. Air ion mobility spectrum at a rural area, in: *Dissertationes Geophysicales Universitatis Tartuensis*, 15, Tartu Univ. Press, Tartu. 2001.
72. Hõrrak U. Diurnal variation in the concentration of air ions of different mobility classes in a rural area / U. Hõrrak, J. Salm, H. Tammet // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. — 2003. — Vol. 108. № D20, 4653. DOI: 10.1029/2002JD003240.
73. Hõrrak U. Formation of charged nanometer aerosol particles associated with rainfall: Atmospheric measurements and lab experiment / U. Hõrrak, H. Tammet, P. P. Aalto, M. Vana, A. Hirsikko, L. Laakso, M. Kulmala // *Rep. Ser. Aerosol Sci.* — 2006. — Vol. 80. — P. 180—185.
74. Hõrrak, U., Tammet, H., Aalto, P., Vana, M., Hirsikko, A., Laakso, ~L., and Kulmala, M.: Formation of charged nanometer aerosol particles associated with rainfall, in: *Proceedings of European Aerosol Conference 2005*, Ghent, Belgium, edited by: Maenhaut, W., p. 606, 2005.
75. How do air ions reflect variations in ionising radiation in the lower atmosphere in a boreal forest? / Xu. Chen, V.-M. Kerminen, J. Paatero, P. Paasonen, H. E. Manninen, T. Nieminen, T. Petäjä, M. Kulmala // *Atmos. Chem. Phys.* — 2016. — Vol. 16. — P. 14297—14315. DOI: 10.5194/acp-16-14297-2016.
76. Hunting E., Matthews J., Hernández P., England S., Kourtidis K., Koh K., Nicoll K., Harrison R., Manser K., Price C., Dragovic S., Cifra M., Odzimek A., Robert D. Challenges in coupling atmospheric electricity with biological systems // *International J. of Biometeorology*. 2020. — V. 65. — P.45—58. DOI: 10.1007/s00484-020-01960-7.
77. Hoppel W. A. Theory of electrode effect. — *J. Atm. Terrest. Phys.*, 1967, V. 29, N 4, p. 709—721.
78. Invasions of arctic air mass in winter and their effect on meteorological and electric quantities in the surface layer / K. N. Pustovalov, P. M. Nagorskiy, V. A. Korolkov, A. E. Tel'minov, S. V. Smirnov // Proc. SPIE Vol. 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1120888, 18 December 2019. — Novosibirsk, 2019. DOI: 10.1117/12.2540942.

79. Iribarne J. On the evaporation of small ions from charged droplets / J. Iribarne, B. Thomson // *J. Chem. Phys.* 64, — 1976. — Vol. 64, is. 6. — P. 2287—2294. DOI: 10.1063/1.432536.
80. Israël H. Atmospheric electricity / H. Israël. — Jerusalem : Israël Program for Scientific Translations, 1970. — 317 pp.
81. JAXA Himawari Monitor [Электронный ресурс] // URL: <https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/>. (Дата обращения: 01.09.2025).
82. Junninen H. Terpene emissions from boreal wetlands can initiate stronger atmospheric new particle formation than boreal forests / H. Junninen, L. Ahonen, F. Bianchi, L. Quéléver, S. Schallhart, L. Dada, H. E. Manninen, K. Leino, J. Lampilahti, St. B. Mazon, P. Rantala, M. Räty, J. Kontkanen, S. Negri, D. Aliaga, O. Garmash, P. Alekseychik, H. Lipp, K. Tamme, J. Levula, M. Sipilä, M. Ehn, D. Worsnop, S. Zilitinkevich, I. Mammarella, J. Rinne, T. Vesala, T. Petäjä, V.-M. Kerminen, M. Kulmala // *Commun. Earth Environ.* — 2022. — Vol. 3. — P. 93. DOI: 10.1038/s43247-022-00406-9.
83. Kal'chikhin V. Connected variations of meteorological and electrical quantities of surface atmosphere under the influence of heavy rain / Kal'chikhin V., Kobzev A., Nagorskiy P., Oglezneva M. [et al] // *Atmosphere*. — 2020. — V. 11, № 1. — P. 1–11. DOI: 10.3390/atmos11111195.
84. Kalivitis N. Formation and growth of atmospheric nanoparticles in the eastern Mediterranean: results from long-term measurements and process simulations / N. Kalivitis, V.-M. Kerminen, G. Kouvarakis, I. Stavroulas, E. Tzitzikalaki, P. Kalkavouras, N. Daskalakis, S. Myriokefalitakis, A. Bougiatioti, H. E. Manninen, P. Roldin, T. Petäjä, M. Boy, M. Kulmala, M. Kanakidou, N. Mihalopoulos // *Atmos. Chem. Phys.* — 2019. — Vol. 19. — P. 2671—2686. DOI: 10.5194/acp-19-2671-2019.
85. Kalivitis N. Night-time enhanced atmospheric ion concentrations in the marine boundary layer / N. Kalivitis, I. Stavroulas, A. Bougiatioti, G. Kouvarakis, S. Gagne, H. E. Manninen, M. Kulmala, N. Mihalopoulos // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2012. — Vol. 12. — P. 3627—3638. DOI: 10.5194/acp-12-3627-2012.
86. Kamra A., Gautam A., Kanawade V., Tripathi S., Srivastava A. Atmospheric ions and new particle formation events at a tropical location, Pune, India // Quarterly

