



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологии,  
климатологии и охраны атмосферы  
**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему: «Особенности суточного и годового хода атмосферно-  
электрических параметров Арктического региона»

Исполнитель Шевелева Ольга Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук  
(ученая степень, ученое звание)  
Кашлева Лариса Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)  
**«К защите допускаю»**  
**заведующий кафедрой**

  
(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
Сероухова Ольга Станиславовна  
(фамилия, имя, отчество)

**28.05.2022 г.**

Санкт-Петербург  
2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	2
ГЛАВА 1. ЯВЛЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.....	4
1.1 Основные параметры электричества в атмосфере .....	4
1.2 Глобальная атмосферная электрическая цепь.....	10
1.3 Временной ход атмосферно-электрических параметров.....	12
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.....	18
2.1 основные атмосферно-электрические параметры и методы их измерения .....	18
2.1.1 Измерение напряженности электрического поля .....	18
2.1.2 Измерение полярных электропроводностей.....	20
2.1.3 Измерение вертикальной составляющей напряженности электрического поля на открытой площадке .....	22
2.1.4 измерение полярных концентраций легких ионов .....	23
2.1.5 измерение концентрации радона-222.....	24
2.1.6 измерение плотности вертикального тока. ....	25
2.2 измерительный комплекс.....	27
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ СУТОЧНОГО И ГОДОВОГО ХОДА АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА	33
1.3 Метеорологические особенности арктического региона и их влияние на атмосферно-электрические параметры атмосферы .....	33
3.2 Выбор анализируемой станции .....	35
3.3 Зависимость между электрическим полем и метеорологическими характеристиками атмосферы.....	37
3.3.1 Анализ годового хода напряженности поля .....	38
3.3.2 Анализ суточного хода напряженности поля .....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	51
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Активные исследования атмосферного электричества начались еще в 18 веке, и лишь в середине столетия была установлена электрическая природа гроз. Работы по изучению атмосферного электричества вели русские учёные – Г. В. Рихман и М. В. Ломоносов. Однако и сейчас в этом разделе науки остается множество нерешенных вопросов и проблем. Например, одной из актуальных проблем науки об атмосферном электричестве является изучение обмена зарядами между землей и атмосферой и сохранение землей отрицательного заряда.

Прикладной интерес представляет электричество нижней атмосферы, а прежде всего электрические заряды грозовых облаков и статические характеристики электрического поля «хорошей погоды». Также не менее важно изучение вклада локальных факторов в измерение параметров электрического поля атмосферы, в связи с разнообразием данных факторов и практическим интересом их исследования.

Результаты исследований электрического поля атмосферы востребованы в таких областях науки как физика атмосферы, метеорология, сейсмология и вулканология, а необходимость эффективной защиты от статического электричества и грозовых разрядов требует лучшего понимания физических процессов формирования и развития разрядов [7].

Регулярные измерения атмосферно-электрических характеристик являются основой как экспериментального, так и теоретического изучения процессов в электродном слое атмосферы. По данным регулярных измерений можно исследовать формирование облачности и электрические эффекты, связанные с антропогенными загрязнениями и природными аэрозолями.

В связи с проблемами изменения климата и возможного влияния антропогенных факторов и космической погоды на климатическую систему Земли, необходимо изучение вариаций параметров всех физических процессов включая параметры атмосферного электричества в районах с чистой, незагрязненной промышленными аэрозолями, атмосферой.

Целью бакалаврской работы является выявление особенностей суточного и годового хода напряженности электрического поля атмосферы ( $E$ ) на станции Диксон и оценка влияния метеорологических факторов на их временные вариации

Решаемые задачи:

- Изучение материалов об основных процессах атмосферного электричества и методах их исследования;
- Анализ метеорологических данных и параметров атмосферного электричества, полученных на Диксоне в 2018г.
- Выявление зависимостей  $E$  от метеорологических явлений;
- Определение суточных вариаций  $E$  в условиях «хорошей погоды»;
- Получение распределения значений  $E$  по направлениям и скоростям ветра;

# ГЛАВА 1. ЯВЛЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

## 1.1 Основные параметры электричества в атмосфере

В атмосфере существует электрическое поле. Поскольку Земная поверхность имеет преимущественно отрицательный заряд, а верхние слои атмосферы (электросфера, ионосфера) заряжены относительно Земли положительно, то электрическое поле направленно сверху вниз, то есть от положительного заряда к отрицательному заряду.

Электрические заряды в атмосфере образуются благодаря ионизации воздуха галактическими космическими лучами и излучения радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре.

Галактическими космическими лучами называют частицы, которые заполняют межзвездное пространство и периодически проникают в Земную атмосферу. Космические лучи представляют собой очень сложное излучение, приходящее из космического пространства. Основным источником галактических космических лучей является Солнце и взрывы сверхновых звезд.

Различают следующие типы космических лучей:

1. Галактические космические лучи – космические частицы, которые приходят на Землю из нашей галактики.

2. Солнечные космические лучи – космические частицы, которые генерируются Солнцем.

3. Метагалактические космические лучи - космические частицы, возникшие вне нашей галактики. Их вклад в общий поток космических лучей невелик.

Что касается излучения радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и атмосфере, что она очень мала. Горные породы содержат около  $3 \cdot 10^{-6}$  грамм урана на 1 грамм горной породы. При такой малой

степени радиоактивности обычных горных пород и вод на земной поверхности непосредственное действие их излучения происходит лишь на высоте до нескольких сантиметров.

Основное значение для ионизации атмосферы имеют вещества, которые содержатся в самой атмосфере, это: эманации радия, тория, актиния и продукты их распада. Радиоактивные элементы попадают в атмосферу при обмене почвенного воздуха с воздухом атмосферным. После поступления в атмосферу радиоактивные вещества горизонтальными и вертикальными токами, тем дальше, чем продолжительнее период их жизни. Следовательно главное значение в радиоактивности атмосферы имеют некоторые долгоживущие вещества. Так же большое значение приобрели радиоактивные вещества антропогенного происхождения, образующиеся при испытаниях ядерного оружия, взрывах, авариях на атомных электростанциях и др.

В тропопаузе образуются легкие положительные ионы и отрицательные водные аэрозоли. Ионы поднимаются к ионосфере, а аэрозоли в свою очередь опускаются на Землю за счет силы тяжести. Решающую роль в формировании атмосферного электричества, кроме космических лучей и радиоактивности, - играют также процессы конденсации и испарения паров воды, а также действие жесткого ультрафиолета и радиоактивность в приземном слое атмосферы.

Электрическое поле атмосферы характеризуется в первую очередь потенциалом  $V$ , энергетической характеристикой электрического поля. Потенциал обусловлен всеми электрическими зарядами, которые имеются на поверхности земли и в атмосфере [29]

Второй, силовой характеристикой электрического поля атмосферы является напряженность поля. Зная, распределение потенциала в атмосфере, можно найти напряженность поля ( $E$ ), определяемую силой, действующей на единичный заряд:

$$E = -\frac{\partial V}{\partial n} \quad (1)$$

Так как в атмосфере имеются объемные заряды  $\rho$ , в каждой ее точке должно выполняться уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial E}{\partial n} = \frac{4\pi}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \quad (2)$$

Где:  $\varepsilon_0$ — электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл/(В·м);

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость воздуха.

Или

$$\frac{\partial^2 E}{\partial n^2} = \frac{4\pi}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} = -4\pi\rho \quad (3)$$

Следовательно:

$$\frac{\partial E}{\partial n} = -4\pi\rho \quad (4)$$

Где:  $\rho$  —объемная плотность заряда атмосферы в данной точке

Так как изменение напряженности поля прямо пропорционально объемной плотности заряда, то с повышением концентрации объемных зарядов, вблизи земной поверхности, напряженность поля резко возрастает.

Из формулы (1) следует, что напряженность электрического поля равна изменению потенциала по направлению его убывания. Так как в атмосфере с высотой потенциал растет, а за положительное направление

нормали принято брать направление от земной поверхности, то на практике пользуются градиентом потенциала, равным напряженности по модулю и противоположному по направлению.

$$\text{grad}(V) = -E \quad (5)$$

Так же не стоит забывать, что атмосфера за счет наличия ионов является средой обладающей способностью проводить ток под действием электрического поля, то есть обладает определенным значением электрической проводимости.

Проводимость ( $\lambda$ ) характеризует проводящие свойства среды. В атмосфере. Проводимость определяется концентрацией и подвижностью атмосферных ионов. [16]

$$\lambda = e \cdot n \cdot (u_+ + u_-) \quad (6)$$

Где:  $e$  – заряд ионов;

$n$  – число ионов;

$u_+$  – подвижность положительного иона (катиона);

$u_-$  – подвижность отрицательного иона (аниона).

Электрическая проводимость атмосферы, также как и температура, давление и химический состав, служит основой физической стратификации атмосферы. Вблизи земной поверхности величина электрической проводимости атмосферы имеет порядок  $10^{-14}$  См/м и экспоненциально увеличивается с высотой, имея высотный масштаб около 6-60 км. [5]

Ионы движутся в электрическом поле, имеющем напряженность  $E$ , со скоростью  $u_{\pm} \cdot E$ . так как каждый ион имеет заряд, равный  $e$ , то при концентрации ионов, равной  $n$  м<sup>-3</sup>, через каждую единицу площади

поверхности ( $1 \text{ м}^2$ ), перпендикулярной к направлению поля  $E$ , в единицу времени будет переноситься в одну сторону положительный заряд ( $i^+$ ), а в обратную сторону отрицательный заряд ( $i^-$ ).

Сумма плотности этих зарядов, равна:

$$i_{\Pi} = e \cdot n \cdot (u_+ + u_-) \cdot E \quad (7)$$

Где:  $i_{\Pi}$  - плотность электрического тока проводимости;

$e$  — заряд ионов;

$n$  — число ионов;

$u_{\pm}$  — подвижность катиона и аниона;

Учитывая, что проводимость:

$$\lambda = q \cdot n \cdot (u_+ + u_-) \quad (8)$$

Можно записать уравнение для плотности электрического тока проводимости в следующем виде:

$$i_{\Pi} = \lambda \cdot E - const \quad (9)$$

Тогда уравнение для плотности полного вертикального тока  $i$  в атмосфере будет иметь вид:

$$i = E(\lambda_+ + \lambda_-) + \rho V_z + k \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (10)$$

Где:  $E$  — напряженность электрического поля земли;

$\lambda_+$  и  $\lambda_-$  — полярные проводимости;

$\rho$  — плотность объемного заряда;

$V_z$  — вертикальная составляющая скорости ветра;

$k$  – коэффициент турбулентности;

$\frac{\partial \rho}{\partial z}$  – вертикальная составляющая градиента объемного заряда.

Таким образом, формула (10) принимает вид:

$$i = i_{\text{п}} + i_{\text{к}} + i_{\text{д}} \quad (11)$$

Где:  $i_{\text{п}}$  – плотность тока проводимости на землю;

$i_{\text{к}}$  – плотность конвективного тока на землю;

$i_{\text{д}}$  – плотность диффузного тока на землю.