Journal of the Royal Meteorological Society. — 2015. — V. 141. P. 3140—3156. DOI: 10.1002/qj.2598.

87. Kazil J. Aerosol nucleation over oceans and the role of galactic cosmic rays / J. Kazil, E. R. Lovejoy, M. C. Barth, K. O'Brien // Atmos. Chem. Phys. — 2006. — Vol. 6. — P. 4905—4924. DOI: 10.5194/acp-6-4905-2006

88. Kazil J. Tropospheric new particle formation and the role of ions / J. Kazil, R. G. Harrison, E. R. Lovejoy // Space Sci Rev. — 2008. — Vol. 137. — P. DOI: 241—55. 10.1007/s11214-008-9388-2.

89. Kirkby J. Cosmic rays and climate // Surv. Geophys. 2008. — V. 28. — P. 333—375.

90. Kirkby J. Ion-induced nucleation of pure biogenic particles / J. Kirkby, J. Duplissy, K. Sengupta, C. Frege, H. Gordon, Ch. Williamson, M. Heinritzi, M. Simon, Ch. Yan, J. Almeida, J. Tröstl, T. Nieminen, I. K. Ortega, R. Wagner, A. Adamov, A. Amorim, A.-K. Bernhammer, F. Bianchi, M. Breitenlechner, S. Brilke, Xu. Chen, J. Craven, A. Dias, S. Ehrhart, R. C. Flagan, A. Franchin, C. Fuchs, R. Guida, J. Hakala, Ch. R. Hoyle, T. Jokinen, H. Junninen, J. Kangasluoma, J. Kim, M. Krapf, A. Kürten, A. Laaksonen, K. Lehtipalo, V. Makhmutov, S. Mathot, U. Molteni, A. Onnela, O. Peräkylä, F. Piel, T. Petäjä, A. P. Praplan, K. Pringle, A. Rap, N. A. D. Richards, I. Riipinen, M. P. Rissanen, L. Rondo, N. Sarnela, S. Schobesberger, C. E. Scott, J. H. Seinfeld, M. Sipilä, G. Steiner, Yu. Stozhkov, F. Stratmann, A. Tomé, A. Virtanen, A. L. Vogel, A. C. Wagner, P. E. Wagner, E. Weingartner, D. Wimmer, P. M. Winkler, P. Ye, Xu. Zhang, A. Hansel, J Dommen, N. M. Donahue, D. R. Worsnop, U. Baltensperger, M. Kulmala, K S. Carslaw, J. Curtius // Nature. — 2016. Vol. 533(7604). — P. 521—526. DOI: 10.1038/nature17953.

91. Kitto M.E. Interrelationship of Indoor Radon Concentrations, Soil-gas Flux, and Meteorological Parameters // J. Radioanal. Nucl. Chem. — 2005. — Vol. 264, № 2. — P. 381—385. DOI:10.1007/s10967-005-0725-6.

92. Kolarz P. Characterization of ions at Alpine waterfalls / P. Kolarz, M. Gaisberger, P. Madl, W. Hofmann, M. Ritter, A. Hartl. // Atmos. Chem. Phys. — 2012. Vol. 12. — P. 3687—3697 DOI: 10.5194/acp-12-3687-2012.

93. Kononov I. I., Korovin E. A., Shchukin G. G., Yusupov I. E. Trends toward improving passive radio engineering facilities for thunderstorm activity monitoring / Kononov I. I., Korovin E. A., Shchukin G. G., Yusupov I. E. // Meteorologiya i Gidrologiya. — 2022. — V. 12. — 108—115.
94. Kozlov V. I. Anomalous behavior of the electric field of the atmosphere at the extremely low winter temperatures / V. I. Kozlov, V. N. Morozov, P. M. Nagorskiy, K. N. Pustovalov, A. A. Toropov // Proc. SPIE Vol. 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 13 December 2018. — Tomsk, 2018. — P. 108338O-1—108338O-4. DOI: 10.1117/12.2504612.
95. Ku B. K., de la Mora J. F. Cluster Ion Formation in Electrosprays of Acetonitrile Seeded with Ionic Liquids // The Journal of Physical Chemistry B, 2004. — V. 108, Is. 39. — P. 14915—14923.
96. Kulmala M., Kerminen V.-M. On the formation and growth of atmospheric nanoparticles // Atmos. Res. — 2008. — V. 90. — P. 132—150.
97. Laakso L. Detecting charging state of ultra-fine particles: instrumental development and ambient measurement. / L. Laakso, S. Gagne, T. Petäjä, A. Hirsikko, P. P. Aalto, M. Kulmala, V.-M. Kerminen // Atmos. Chem. Phys. — 2007. — Vol. 7. — P.1333—1345. DOI: 10.5194/acpd-6-6401-2006.
98. Levin Z. Charge Separation by Splashing of Naturally Falling Raindrops // Journal of the Atmospheric Sciences. — 1971. — Vol. 28, is. 4. — P. 543—548.
99. Lihavainen H. Size distributions of atmospheric ions inside clouds and in cloud-free air at a remote continental site / H. Lihavainen, M. Komppula, V.-M. Kerminen, Y. Jisanen, K. Lehtinen, M. Vana, M. Kulmala // Boreal Environment Research. — 2007. — Vol. 12. — P. 337—344.
100. Ling X. Air ion concentrations in various urban outdoor environments / X. Ling, R. Jayaratne, L. Morawska // Atmos. Environ. — 2010. — Vol. 44, is. 18. — P. 2186—2193. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.03.026.
101. Measurement report: Molecular-level investigation of atmospheric cluster ions at the tropical high-altitude research station Chacaltaya (5240 m a.s.l.) in the Bolivian Andes / Q. Zha, W. Huang, D. Aliaga, O. Peräkylä, L. Heikkinen, A. M. Koenig, C.

Wu, J. Enroth, Y. Gramlich, J. Cai, S. Carbone, A. Hansel, T. Petäjä, M. Kulmala, D. Worsnop, V. Sinclair, R. Krejci, M. Andrade, C. Mohr, F. Bianchi // *Atmos. Chem. Phys.* — 2023. — Vol. 23. — P. 4559—4576. DOI: 10.5194/acp-23-4559-2023.

102. Milikh G. Model of gamma rays flashes fractal lightening / G. Milikh, J.A. Valdivia // *Geophys. Res. Lett.* — 1999. — Vol. 26, № 4. — P. 525—528.

103. Molecular dynamics study of neutral and charged water clusters / A. A. Vostrikov, S. V. Drozdov, V. S. Rudnev, L. I. Kurkina // *Computational Materials Science*. — 2006. — Vol. 35, is. 3. — P. 254—260. DOI: 10.1016/j.commatsci.2004.12.073.

104. Nagorskiy P. M. Variations of light ion concentrations in the surface atmosphere during the passage of convective clouds // Nagorskiy P. M., Pustovalov K. N., Oglezneva M.V., Morozov V. N. // Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia. — 2019. — P. 584—587. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810352.

105. Nagorskiy P. M., Zhukov D. F., Kartavykh M. S., Oglezneva M. V., Pustovalov K. N., Smirnov S. V. Properties and structure of mesoscale convective systems over Western Siberia according to remote observations // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2022. — V. 47, № 12. — P. 934—941.

106. Nagorsky P. M. Electrode layer in the electric field of deep convective cloudiness / P. M. Nagorsky, S. V. Smirnov, K. N. Pustovalov, V. N. Morozov // *Radiophys. Quantum Electron.* — 2014. — Vol. 56. — P. 769—777.

107. NASA Worldview [Электронный ресурс] // URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>. (Дата обращения: 01.09.2025).

108. Nicoll K. A., Harrison R. G., Barta V., Byr J., Brugge R., Chilingarian A., Chum J., Georgoulias A., Guha A., Kourtidis K., Kubicki M., Mareev E., Matthews J., Mkrtchyan H., Odzimek A., Raulin J-P., Robert D., Silva H. G., Tacza J., Yai Y., Yaniv R. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019. — V. 184. — P.18—29. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.01.003