Первое слагаемое в формуле (11) характеризует ток проводимости, второе конвективный вертикальный ток, а третье диффузный турбулентный ток. Диффузный и конвективный ток в сумме представляют собой ток механического переноса  $i_{\text{мп}}$

Через каждый квадратный сантиметр атмосферы проносится одно и тоже количество ионов. Положительные ионы движутся вниз, а отрицательные ионы движутся вверх. Однако у поверхности Земли существует ток направленный вверх и, начиная с определенного расстояния от земли, положительный ионный ток, идущий вниз будет больше тока идущего вверх ( $i^+ > i^-$ ). Приближаясь к Земной поверхности, плотность тока, идущего вверх ( $i^-$ ) уменьшается и на самой поверхности  $i^- = 0$ . Следовательно, у Земной поверхности весь ток обусловлен только потоком положительных ионов ( $i^+$ ). При неравенстве плотностей тока возникают *объемные заряды*, искажающие распределение поля. Это явление называется *электродным эффектом*. Электродный эффект имеет большое влияние на явления электрического поля в атмосфере, так как в слое, нарушенном электродным эффектом, напряженность поля будет не постоянной и требует сложного математического описания. Электрическое поле, обусловленное зарядом

Земли, уменьшается за счет объемных зарядов (что следует из формулы (3)) Заметим так же, что проводимость атмосферы увеличивается с высотой и в ней происходит непрерывное перемешивание слоев, поэтому объемные заряды распространяются на значительную ее толщину и напряженность поля медленно убывает [1].

Из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что отрицательно заряженная Земля и положительные объемные заряды-источники электрического поля атмосферы.

## **1.2 Глобальная атмосферная электрическая цепь**

В приземном слое атмосферы электрические характеристики тесно связаны с метеорологическими параметрами, которые в свою очередь определяются географическим расположением пункта, в котором производятся наблюдения. Метеорологические явления оказывают непосредственное влияние на количество и соотношение заряженных частиц в атмосфере. Такие характеристики электрического поля атмосферы, как напряженность поля ( $E$ ) и его потенциал ( $V$ ), зависят в основном от изменчивости проводимости атмосферы, а, следовательно, и от целого ряда метеорологических факторов: туманов, мглы, облаков, осадков, метелей, запыления и ионизации атмосферы как антропогенного, так и естественного происхождения. Основываясь на этих зависимостях, вводится понятие «хорошей погоды», соответствующей скорости ветра не более 3 м/с в отсутствии всякого рода осадков, инея, тумана, нижней облачности. При этих условиях существует так называемое электричество «хорошей погоды», когда вблизи земной поверхности формируется электрическое поле напряженностью около 150 В/м, вдоль которого в слабо проводящем воздухе течет электрический ток небольшой плотности [24].

Глобальную электрическую цепь (ГЭЦ) можно представить в виде распределенного токового контура, образованного проводящими оболочками нижней ионосферы, верхнего слоя океана и земной коры, которые «замкнуты» электрически проводящей атмосферой (Рисунок 1.2.1).

ГЭЦ состоит из множества твердых и газоплазменных слоев, обладающих непрерывностью плотности электрического тока, с грозвыми генераторами в качестве главных источников электродвижущей силы и невозмущенными областями свободной атмосферы, представляющими собой зоны возвратных токов.

Если представить систему Земля – ионосфера как сферический конденсатор, то, согласно гипотезе Вильсона, генераторами будут являться области гроз, которые обеспечивают зарядку этого конденсатора и определяют квазистационарное электрическое состояние невозмущенных областей атмосферы. Таким образом, ГЭЦ объединяет все слои геосферы в единую систему токов. Динамика этой системы определяется электрической стратификацией атмосферы, ионосферными неоднородностями, электрическими свойствами верхнего слоя океана и земной коры. Однако проблема существования ГЭЦ в стационарном состоянии сводится к задаче обеспечения баланса между выходными токами источников формирования ГЭЦ и возвратными токами областей нагрузки. [5]

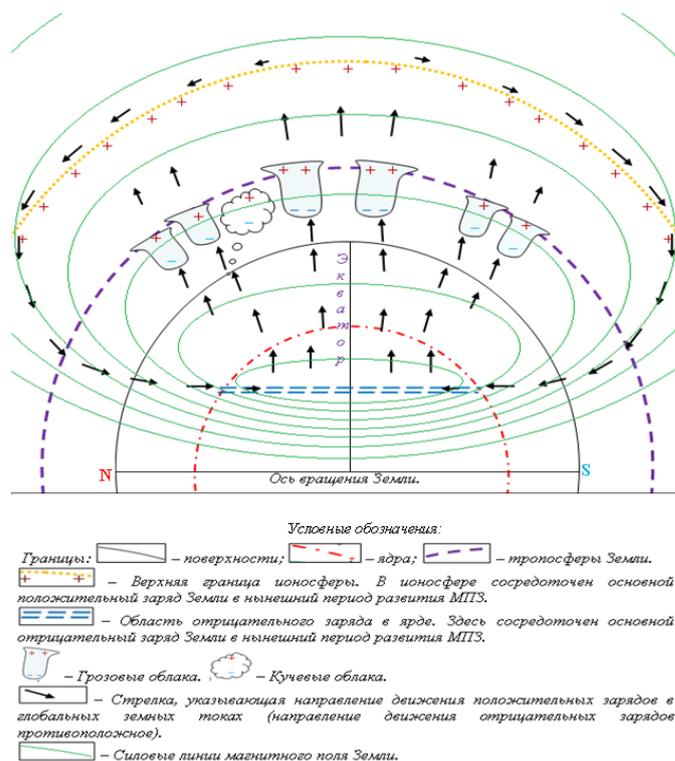


Рисунок 1.2.1—Направление глобальных земных токов в меридиональном сечении [25]

### 1.3 Временной ход атмосферно-электрических параметров

Характеристики атмосферного электричества подвержены систематическим периодическим изменениям, среди которых наибольший интерес представляют годовые и суточные. Вариациям подвержены все параметры атмосферного электричества: напряженность поля ( $E$ ), электропроводность воздуха ( $\lambda$ ), плотность вертикального электрического тока ( $i_{\text{П}}$ ), объёмная плотность электрического заряда ( $\rho$ ) [30]. Однако выражения (4) и (9) позволяют свести все изменения параметров в основном к годовым и суточным изменениям электропроводности воздуха и напряженности электрического поля.

Годовой ход напряженности и электропроводности электрического поля атмосферы оказывается различным в разных местах земного шара, так как напряженность сильно зависит от географического расположения

пункта наблюдений и локальных особенностей региона, в том числе и метеорологических параметров. В средних широтах северного полушария годовой ход напряженности поля простой - с одним максимумом зимой (декабрь-февраль) и минимумом летом (июнь - август). Так же заметим, что амплитуда годовых колебаний уменьшается от средних широт к более южным и к полярным областям [29]. Эти закономерные вариации можно выделить на фоне более значительных вариаций, обусловленных изменениями погоды, используя гармонический анализ.

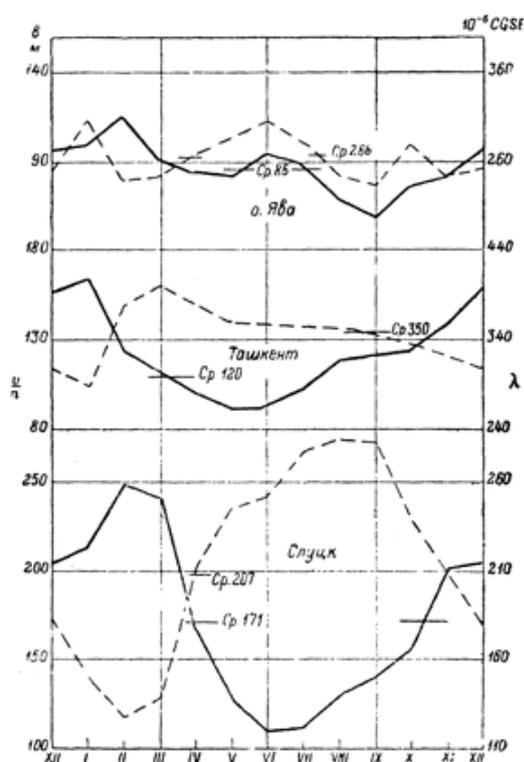


Рисунок 1.3.1— Годовой ход градиента потенциала в различных регионах (сплошная линия) и электропроводности (пунктирная линия) [29]

Суточный ход электропроводности атмосферы в меньшей мере зависит от солнечного времени и географического расположения, чем годовой, так как интенсивность космических лучей, являющихся главным источником ионизации в нижних слоях атмосферы, практически не зависит от положения Солнца. При таких условиях суточные вариации

зависят, в основном, от метеорологических параметров, а в частности: от степени запыленности воздуха, осадков, туманов и облачности. С увеличением запыленности воздуха увеличивается скорость разрядки аэроионов на частицах пыли, вследствие чего уменьшается концентрация этих ионов, а, следовательно, и электропроводность воздуха. Эта корреляция непосредственно подтверждается опытами над искусственным запылением воздуха, например, при зажигании сильно дымящих костров. При этом сразу же увеличивается напряженность электрического поля над рассматриваемой местностью [30].

Так же характеристики электрического поля отличаются для разных воздушных масс. Так как значение градиента потенциала косвенно зависит в том числе и от различных метеорологических параметров, возникает интерес в установлении зависимости электрического состояния атмосферы от вида воздушных масс. В первую очередь имеет смысл разделить воздушные массы по уровню радиоактивности, так как радиоактивность в большей мере влияет на образование ионов в атмосфере. Радиоактивность в воздушной массе зависит от места формирования, скорости передвижения, времени ее пребывания над континентом. Следовательно, данные будут различными для разных местностей. Наиболее точное приближение показано в таблице 1.3.1.

Таблица 1.3.1— Значение радиоактивности в различных воздушных массах с учетом их формирования (по Маркеловой)

Воздушная масса	Радиоактивность (в относ. един.)	Воздушная масса	Радиоактивность (в относ. един.)
Континентальный полярный воздух (КПВ)	760	КПВ-формирующийся в стационарном антициклоне над континентом	1290
Морской полярный воздух (МПВ)	370	КПВ-образовавшийся из других масс в результате трансформации их над континентом	630

Континентальный арктический воздух (КАВ)	340	МПВ-старый, находящийся над континентом более 3 суток	520
Морской арктический воздух (МАВ)	350	МПВ-свежий	290

В таблице 1.3.1 видно, что наибольшей радиоактивностью обладает континентальный полярный воздух, сформировавшийся в стационарном антициклоне над континентом. Высокое значение проводимости континентального полярного воздуха объясняется не только высокой радиоактивностью, но и низким значением влажности и стационарностью данной воздушной массы и антициклона.

Морской полярный воздух имеет меньшую радиоактивность, это объясняется его нестационарностью и повышенной влажностью.

Суточный ход электропроводности электрического поля атмосферы противоположен по фазе колебаниям напряженности, что является следствием из уравнения (9).

Наиболее прост и закономерен суточный ход напряженности поля над океанами, где он, оставаясь почти неизменным во времени года, имеет простой характер, с максимумом в 18-19 часов и минимумом в 3 часа по гринвичскому времени. То есть, над океанами на всей Земле значения градиента потенциала достигают максимумов и минимумов в одно и то же время. Эти изменения, протекающие по некоторому универсальному времени, называют *унитарной вариации*. Такой же по форме суточный ход наблюдается в далеких полярных областях и всюду на определенной высоте над уровнем земной поверхности выше слоя, нарушенного электродным эффектом. Нередко такой суточный ход наблюдается зимой и у земной поверхности в местах, расположенных на достаточно высоких широтах.

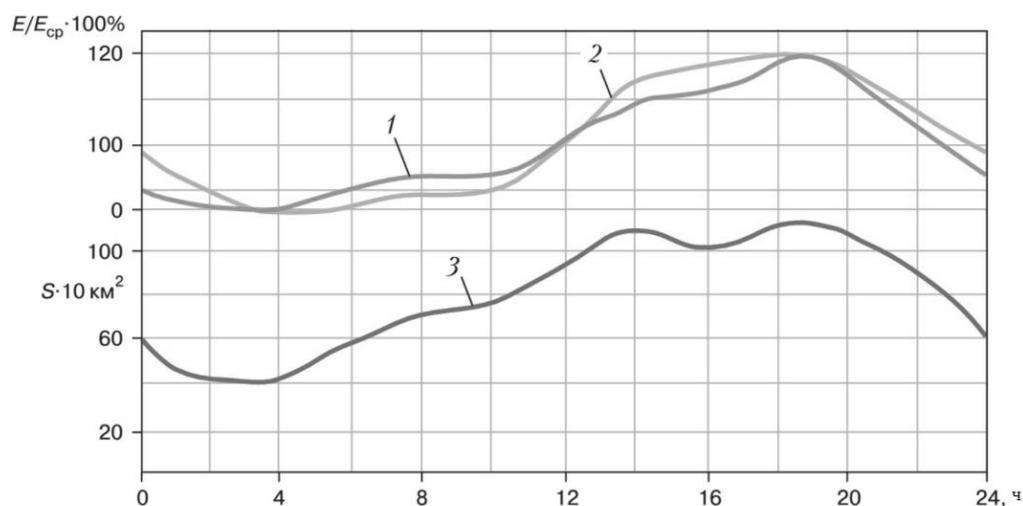


Рисунок 1.3.2—Суточный ход напряжённости  $E$  электрического поля атмосферы: 1 – над океанами; 2 – в полярных областях. 3 – Изменение площади  $S$ , занятой грозами, в течение суток [6].

Над поверхностью суши вблизи земной поверхности суточный ход более сложен. В большинстве случаев он имеет характер двойной волны с двумя максимумами и двумя минимумами, при том, что вторичные максимум и минимум наступают по местному времени. Главный минимум наблюдается в ранние утренние часы (3-5 часов), вторичный - после 12 часов, главный максимум вечером (18-22 часа), вторичный – до 12 часов. Время наступления суточных экстремумов смещается в зависимости от месяца, и сам вид кривой суточного хода в течение года сильно меняется. Летом особенно глубоким оказывается послеполуденный минимум.

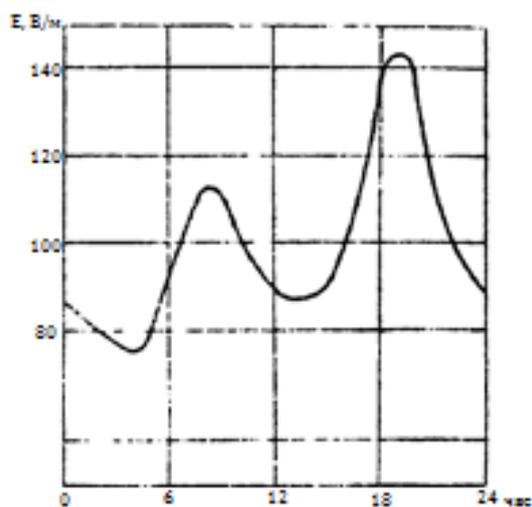


Рисунок 1.3.3— Суточный ход напряженности электрического поля у поверхности земли в Париже [29]

Анализ особенностей суточного хода атмосферно-электрических характеристик показал, что появление вторичных максимума и минимума над сушей обусловлено влиянием приземного слоя, а конкретно различных метеорологических параметров, приводящих к возрастанию либо уменьшению объемных зарядов и изменениям проводимости.

В итоге, суточный ход напряженности электрического поля над сушей (в приземном слое) можно представить как результат наложения на основной простой ход, наблюдаемый над океанами, который провоцируют общие для всего земного шара причины, тех колебаний поля, которые можно назвать местными. В зависимости от того, какие из указанных причин оказываются в данном месте в данный момент времени определяющими, изменяется и характер суточного хода напряженности электрического поля.[16]

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.

### 2.1 основные атмосферно-электрические параметры и методы их измерения

Основные наблюдения атмосферно-электрических характеристик включают в себя измерения основных параметров атмосферного электричества: напряженности электрического поля ( $E$ ), удельных полярных проводимостей воздуха ( $\lambda_+$  и  $\lambda_-$ ) и плотности полного вертикального электрического тока из атмосферы на землю ( $i$ ). Также при специализированных наблюдениях измеряют спектр ионов, их концентрацию, заряд частиц и плотность объемных зарядов в атмосфере.

При одновременном измерении всех этих характеристик становится возможным судить о процессах на данном участке атмосферно-электрической цепи, имеющих локальный характер, а также анализировать изменение параметров, общих для всего земного шара и выделить унитарной вариации напряженности поля.

#### 2.1.1 Измерение напряженности электрического поля

Измерение напряженности производится динамическим методом. Метод измерения основан на явлении электростатической индукции. Датчиком прибора для измерения напряженности динамическим методом служит металлическая пластина, которая состоит из трех секторов круга, соединенных между собой и укрепленных с помощью экранирующей металлической пластины, вращающейся асинхронным двигателем.

Экранирующая пластина открывает и закрывает измерительную пластину действию электрического поля атмосферы с частотой  $f$  [раз/с]. Измерительная пластина подключена через сопротивление  $R$  к земле, по

резистивно-емкостной нагрузке, через которую обычно воспринимающий элемент связан с землей, течет переменный электрический ток  $i$ , значение которого прямо пропорционально значению величины  $E$ , а фаза определяется направлением  $E$ .

$$i = \pm \frac{ESf}{4\pi} \quad (12)$$

Где:  $S$  — площадь пластины

Этот ток преобразуется в напряжение, пропорциональное значению напряженности поля со знаком, определяемым направлением напряженности поля:

$$U = R \cdot \frac{ESf}{4\pi} = R \cdot i \quad (13)$$

Следовательно, измеряя напряжение с помощью лампового вольтметра можно определить напряженность электрического поля  $E$

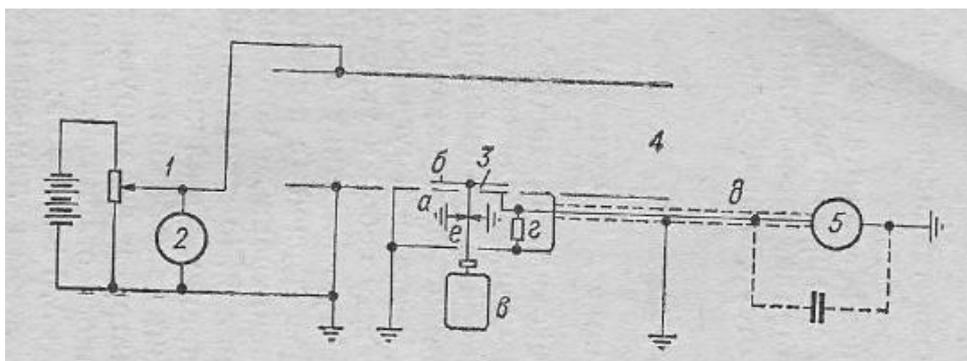


Рисунок 2.1.1— установка для измерения напряженности поля динамическим методом.

(1-потенциометр; 2-электростатический вольтметр; 3-датчик прибора; 4-конденсатор; 5-ламповый вольтметр;  $r$ -сопротивление) [15]

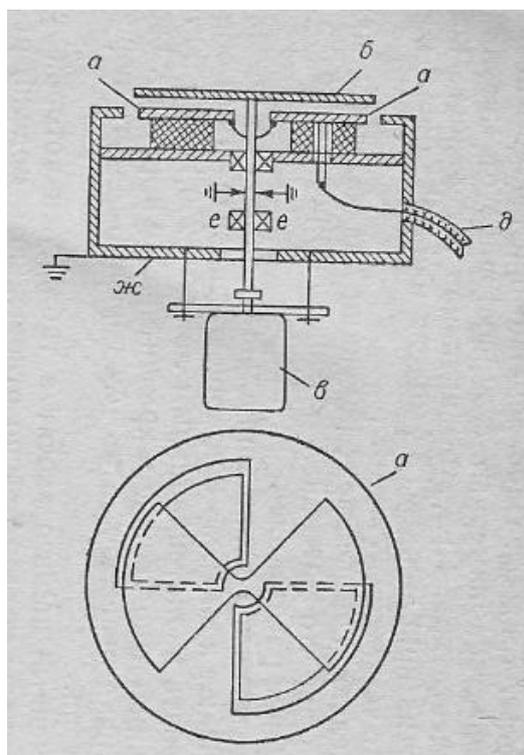


Рисунок 2.1.2—Схема датчика прибора для измерения напряженности поля динамическим методом [15]

(а-металлическая измерительная пластина; б-экранирующая металлическая пластина; в-асинхронный мотор; д-экранирующий кабель; е- угольные щетки; ж-экранирующий корпус)

### 2.1.2 Измерение полярных электропроводностей

Для измерения величин  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$  используют аспирационный метод. Этот метод заключается в измерении спада напряжения изолированного заряженного тела, а спад напряжения во времени, в свою очередь, зависит от проводимости атмосферного воздуха.

По оси наружного цилиндрического конденсатора располагается внутренний цилиндрический электрод (рассеивающее тело), который закреплен на входном изоляторе электрометра. На одной из обкладок аспирационного измерительного конденсатора, к которой приложено напряжение, осаждаются ионы из потока воздуха. Электрическое поле, которое создается между обкладками конденсатора, отклоняет ионы к

внутреннему электроду. Попадая на поверхность электрода, ионы отдают свой заряд, изменяя напряжение электрода от начального значения  $U_0$  до напряжения  $U_\tau$  по истечению времени аспирации. Измеряя падение напряжения на электроде, производят измерение тока ионов, который пропорционален измеряемой полярной электрической проводимости воздуха [35].

Удельную электрическую проводимость определяют расчетным путем по данным измерения потенциала:

$$\lambda_{\pm} = \frac{1}{4\pi\tau} \frac{C + C_{\text{Э}}}{C} \ln \frac{U_0}{U_\tau} \quad (14)$$

Где:  $\tau$  – время измерения;

$C$  – емкость электрода (рассеивающего тела);

$C_{\text{Э}}$  – емкость электрометра и держателя;

$U_0$  – потенциал, определенный по электрометру в начале измерения;

$U_\tau$  – напряжение, измеренное в конце измерения.