109. Pawar S. D. Air ion variation at poultry-farm, coastal, mountain, rural and urban sites in India / S. D. Pawar, G. S. Meena, D. Jadhav // Aerosol and Air Quality Research. — 2012. — Vol. 12. — P. 444—455. DOI: 10.4209/aaqr.2011.09.0148.
110. Pawar S. D. Diurnal and seasonal air ion variability at rural station Ramanandnagar, India / S. D. Pawar, G. S. Meena, D. B. Jadhav // Aerosol and Air Quality Research. — 2010. — Vol. 10, № 2. — P.154—166. DOI: 10.4209/aaqr.2009.10.0066.
111. Petrova G. G. The studies on the role of aerosols in the electric field variations formation in the surface atmosphere / G. G. Petrova, I. N. Panchishkina, A. I. Petrov, O. G. Chkhetiani, E. V. Egorov, V. A. Boldyreva // Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki. — 2018. — Vol. 5, № 25. — P. 42–54. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-42-54.
112. Petrova G.G., Petrov A.I., Panchishkina I.N. Formation of the Electric Structure in the Lower Layer of the Atmosphere: Experimental Studies and Generalization of the Data. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2014. — V. 56, Is. 11. — . P. 723—738. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11141-014-9476-y>.
113. Porstendoérfer J. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air // J. Aerosol Sci. — 1994. — Vol. 25, № 2. — P. 219—263. DOI: 10.1016/0021-8502(94)90077-9.
114. Pustovalov K. N. Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds / K. N. Pustovalov, P. M. Nagorskiy // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2018. — Vol. 172. — P. 33—39. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.03.008.
115. Pustovalov K., Nagorskiy P., Oglezneva M., Sat A., Smirnov S. Electric state of the surface atmosphere in the mountain-steppe landscapes of the Southern Siberia according to measurement data in the Khakass-Tyva expedition in 2022 // Atmosphere. — 2024. — V. 15. — P. 27. DOI: 10.3390/atmos15010027.
116. Pustovalov K., Nagorskiy P., Oglezneva M., Smirnov S. Book Chapter. The Atmospheric Electric Field under Fair-Weather Conditions in the South of Western Sibe-

ria based on Observations in Tomsk in 2006-2020 / Earth and its Atmosphere: 2nd Edition. — Hyderabad, India: Vide Leaf, 2022a. — P. 1—37. ISBN: 978-93-92117-33-6. DOI: 10.37247/EATM2ED.2.22.14.

117. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M., Oglezneva M.V., Smirnov S.V. The electric field of the undisturbed atmosphere in the South of Western Siberia: A case study on Tomsk // Atmosphere. 2022b. — V. 13. — P. 614. DOI: 10.3390/atmos13040614.

118. Reiter R. Frequency distribution of positive and negative small ion concentrations, based on many years' recordings at two mountain stations located at 740 and 1780 m ASL // Int. J. Biometeorol. — 1985. — Vol. 29. — P. 223—231. DOI: 10.1007/BF02189654.

119. Rose C. Sellegrí K., Velarde F., Moreno C. I., Ramonet, M., Weinhold K. Krejci R., Ginot P., Andrade M., Wiedensohler A., Laj P. Frequent nucleation events at the high altitude station of Chacaltaya (5240 m a.s.l.), Bolivia. Atmospheric Environment. — V. 102. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.11.015.

120. Rowell A. The behaviour of charged particles (ions) during new particle formation events in urban Leipzig, Germany / A. Rowell, J. Brean, D. C. S. Beddows, Z. Shi, A. Kumar, M. Rissanen, M. Dal Maso, P. Mettke, K. Weinhold, M. Merkel, R. M. Harrison // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2024. — Vol. 24. — P. 10349—10361. DOI: 10.5194/acp-24-10349-2024.

121. Ruhnke L.H. Area averaging of atmospheric current // J. Geomagn. Geoelec. — 1969. — Vol. 21, is. 1. — P. 453—462. DOI: 10.5636/jgg.21.453.

122. Satsumabayashi H., Nishizawa H., Yokouchi Y., Ueda H. Pinonaldehyde and some other organics in rain and snow in central Japan. // Chemosphere. — 2001 . — Vol. 45, No. 6—7. P. 887—891.

123. Sellegrí K. New Particle Formation: A Review of Ground-Based Observations at Mountain Research Stations / K. Sellegrí, C. Rose, A. Marinoni, A. Lupi, A. Wiedensohler, M. Andrade, P. Bonasoni, P. Laj // Atmosphere. — 2019. — Vol. 10, is. 9. — P. 493. DOI: 10.3390/atmos10090493.

124. Shaw G. E. Production of condensation nuclei in clean air by nucleation of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> // Atmospheric Environment. — 1989. — Vol. 23, is. 12. — P. 2841—2846.