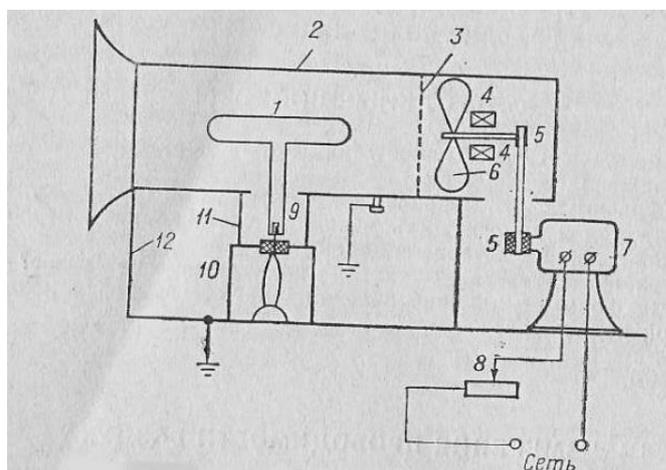


Рисунок 2.1.3— схема аспирационного конденсатора

(1-рассеивающее тело; 2-наружная трубка; 3-сетка, создающая равномерный поток воздуха; 4-потшипники; 5-шкифы; 6-вентилятор; 7-коллекторный электрод; 8-потенциометр; 9-держатель; 10-электрометр; 11-экран; 12-каркас) [15]

### 2.1.3 Измерение вертикальной составляющей напряженности электрического поля на открытой площадке

Измерения величины  $E_p$  проводят для определения редуционного множителя. Редуционным множителем ( $R$ ) называется отношение напряженности  $E_p$  электрического поля атмосферы у совершенно плоской поверхности земли к измеряемой напряженности  $E$  электрического поля атмосферы с учетом нарушения электрического поля препятствиями.

Редуционный множитель определяют по данным измерений величины напряженности на специально выбранной открытой площадке, проводимых дополнительно с измерениями вертикальной составляющей напряженности электрического поля или одновременно с ней [24].

Редуционный множитель вводят при обработке данных измерений вертикальной составляющей напряженности электрического поля. Учет редуционного множителя необходим при сопоставлении значений напряженности в разных местах или во времени, если обстановка в окрестности датчика напряженности (расположение кустов, деревьев, строений и т.п.) меняется на протяжении времени.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что редуционный множитель нужен для приведения измеренной напряженности электрического поля к равнинным условиям, путем умножения  $E$  на  $R$ .

$$E_p = R \cdot E \quad (15)$$

Измерения величины  $E_p$  проводят с помощью переносных средств измерения проводимостным (метод коллекторов) или динамическим методами.

При использовании метода проводимости применяют коллекторную установку с электростатическим вольтметром. Радиоактивный коллектор

выравнивает потенциал благодаря ионам, образующимся вокруг него под действием радиоактивных излучений. Эти ионы соответствующего знака снимают с коллектора свободный заряд, в то время как ионы противоположного знака повышают проводимость воздуха вокруг коллектора.

Для динамического метода используют преобразователь «Поле-2», средство измерения напряжения на выходе преобразователя и источник напряжения для питания калибратора преобразователя «Поле-2».

Для проведения измерений величины  $E_p$  выбирается площадка с ровной поверхностью вдали от зданий, деревьев, кустов и других предметов, нарушающих однородность электрического поля.

#### 2.1.4 измерение полярных концентраций легких ионов

Спектр ионов представляет собой распределение концентраций ионов различной подвижности. Для измерения спектра ионов наиболее часто применяется метод снятия ионных характеристик с помощью счетчика ионов, работающего на принципе аспирационного цилиндрического конденсатора. Датчиком счетчика ионов в данной установке является аспирационная ионная камера, через которую с помощью мотора прокачивается воздух для исследования. На поступающие вместе с воздухом ионы действует электростатическое поле, которое отклоняет их к внутреннему электроду. Ионы оседают на электроде в течение всего времени накопления заряда. По окончании времени накопления (минимум 4 секунды), электрический заряд через ключ разряжается на входное сопротивление усилителя. Усиленный импульс преобразуется и измеряется.

Для непрерывной регистрации концентраций положительных и отрицательных аэроионов используется счетчик ионов «Сапфир-3К»,

который предназначен для измерения концентраций ионов скоростей  $k \geq 0,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$

### 2.1.5 измерение концентрации радона-222

Радон-222– Инертный радиоактивный газ. В атмосферу он попадает из почвы и вод. На уровне моря 1 л воздуха содержит над материками в среднем около 200 атомов радона, над открытым океаном — около 30 атомов. [23]

Измерения концентрации радона-222 в воздухе осуществляются с помощью радиометра объемной активности радона-222 AlphaGUARD на уровнях 0,05; 0,3; 0,6; 1; 2; и 3 метра от поверхности земли. Радонометр работает по методу ионизационной камеры. Благодаря специальному фильтру в прибор обеспечивает попадание внутрь камеры радиоактивного изотопа  ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ , задерживая другие изотопы, влагу и пыль. При организации градиентных измерений концентрации радона-222 на каждой высоте осуществляется интенсивная прокачка воздуха для осуществления быстрого забора пробы воздуха с нужного уровня атмосферы. Далее исследуемый воздух проникает в ионизационную камеру, что дает возможность измерить среднюю объемную активность радона за некоторый относительно небольшой интервал времени. Для синхронизации измерений полярных электропроводностей и концентрации радона прибор настроен так, что осреднение объемной активности радона-222 по времени осуществляется датчиком с десятиминутными интервалами. [28]

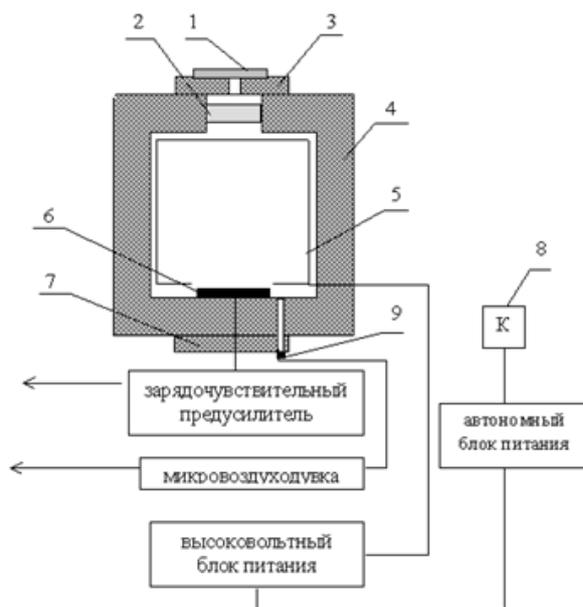


Рисунок 2.1.4— Блок-схема радиометра

(1 – осушитель; 2 – аэрозольный фильтр; 3 – входной фланец; 4 – корпус измерительной камеры; 5 – электрод измерительной камеры; 6 – детектор; 7 – выходной фланец; 8 – климатическая камера; 9 – штуцер.)

#### 2.1.6 измерение плотности вертикального тока.

Для измерения плотностей полного тока ( $i$ ) и тока механического переноса из атмосферы на землю ( $i_{mn}$ ) используют метод пластины

В качестве датчиков используются две круглые дюралюминиевые пластины площадью около  $2 \text{ м}^2$ , покрытые дерном без травостоя. Пластины устанавливают в вырезе заземленных охранных колец, для того, чтобы избежать значительного искажения напряженности электрического поля. Пластина для измерения плотности тока механического переноса экранируется от электрического поля атмосферы заземленной медной сеткой размером  $1 \times 1 \text{ м}^2$  с ячейками  $4 \times 4 \text{ см}^2$ , которая устанавливается на высоте 20 см над пластиной. По медным струнам, закрепленным внутри заземленного экрана на фторопластовых изоляторах, сигнал передается от пластин к измерительным приборам (вольтметр-электрометр В7-30).

Поскольку непосредственно измеренная плотность полного тока ( $i$ ) представляет собой в данных условиях сумму плотности тока проводимости ( $i_\lambda$ ) и плотности тока механического переноса ( $i_{мп}$ ) из атмосферы на землю. [28]

$$i = i_\lambda + i_{мп} \quad (16)$$

Тогда плотность тока проводимости на земную поверхность можно подсчитать как:

$$i_\lambda = i - i_{мп} \quad (17)$$

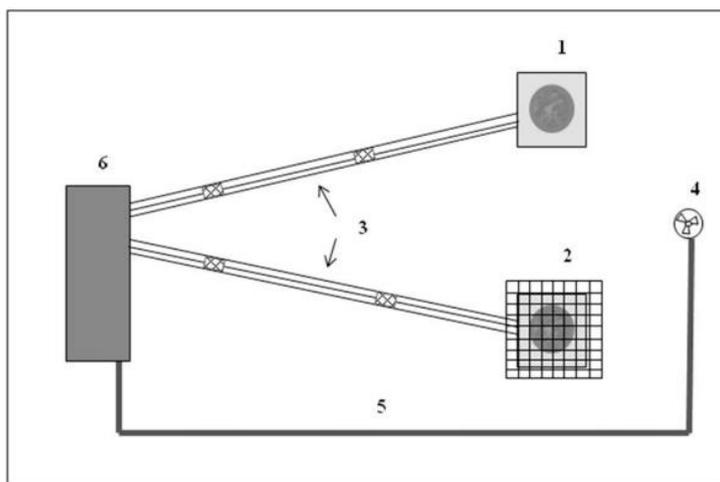


Рисунок 2.1.5— Схема размещения датчиков установки для измерения вертикальных электрических токов

( 1 – пластина для измерения плотности полного тока; 2 – пластина для измерения плотности тока механического переноса; 3 – экранированный соединительный провод; 4 – флюксметр; 5 – соединительный кабель флюксметра; 6 – навес для измерительных и регистрирующих приборов)

Методы измерения параметров атмосферного электричества в основном основаны на индуцировании заряда на электроде (металлической пластине, индукционном кольце, металлическом шаре или антенне). В зависимости от того, какая характеристика измеряется конструкции приборов, и подключения элементов схем отличаются. Большая часть приборов, измеряющих параметры атмосферного электричества имеют в своей конструкции камеру Вильсона или аспирационный конденсатор. Метод Вильсона является наиболее универсальным для измерения таких характеристик, как напряженность электрического поля ( $E$ ), полярные проводимости ( $\lambda_{\pm}$ ) и вертикальная составляющая электрического тока ( $i$ ). По принципам аспирационного конденсатора работают приборы для измерения спектра ионов ( $n$ ), так как устройство аспирационного конденсатора позволяет наиболее точно произвести сортировку ионов по подвижностям. Приборы, в основе которых лежит аспирационный конденсатор так же позволяют измерить вертикальный ток ( $i$ ) и полярные проводимости ( $\lambda_{\pm}$ ). Параметры грозового электричества требуют специальных методов и приборов для измерения, так как электрическое поле при грозовой деятельности претерпевает сильные и быстрые изменения.

## **2.2 измерительный комплекс.**

Измерение напряженности электрического поля и полярных удельных электропроводностей производится непрерывно с помощью измерительных преобразователей и средств измерений, которые устанавливаются стационарно.

Измерение величины напряженности электрического поля на открытой площадке ( $E_p$ ) производят 1 раз в квартал (зимой, весной, летом и осенью) на специализированной открытой площадке с помощью

переносных средств измерений, в пределах охранной зоны сетевой наблюдательной организации [24].

Для проведения измерения параметров атмосферного электричества используют:

1) Измерительные преобразователи величин атмосферного электричества в напряжение постоянного тока.

Таковыми измерительными преобразователями служат преобразователи «Поле- M2» и «Электропроводность- M2». В состав преобразователей входят выносные первичные преобразователи. Преобразователи являются не стандартизованными техническими средствами с нормативными метрологическими характеристиками.

Преобразователь «Поле-M2» имеет 2 измерительных канала: первый для измерения  $E$  в диапазоне от  $-500$  до  $+500$  В/м, второй для измерения  $E$  в диапазоне  $\pm 5000$  В/м. На рисунке 2.2.1 представлен общий вид измерителя «Поле-M2».



Рисунок 2.2.1—Общий вид измерителя «Поле-M2».

1-выносной блок; 2-блок питания и сопряжения; 3-контрольное устройство [9].

Преобразователь "Электропроводность-2М" имеет 2 измерительных канала: первый для измерения величины  $\lambda_+$  второй для измерения величины  $\lambda_-$ . На рисунке 2.2.2 представлен общий вид преобразователя «Электропроводность-2М».

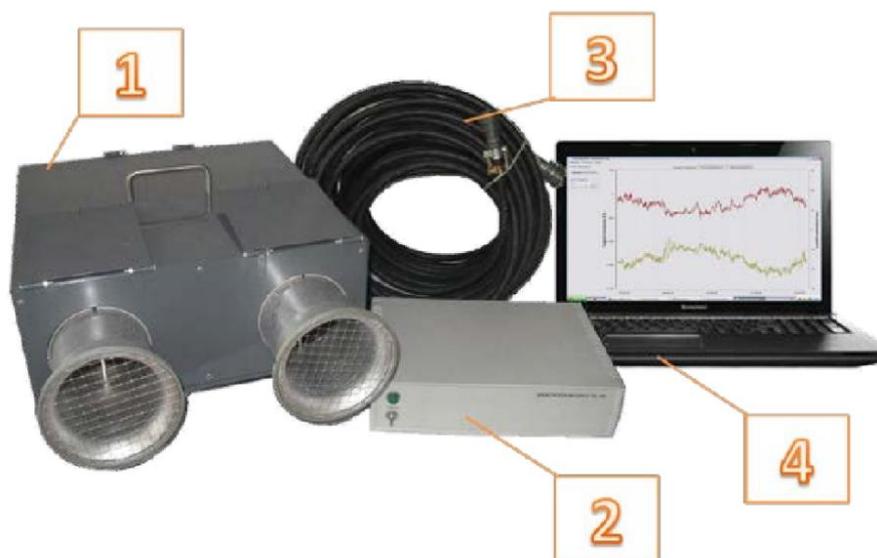


Рисунок 2.2.2— общий вид преобразователя «Электропроводность-2М».

1-блок аспирационных измерительных конденсаторов; 2-блок питания и сопряжения; 3-сигнальный кабель; 4-ПК с установленным СПО [9].

2) Регистратор напряжения на выходах измерительных преобразователей.

В качестве регистратора напряжения в преобразователях "Поле-2" и "Электропроводность-2" используется потенциометр автоматический КСП-4 со шкалой  $\pm 10$  мВ.

3) Устройство согласования выходных цепей измерительных преобразователей и входной цепи регистратора.

В качестве устройства согласования выходных цепей преобразователей и входной цепи потенциометра КСП-4 используют делитель напряжения.

4) Средства измерений напряжения на выходах измерительных преобразователей.

Как средство измерения напряжения постоянного тока на выходах преобразователей "Поле-2" и "Электропроводность-2" используют цифровой вольтметр.

5) Источник напряжения постоянного тока для питания калибраторов измерительных преобразователей.

В качестве источника напряжения используют источник стабилизированного напряжения постоянного тока Б5-32.

Преобразователи, регистратор, устройство согласования, цифровой вольтметр и источник напряжения объединены в одну измерительную систему, общая схема которой представлена на рисунке 8.

6) Вспомогательные средства измерений.

7) Измерительные принадлежности.

Для определения напряженности атмосферного электрического поля на уровне земли в измерительном комплексе используется электростатический флюксметр системы «Поле-2». Напряженность электрического поля преобразуется в электрический ток с помощью ротационного электростатического генератора, в основу которого положено явление электромагнитной индукции. Предел измерения градиента потенциала  $\pm 500$  В/м для первого канала,  $\pm 5000$  В/м для второго канала. На рисунке 2.2.3 представлена схема размещения датчиков на измерительной площадке.

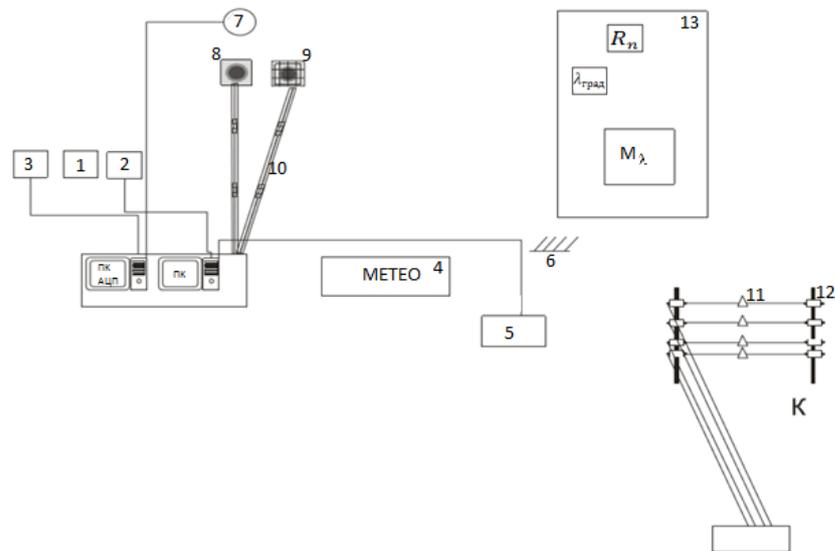


Рисунок 2.2.3—Схема размещения датчиков на измерительной площадке

(1- радонометр «AlphaGUARD»; 2- счетчик ионов «Сапфир-3К»; 3- «Электропроводность 2»; 4- площадка для измерения метеоэлементов (психрометры Ассмана; чашечные анемометры; крыльчатые анемометры); 5- цифровая метеостанция М49-М; 6- почвенные термометры Савинова; 7-электростатический флюксметр «Поле-2»; 8-пластина для измерения плотности полного тока; 9-пластина для измерения плотности тока механического переноса; 10-экранированный соединительный провод; 11-радиоактивный коллектор; 12-эбонитовый изолятор; К-коллекторная установка ; 13-площадка для прибора Гердиена, системы Литвинова и радонометра «AlphaGUARD») [28]

На рисунке 2.2.4 представлена Блок-схема измерительной системы параметров атмосферного электричества.

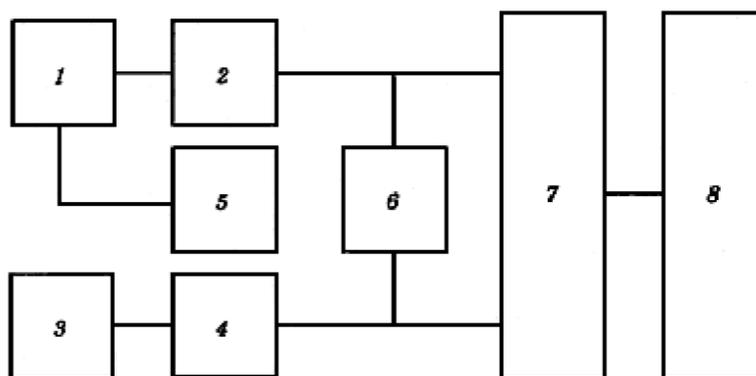


Рисунок 2.2.4— Блок-схема измерительной системы параметров атмосферного электричества

(1 - датчик преобразователя "Поле-2"; 2 - центральный блок преобразователя "Поле-2"; 3 - датчик преобразователя "Электропроводность-2"; 4 - центральный блок преобразователя "Электропроводность-2"; 5 – источник напряжения Б5-32; 6 – цифровой вольтметр Щ1413; 7 - делитель напряжения; 8 - потенциометр КСП-4)

## ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ СУТОЧНОГО И ГОДОВОГО ХОДА АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

### **1.3 Метеорологические особенности арктического региона и их влияние на атмосферно-электрические параметры атмосферы**

В целом полярный климат (Арктика и Антарктика) характеризуется крайне низкими температурами воздуха и поверхности земли, неравномерным поступлением солнечного тепла в течение года, значительной площадью покрытия льдом и снегом. Обмен теплом и влагой между этими компонентами системы сильно влияет на полярный климат. Он обеспечивает высокие потери тепла на излучение, которые помогают сохранять холодные температуры поверхности, снежный и ледяной покров, изолирующий холодную атмосферу от более теплого океана.

На нижние слои атмосферы в Арктике в значительной степени влияет поверхность Северного Ледовитого океана - зимой поверхность замерзает, воздух над океаном (с температурой от  $-5$  до  $-40$  °C) изолирован от температуры океана (от  $0$  до  $-2$  °C) ледяным покровом. Воздух над льдом постоянно находится в насыщенном состоянии. В пограничном слое над льдом регулярно наблюдаются инверсионные слои, так как поверхность холодная, а температура увеличивается примерно до высоты  $1$  км. Температура выше  $1$  км снижается с высотой, при этом наименьшая потенциальная температура составляет приблизительно  $-40$  °C.

Летом ледяная поверхность тает, а температура воздуха почти одинакова и составляет около  $0$  °C.

Воздух в пограничном слое близок к насыщению благодаря районам открытого океана и таянию снега и льда, поэтому летом наиболее часто наблюдается слоистая облачность с обложными осадками. [2]

Циркуляционный режим над Арктикой формируется под влиянием термического режима подстилающей поверхности, Исландского минимума и Алеутской депрессии, сезонного антициклогенеза над Сибирью и Канадой.

В западном секторе Арктики во все сезоны года преобладает циклоническая деятельность. Отдельные циклоны с Атлантики могут пересекать Арктический бассейн и достигать побережья Канады и Аляски. В восточном секторе Арктики преобладает антициклоническая деятельность. Адвекция теплых воздушных масс из Алеутского минимума в восточный сектор Арктики наблюдается редко и не проникает так далеко на север, как это наблюдается в западном секторе Арктики при адвекции тепла с Атлантического океана. Арктический фронт, в том числе и его Азиатская ветвь, существенно перемещаются в пространстве от зимы к лету. Летом его Азиатская ветвь располагается вдоль побережья Северного Ледовитого океана, и циклоническая деятельность на этой ветви арктического фронта практически уже не влияет на центральные районы Сибири.

Основным тропосферным образованием во все сезоны года над Арктическим бассейном является циркумполярный вихрь, сменяющийся летом в стратосфере полярным стратосферным антициклоном. Эти образования, особенно циркумполярный вихрь (ЦПВ), являются своеобразными дирижерами в сезонных преобразованиях планетарных высотных фронтальных зон в северном полушарии, и, следовательно, оказывают непосредственное влияние на сезонную структуру термобарического поля в тропосфере [31].

Исследования характеристик атмосферного электричества в арктической зоне интересно тем, что Арктический регион не возмущен континентальными объемными зарядами, конвективными движениями и загрязнениями, связанными с производственной деятельностью. Так же

эффект от различного рода антропогенных и естественных воздействий на ионосферу сильнее проявляется по направлению силовых магнитных линий, которые сконцентрированы на полюсах [8].

### 3.2 Выбор анализируемой станции

На данный момент на территории России существует 10 пунктов наблюдения за электрическими характеристиками атмосферы. В 2014-2015 гг. в связи с возросшим интересом к геофизическим исследованиям в Арктической зоне были открыты пять новых пунктов наблюдения.

На рисунке 3.2.1 предоставлена карта расположения пунктов наблюдения за параметрами электричества атмосферы.