125. Siingh D., Pant V., Kamra A. K. Measurements of positive ions and air-Earth current density at Maitri, Antarctica // J. Geophys. Res. 2007. — V. 112. — P. D13212. DOI:10.1029/2006JD008101.
126. Sin'kevich A., Tarabukin I., Toropova M., et al. Structure and Characteristics of a Cb during Lightning / A. Sin'kevich, I. Tarabukin, M. Toropova, Yu. Mikhailovskii, N. Veremei, A. Kurov, I. Yusupov, N. Bocharkov, A. Lalushkin, A. Solonin, D. Starykh // Atmospheric and Oceanic Optics. — 2024. — V. 37. — P. 66—73. DOI: 10.1134/S1024856023700082.
127. Skromulis A. Impact of anthropogenic pollution of air ion concentration : Summary of the Doctoral Thesis / A. Skromulis. — Riga : RTU Press, 2018. — 46 p.
128. Soumyajyoti J. Electric field variation in clear and convective conditions at a tropical urban location / J. Soumyajyoti, M. Animesh // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2019. — Vol. 124, № 4. — P. 2068-2078. DOI: 10.1029/2018JD028310.
129. SRTM 90m DEM Digital Elevation Database [Электронный ресурс] // URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/>. (Дата обращения: 01.09.2025).
130. Suni T. Formation and characteristics of ions and charged aerosol particles in a native Australian Eucalypt forest / T. Suni, M. Kulmala, A. Hirsikko, T. Bergman, L. Laakso, P. P. Aalto, R. Leuning, H. Cleugh, S. Zegelin, D. Hughes, E. Gorsel, M. Kitchen, M. Vana, U. Horrak, A. Mirme, S. Sevanto, J. Twining, C. Tadros // Atmos. Chem. Phys. — 2008. — Vol. 8, is. 2. — P. 129—139. DOI: 10.5194/acp-8-129-2008.
131. Svenningsson B. Aerosol particle formation events and analysis of high growth rates observed above a subarctic wetland-forest mosaic / B. Svenningsson, A. Arneth, S. Hayward, T. Holst, A. Massling, E. Swietlicki, A. Hirsikko, H. Junninen, I. Riipinen, M. Vana, M. Dal Maso, T. Hussein, M. Kulmala // Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology. — 2008. — Vol. 60, is. 3. — P. 353—364. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2008.00351.x.
132. Tammet H. Negatively charged nanoparticles produced by splashing of water / H. Tammet, U. Hörrak, M. Kulmala // Atmos. Chem. Phys. — 2009. — Vol. 9. — P. 357—367. DOI: 10.5194/acpd-8-16609-2008

133. Tammet H. Size and mobility of nanometer particles, clusters and ions. // *J. Aerosol Sci.* — 1995. — V. 26. — P. 459—475.
134. Thomson J. J. Conduction of electricity through gases // Cambridge, 1903. — 566 p.
135. Tinsley B. A. The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics // *Reports on Progress in Physics*. — 2008. — Vol. 71, is. 6. — P. 066801—066831. DOI: 10.1088/0034-4885/71/6/066801.
136. Venzac H. Nucleation events detected at the high altitude site of the Puy de Dôme Research Station France / H. Venzac, K. Sellegri, P. Laj // *Boreal Environment Research*. — 2007. — Vol. 12, is. 3. — P. 345—359.
137. Vimeux F., Tremoy G., Risi C., Gallaire R. A strong control of the South American SeeSaw on the intraseasonal variability of the isotopic composition of precipitation in the Bolivian Andes // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. V. 307, N 1—2. P. 47—58. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.04.031.
138. Virkkula A. Charged particle size distributions and analysis of particle formation events at the Finnish Antarctic research station Aboa / A. Virkkula, A. Hirsikko, M. Vana, P. P. Aalto, R. Hillamo, M. Kulmala // *Boreal Environment Research*. — 2007. — Vol. 12, is. 3. — P. 397—408.
139. Williams E., Mareev E. Recent progress on the global electrical circuit / *Atmospheric Research*, 2014. — V. 135—136. — P. 208-227.
140. Zheng G. New particle formation in the remote marine boundary layer / G. Zheng, Y. Wang, R. Wood, M. P. Jensen, C. Kuang, I. L. McCoy, A. Matthews, F. Mei, J. M. Tomlinson, J. E. Shilling, M. A. Zawadowicz, E. Crosbie, R. Moore, L. Ziembra, M. O. Andreae, J. Wang // *Nature Communications*. — 2021. — Vol. 12, is. 1. — P. 527. DOI: 10.1038/s41467-020-20773-1.
141. Azad A. H. Electrification associated with the evaporation of water and ionic solutions / A. H. Azad, J. Latham // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 1967. — Vol. 29. — P. 1403—1410.