Рисунок 3.2.1– карта расположения пунктов наблюдения за электрическими характеристиками атмосферы [8].

В полярном регионе функционируют четыре станции, выполняющие атмосферно-электрические наблюдения: Зашеек, Диксон, ГМО Тикси и НИС «ЛБ Мыс Баранова». Станции Диксон, ГМО Тикси и НИС «ЛБ Мыс Баранова» можно считать схожими по географическому положению и

климатическим условиям. Все они располагаются в прибрежной зоне и сильно удалены от промышленных районов. На станции Заешек большой вклад в изменение электрических параметров вносит антропогенный фактор, так как станция располагается в непосредственной близости от поселка с преимущественно печным отоплением, поэтому данная станция в работе не рассматривается.

Виду схожего расположения станций и приборов на них можно предположить, что значения напряженности электрического поля на всех трех станциях будут схожи при прочих равных условиях.

Для анализа параметров атмосферного электричества была выбрана станция Диксон. Станция расположена на острове Диксон и имеет координаты:  $73^{\circ}30'$  с.ш.  $80^{\circ}14'$  в.д. С 1933 года на станция реорганизована в геофизическую обсерваторию, на которой производятся метеорологические, аэрологические, геомагнетические, актинометрические и гидрологические измерения, а также измерения параметров атмосферного электричества.



Рисунок 3.2.2—метеостанция Диксон (Автор: Гаськов Денис Сергеевич.  
Источник: <https://goarctic.ru/work/severnee-73-y-shirot/>)

На станции блоки измерителей «Поле-2М» и «Электропроводность-2М» (Рисунок 3.2.3) располагаются на крыше метеостанции на высоте 5-6 метров над уровнем земли. Измерители входят в состав атмосферно-электрического измерительного комплекса (АЭИК), разработанный главной геофизической обсерваторией им. А.И. Воейкова в 2013 году.



Рисунок 3.2.3—Установка выносимых блоков измерителей «Поле-2М» и «Электропроводность-2М» на метеостанции Диксон [8].

### **3.3 Зависимость между электрическим полем и метеорологическими характеристиками атмосферы**

В приземном слое атмосферы электрические характеристики тесно связаны с метеорологическими факторами, которые в свою очередь определяются географическим расположением пункта наблюдений. Метеорологические явления оказывают влияние на количество и соотношение заряженных частиц в атмосфере. Такие характеристики электрического поля атмосферы, как напряженность поля и его потенциал, зависят от изменчивости проводимости атмосферы, а, следовательно, от целого ряда факторов: туманов, мглы, облаков, осадков, метелей, запыления и ионизации атмосферы как антропогенного, так и естественного происхождения.

Связь с отдельными метеорологическими величинами является скорее косвенной, и зависит от того, как те или иные величины влияют на распределение объемных зарядов в атмосфере. Поэтому возможно установить лишь статистически известные связи. Например: более высокие значения напряженности наблюдаются при высоком давлении, при низкой температуре (что связано с увеличением плотности воздуха и уменьшением проводимости) и при уменьшении относительной влажности воздуха. Значения скорости и направления ветра влияют на перенос отрицательно заряженных частиц, что всегда понижает градиент потенциала. На значение напряженности электрического поля у поверхности земли большое влияние оказывает облачность. Считается, что наибольшее влияние на напряжённость оказывают облака нижних ярусов, которые уменьшают градиент потенциала ( $\frac{\partial V}{\partial n}$ ) и даже меняют знак напряженности поля.

Так как зависимость напряженности электрического поля у земли от метеорологических явлений очень велика и разнообразна, перед метеорологами стоит задача измерения среднего значения градиента  $\frac{\partial V}{\partial n}$  и его суточного и годового хода.

### **3.3.1 Анализ годового хода напряженности поля**

По средним за час значениям напряженности, полученных со станции Диксон (Приложение 1), был построен график годового хода напряженности электрического поля атмосферы. На рисунке 3.3.3 представлен годовой ход напряженности электрического поля атмосферы.

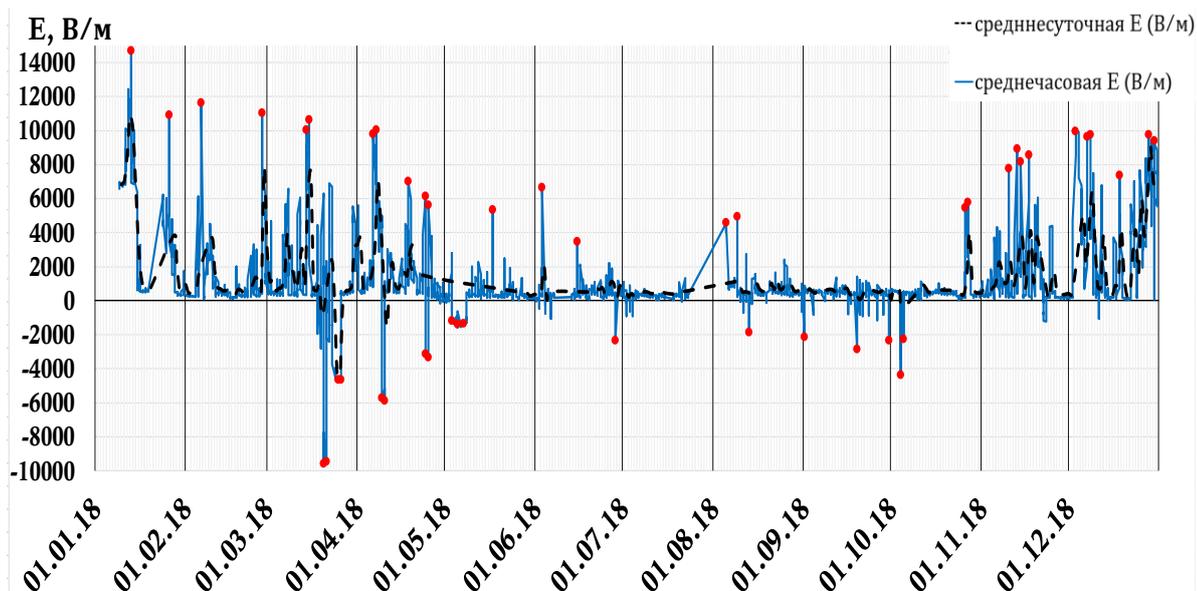


Рисунок 3.3.3-годовой ход напряженности электрического поля атмосферы в период с 9.01.2018 до 31.12.2018г.

Чёрным пунктиром обозначено среднесуточные значения напряженности, синей сплошной линией-среднечасовые значения, красными маркерами обозначены среднечасовые значения во много раз больше (меньше) по модулю медианальных значений в каждом месяце.

Годовой ход имеет сложную структуру в основном из-за того, что колебания градиента потенциала тесно связаны с изменением различных метеорологических элементов, а также локальных и географических особенностей региона. На графике видно, что наибольшие значения напряженности наблюдаются с января по май и с конца октября по декабрь. В холодный период года значения напряженности имеют разброс от  $E = -9591$  В/м до  $E = 14678$  В/м. Повышенные значения напряженности поля в холодный период года можно объяснить явлением арктической дымки, вызванному переносом аэрозольных частиц из средних широт в Арктический регион в холодное полугодие. Так же в зимний период года погодные условия значительно хуже, чем в тёплый из-за большого количества метелей, обложных и ливневых осадков, поэтому в холодный

период года зависимость значений напряженности поля от метеорологических факторов наибольшая.

Наименьшие значения соответственно в теплый период года с июня по октябрь, их разброс составляет от  $E = -5890$  В/м до  $E = 10023$  В/м. Понижение значений напряженности в теплый период года объясняется повышенной интенсивностью ионообразования за счет почвенных радиоактивных газов, что значительно увеличивает проводимость воздуха и уменьшает напряженность поля [8].

Проиллюстрируем зависимость вариаций напряженности электрического поля от метеорологических явлений с помощью ящичной диаграммы (Рисунок 3.3.1)

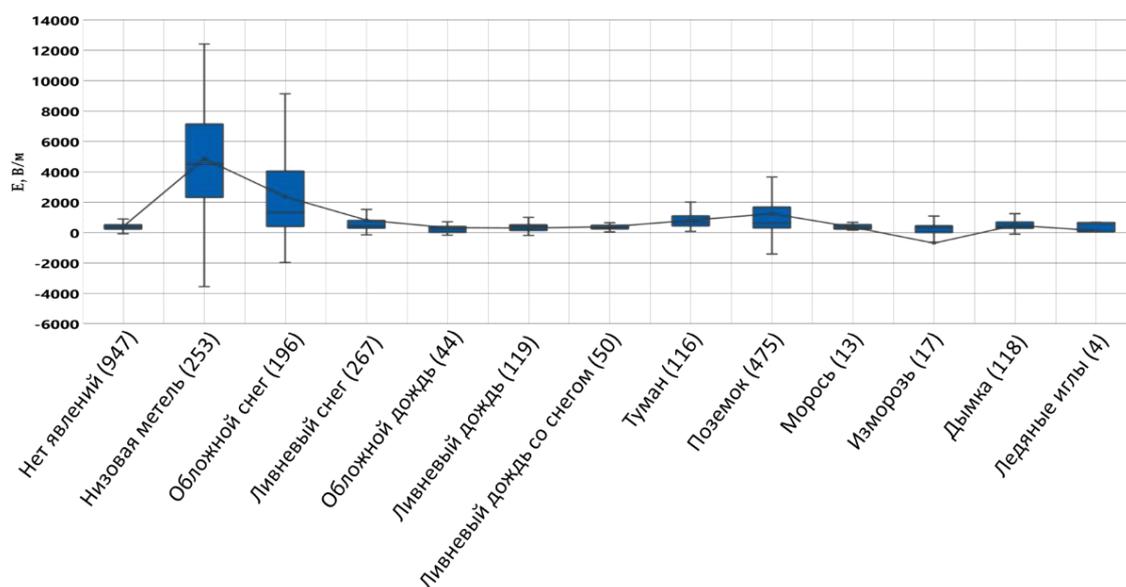


Рисунок 3.3.1–Вариации  $E$  при различных метеорологических явлениях по данным изменений со станции Диксон 2018г.

На рисунке 3.3.1 представлена ящичная диаграмма, построенная по данным о фактической погоде и средним за час значениям напряженности поля на станции Диксон (Приложения 1, 2). Нижняя граница ящика соответствует 25-й перцентили. Верхняя граница ящика соответствует 75-й перцентили. Черная горизонтальная полоса посередине ящиков — это медиана значений напряженности поля (50-ый перцентиль), а черный

крестик — среднее значение напряженности поля при данном явлении погоды. Прямые вертикальные линии, исходящие из ящика, обозначают степень разброса (дисперсии) за пределами верхнего и нижнего квартилей, на границах этих линий максимальное и минимальное значения напряженности поля при данном метеорологическом явлении. По горизонтальной оси отложены наблюдаемые метеорологические явления, в скобках отмечено количество случаев наблюдаемого явления.

Из диаграммы видно, что при отсутствии явлений погоды значения напряженности группируются около 240-500 В/м. Похожее распределение прослеживается мороси, дымке, ливневом дожде и ливневом дожде со снегом. Схожий разброс значений при ливневом дожде, ливневом дожде со снегом и отсутствии явлений можно объяснить кратковременностью ливневых осадков, а также небольшим объемом выборки наблюдаемых явлений.

При обложном снеге и низовой метели наблюдается наибольший разброс значений, так как данные явления имеют среднюю продолжительность от 10–12 часов и способствуют переносу и накоплению зарядов разных знаков с различной интенсивностью.

При наличии жидких осадков значения напряженности группируются около 17-390 В/м при обложном дожде и 140-500 В/м при ливневом. Наибольшие средние значения напряженности отмечены при низовой метели, обложном снеге и поземке так как при взвихривании снежной пыли в воздухе может возникать объемный заряд до  $1^{-8}$  кулон  $\text{м}^3$  [34], что существенно влияет на результаты измерений. Отрицательное среднее значение напряженности наблюдается при изморози, так как в образующимся ледяном слое, происходит накопление преимущественно отрицательного заряда [34].

На значения градиента потенциала так же влияет скорость и направление ветра. В первую очередь ветер влияет на перенос

отрицательно заряженных частиц, что всегда понижает градиент потенциала.

Чтобы оценить влияние направления и скорости ветра на напряженность поля и выявить локальные источники аэрозольного загрязнения атмосферы, выделим синоптические сроки, в которые не наблюдалось погодных явлений и построим лепестковую диаграмму по данным направления ветра и значений напряженности поля на станции Диксон (Приложение 1,3).

Таблица 3.3.1—усредненные по направлениям ветра значения напряженности электрического поля.

Направление ветра \ Скорость ветра	Холодное полугодие		Теплое полугодие	
	<5 м/с	≥5 м/с	<5 м/с	≥5 м/с
С	389	333	389	520
ССВ	375	484	375	438
СВ	379	466	649	606
ВСВ	395	297	441	492
В	370	529	370	569
ВЮВ	272	400	272	630
ЮВ	332	754	332	347
ЮЮВ	373	661	373	461
Ю	408	594	359	380
ЮЮЗ	341	877	386	469
ЮЗ	352	940	352	320
ЗЮЗ	507	1059	507	370
З	310	411	310	469
ЗСЗ	333	731	333	841
СЗ	402	890	402	177
ССЗ	331	254	478	411

На рисунке 3.3.2 представлено распределение напряженности электрического поля по 16 октантам направлений ветра для теплого и холодного полугодий в дни без явлений погоды и низкой облачности.

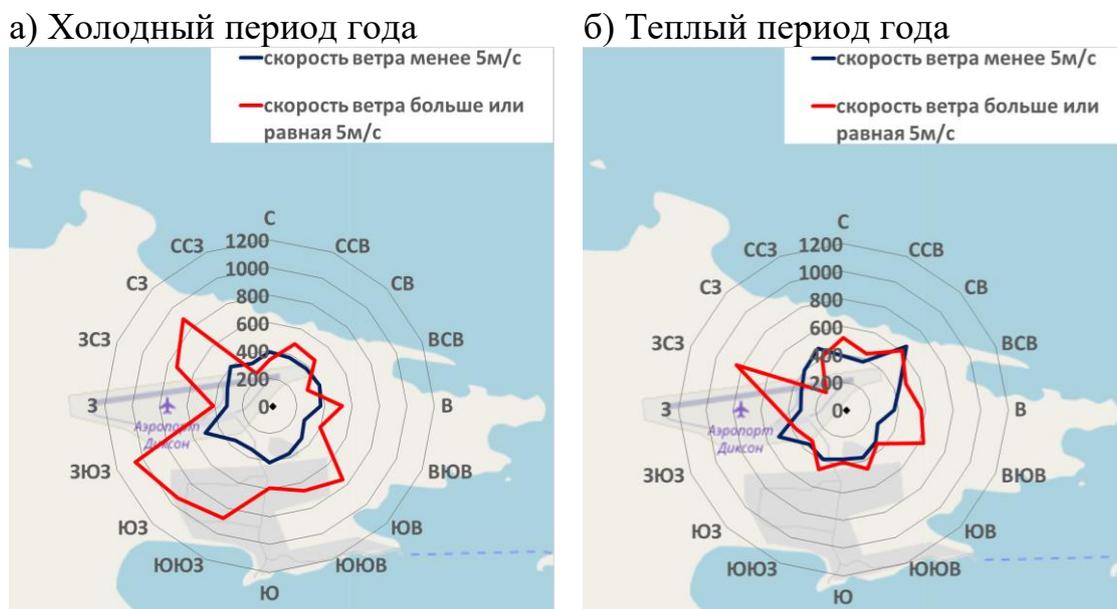


Рисунок 3.3.2 – Распределение значений напряженности поля при различных направлениях ветра и скоростях ветра менее 5 м/с (синий) и более или равных 5 м/с (красный) в холодный(а) и теплый(б) периоды года.

При слабом ветре, средние значения напряженности что в холодное, что в теплое полугодие практически одинаковы и не зависят от направления ветра. В холодное полугодие  $\bar{E} = 367 \text{ В/м}$ , в теплое полугодие  $\bar{E} = 395 \text{ В/м}$ . В холодное полугодие при сильном ветре наблюдаются более высокие средние значения напряженности поля ( $\bar{E} \approx 254-1059 \text{ В/м}$ ). Значения напряженности почти в 1,5 раза выше, значений, наблюдаемых в теплое полугодие, а также больше амплитуда изменчивости значений. Максимальные значения напряженности наблюдаются в ЮЗ, СЗ и ЮВ секторах. В теплое полугодие, при сильном ветре значения напряженности ниже, чем в холодное полугодие. Значения напряженности поля меняется в диапазоне от 170 до 850 В/м. Максимальные значения напряженности

поля наблюдаются при сильном ветре в ЗСЗ секторе, а также в ВЮВ секторе.

Для анализа влияния метеорологических факторов на годовой ход напряженности были отобраны метеорологические сроки, соответствующие максимальным по модулю отрицательным и положительным напряженностям электрического поля атмосферы (по данным из приложений 1, 2, 4). На графике годового хода эти сроки отмечены красными маркерами. Из анализа были исключены экстремумы связанные и поломкой прибора, и заносом аппаратуры снегом (12.01.2018, 13.01.2018, 23.03.2018, 24.03.2018, 25.03.2018, 26.03.2018, 30.04.2018, 1.05.2018, 2.05.2018, 3.05.2018, 4.05.2018, 5.05.2018, 6.05.2018, 7.05.2018, 8.05.2018). Явления погоды и облачность в выбранные сроки предоставлены в таблицах 3.3.2 и 3.3.3. Красной заливной выделены наибольшие по модулю значения напряженности поля, зеленой - наименьшие по модулю значения.

Таблица 3.3.2–Явления погоды, облачность и максимальные положительные значения напряженности электрического поля на станции Диксон, 2018г.

Дата	Явления погоды	Облачность (нижняя граница облачности)	Е, В/м
26.01.2018 12:00	Низовая метель	Ac tr(>2500м)	10900
06.02.2018 6:00	Низовая метель.	нет облачности	11604
27.02.2018 15:00	Обложной снег	St/Cu fra (100-200м)	10895
14.03.2018 21:00	Обложной снег	Ac op/ Sc(>2500мм)	10021
15.03.2018 9:00	Низовая метель	нет облачности	10628
06.04.2018 21:00	Поземок	нет облачности	9769
07.04.2018 18:00	Обложной дождь	St/Cu fra (100-200)	10023
18.04.2018 21:00	Низовая метель	нет облачности	7011
24.04.2018 0:00	Поземок.	St neb, не относящиеся к облакам плохой погоды (>2500м)	6139
25.04.2018 21:00	Низовая метель	нет облачности	5584

Дата	Явления погоды	Облачность (нижняя граница облачности)	Е, В/м
17.05.2018 6:00	Поземок	Sc, образовавшиеся не из кучевых (300-600м)	5321
03.06.2018 21:00	Низовая метель	Sc, образовавшиеся не из кучевых (300-600м)	6622
15.06.2018 9:00	Туман	нет облачности	3453
05.08.2018 9:00	Ливневый дождь	St/Cu fra (100-200м)	4578
09.08.2018 3:00	нет явлений	Sc, образовавшиеся не из кучевых (300-600м)	4939
26.10.2018 21:00	Поземок	St neb, не относящиеся к облакам плохой погоды (200-300м)	5431
27.10.2018 18:00	Обложной снег	St/Cu fra (100-200м)	5778
10.11.2018 15:00	Обложной снег	Ac op/ Sc(>2500м)	7753
13.11.2018 0:00	Обложной снег.	Ac op/ Sc(>2500м)	8885
14.11.2018 18:00	Низовая метель	нет облачности	8134
03.12.2018 6:00	Низовая метель	нет облачности	9953
07.12.2018 21:00	Низовая метель	нет облачности	9638
08.12.2018 3:00	Низовая метель	нет облачности	9728
18.12.2018 6:00	Низовая метель	Ac tr(>2500м)	7349
28.12.2018 12:00	Низовая метель	нет облачности	9692
30.12.2018 12:00	Низовая метель	нет облачности	8398

Локальные положительные экстремумы напряженности наблюдаются в течении всего года. Всего за год наблюдалось 26 случаев аномально высоких значений напряженности поля. Наиболее высокие значения отмечаются с января по апрель и в декабре. В 3,8% случаев экстремумы наблюдаются при таких явлениях как: туман, обложной дождь и ливневой дождь. При поземке максимальные значения отмечались в 15,4% случаев и при обложном снеге в 19,2% случаев. В 50% случаев завышенные значения напряженности сопровождалась низовой метелью. Высокий процент повторяемости больших значений напряженности при низовой метели объясняется тем, что при взвихривании мелкой снежной пыли в воздухе возникает положительный объемный заряд. Так же в 3,8% случаев метеорологических явлений не наблюдалось, но при этом была низкая слоисто-кучевая облачность, которая и могла послужить причиной повышения значений напряженности поля.

Таблица 3.3.3–Явления погоды, облачность и максимальные отрицательные значения напряженности электрического поля на станции Диксон, 2018г.

Дата	Явления погоды	Облачность (нижняя граница облачности)	Е, В/м
20.03.18 18:00	Обложной снег	Sc, образовавшиеся не из кучевых (300-600м)	-9591
21.03.18 0:00	Обложной снег	Sc, образовавшиеся не из кучевых (300-600м)	-9463
09.04.18 21:00	Дымка	St neb, не относящиеся к облакам плохой погоды (200-300м)	-5742
10.04.18 6:00	Изморозь	Sc, образовавшиеся не из кучевых (300-600м)	-5890
24.04.18 18:00	Дымка	St neb, не относящиеся к облакам плохой погоды (>2500м)	-3167
25.04.18 0:00	Дымка	Ac tr(>2500м)	-3343
28.06.18 21:00	Обложной дождь	Sc, образовавшиеся не из кучевых (300-600м)	-2356
13.08.18 18:00	Ливневый дождь	Cb (200-300м)	-1876
01.09.18 0:00	Ливневый дождь	Cb (100-200м)	-2141
19.09.18 0:00	Ливневый дождь	Cb (600-1000м)	-2858
30.09.18 6:00	Ливневый дождь	Cb (200-300м)	-2369
04.10.18 15:00	Ливневый дождь	Cb (200-300м)	-4364
05.10.18 12:00	Ливневый дождь	Cb (200-300м)	-2262

Наибольший интерес представляют отрицательные экстремумы напряженности поля. В годовом ходе было отмечено **13** таких случаев

Наибольшие отрицательные значение наблюдаются в период года с марта по октябрь. В 7,7 процентах случаев наибольшие отрицательные значения отмечаются при изморози и обложном дожде. Обложной снег при больших отрицательных напряженностях поля встречается в 15,4% случаев, дымка в 23,1% случаев. Наибольший процент повторяемости при ливневом дожде (46,2%).

При таких явлениях погоды как обложной дождь и обложной снег могут наблюдаться как большие положительные, так и отрицательные значения напряженности поля атмосферы, однако положительные значения больше по модулю, а также больше повторяемость данных явлений при положительных напряженностях поля.

В результате проведенного анализа годового хода напряженности поля можно сделать следующие выводы:

1. В ливневых осадках, за счет их кратковременности не происходит сильного накопления заряда, за счет чего разброс значений напряженности схож с разбросом при отсутствии явлений погоды;
2. При продолжительных осадках происходит накопление как положительных, так и отрицательных зарядов, что обеспечивает сильный разброс значений напряженности поля;
3. Зависимость значений напряженности поля от метеорологических явлений в холодный период значительно выше, чем в теплый;
4. При малых скоростях ветра значения напряженности практически не зависят от направления ветра и периода года;
5. При наличии в воздухе мельчайших взвешенных частиц влаги как при дымке и тумане значения напряженности так же могут быть различными по знаку, но при тумане преобладают положительные максимумы;
6. Частицы снега или дождя могут переносить как положительный, так и отрицательный заряд, однако капли дождя в большем числе случаев несут отрицательный заряд, а частицы снега положительный.

### **3.3.2 Анализ суточного хода напряженности поля**

Поскольку напряженность электрического поля зависит в основном от изменчивости проводимости атмосферы, а, следовательно, и от целого ряда метеорологических факторов: туманов, мглы, облаков, осадков, метелей, запыления и ионизации атмосферы для анализа суточного хода необходимо определить условия «хорошей погоды». Таким условиям соответствует отсутствие метеорологических явлений погоды, скорость ветра до 5 м/с, и отсутствие низкой облачности. Из данных по явлениям погоды (Приложение 1), облачности (Приложение 4) и скорости ветра

(Приложение 3) выделим синоптические сроки (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21ч.), соответствующие условиям «хорошей погоды» и осредним значения напряженности в эти сроки по четырем кварталам года. По полученным данным посчитаем среднегодовые значения напряженности электрического поля атмосферы (Таблица 3.3.4)

Таблица 3.3.4 — значения напряженности поля в условиях «хорошей погоды»

часы месяц	0	3	6	9	12	15	18	21
Январь февраль март	88,57	315,09	341,05	311,26	334,47	589,96	778,5	881,82
Апрель май июнь	285,17	283,8	276,38	384,7	306,75	373,45	718,71	713,33
Июль август сентябрь	348,8	334,75	364,33	328	356,67	431	403	393,83
Октябрь ноябрь декабрь	201	140,42	163,33	228,64	189,8	602,6	994	591,25
среднее	230,88	268,51	286,27	313,15	296,92	499,25	657,83	645,06

На рисунке 3.3.4 представлены графики суточного хода напряженности электрического поля атмосферы на станции Диксон осредненные по четырем кварталам года: с января по март, с апреля по июнь, с июля по сентябрь и с октября по декабрь, а также среднегодовое значение, обозначенное пунктиром. Розовым цветом выделена область среднеквадратических отклонений от среднегодовых значений ( $\sigma = \pm 198,98$ )

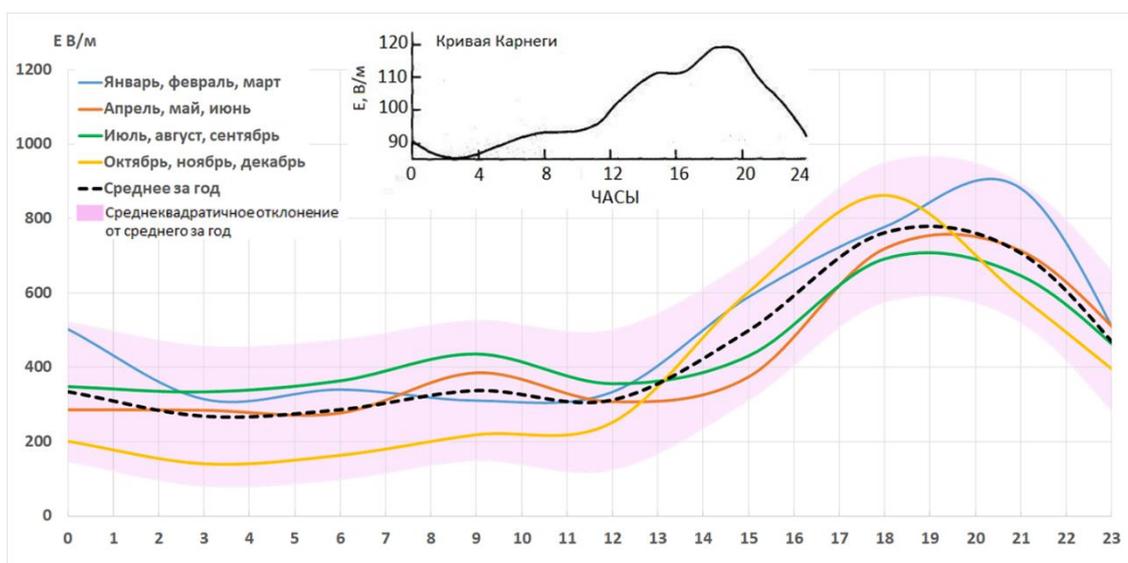


Рисунок 3.3.4 суточный ход напряженности электрического поля атмосферы на станции Диксон

В период с января по март напряженность поля меняется в диапазоне от 88,57 В/м до 881,82 В/м с максимумом в 21 час и минимумом в 0 часов. В период с апреля по июнь напряженность поля меняется в диапазоне от 276,38 В/м до 718,71 В/м с максимумом в 19 часов и минимумом в 6 часов. В период с июля по сентябрь напряженность поля меняется в диапазоне от 328,00 В/м до 431,00 В/м с максимумом в 15 часов и минимумом в 9 часов. В период с октября по декабрь напряженность поля меняется в диапазоне от 140,42 В/м до 994,00 В/м с максимумом в 18 часов и минимумом в 3 часов.

При сравнении суточного хода, полученного в 2018 году на станции Диксон и кривой Карнеги, полученной в ходе экспедиции на атлантическом побережье Антарктиды в 1896 году, видно, что наиболее близок к унитарной вариации суточный ход в осенне-зимний период (с октября по декабрь и с января по март). В теплый период года наблюдаются локальные максимумы в 9 часов, что может быть связано с ионизацией, вызванной прогревом поверхности земли.

В результате проведенного анализа суточного хода напряженности поля можно сделать следующие выводы:

1. В среднем суточный ход соответствует представлениям об унитарной вариации с максимумом в 19 часов по UTC и минимумом в 3 часа по UTC;
2. Значения напряженности на станции Диксон практически в 8 раз выше значений экспериментальной кривой Карнеги;
3. Наиболее близок к унитарной вариации годовой ход в осенне-зимний период.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе бакалаврской работы был произведен обзор научной литературы и изучены материалы об основных процессах атмосферного электричества. Рассмотрены источники ионизации атмосферы, основные характеристики электрического поля атмосферы (потенциал, напряженность, проводимость и вертикальный ток проводимости), понятие о глобальной электрической цепи, временной ход характеристик атмосферного электричества и их зависимость от географического положения и локальных особенностей региона, а также методы и средства исследования параметров атмосферного электричества.

Был произведен анализ срочных метеорологических данных и анализ данных об напряженности электрического поля атмосферы, полученных со станции Диксон за 2018 год.

Были получены следующие результаты:

1. В ходе исследования годового хода напряженности электрического поля атмосферы были выявлены основные метеорологические факторы, влияющие на вариации значений напряженности такие как: выпадение твердых и жидких осадков, взвихривание мелкой снежной пыли в воздухе и наличие в воздухе мельчайших взвешенных частиц влаги. При таких условиях происходит резкое отклонение значений напряженности от естественного хода, и напряженность может достигать значений порядка 11000 В/м положительной полярности и -9000 отрицательной полярности.
2. Так же в работе были выявлены закономерности распределения значений напряженности поля от явлений погоды. Наибольший разброс в значениях отмечается при твердых продолжительных осадках и переносе частиц снега в воздухе.

3. По анализу зависимостей напряженности поля от параметров ветра выявлено, что локальными источниками аэрозольного загрязнения на станции является близкое расположение населенного пункта и котельной.

4. Из срочных метеорологических данных были выделены сроки, соответствующие условиям «хорошей погоды» и исследована суточная вариация напряжённости атмосферного электрического поля для различных сезонов. В ходе исследования суточной вариации было выявлено, что суточный ход напряженности электрического поля атмосферы на станции Диксон соответствует современным представлениям об унитарной вариации с максимумом около 19 часов UTC.

Полученные результаты позволяют выявить роль локальных эффектов в формировании годовой и суточной вариации в Арктическом регионе и могут быть полезны для дальнейших исследований, направленных на выявление факторов, оказывающих воздействие на электрическое состояние приземного слоя атмосферы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hoppel, W. A. Theory of the electrode effect // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. — 1967. — № 29.— 709-721 p.
2. Weatherly W. J. Polar meteorology and climate// Cold Regions Science and Technology — 2015.— vol.1. — 21 p.
3. Аджиев А.Х., Даурова З.А. Суточные вариации электрического поля атмосферы при погодно-климатических изменениях// Глобальная электрическая цепь (Борок 5-9 октября 2015 г.) — Ярославль, 2015.— 16-17 с.
4. Александров В.Я., Ильющенко И.А., Коржиков А.Я. Современные климатические изменения в Арктике и сопровождающие их синоптические процессы// I российская Научно-практическая конференция Природопользование в Арктике: Современное состояние и перспективы Развития — Якутск, 2015. — 9-14 с.
5. Анисимов С.В. Глобальная электрическая цепь геосферных оболочек// Глобальная электрическая цепь (Борок 28 октября – 1 ноября 2013 г.) — Ярославль, 2013.— 6-7 с.
6. Большая\_Российская\_энциклопедия [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://bigenc.ru/> свободный, (дата обращения: 22.02.2022)
7. Горбатенко В.П. Молния как звено глобальной электрической цепи/ В.П. Горбатенко, Т.В. Ершова. — Томск.: издательство ТГПУ, 2011. — 204 с.
8. Зайнетдинов Б.Г. Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе// Труды главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. — 2018.— №588.— 47-61 с.

9. Зайнетдинов Б.Г., Попов И. Б., Соколенко Л. Г. О результатах модернизации атмосферно-электрической сети станций Росгидромета// Глобальная электрическая цепь (Борок 5-9 октября 2015 г.) — Ярославль, 2015.— 114-115 с.
10. Имянитов И. М., Шифрин И. С. Современное состояние исследований атмосферного электричества// Успехи физических наук. — 1962.— Т. LXXVI, вып. 4.— 50 с.
11. Имянитов И. М., Пономарев Ю. Ф., Чубарина Е. В. Сравнительные атмосферно-электрические измерения в свободной атмосфере над Арктикой// Труды ордена трудового знамени главной геофизической обсерватории им А.И. Воейкова. — 1980.— №401.— 83-90 с.
12. Имянитов И.М., Зачек С.И, Иньков Б.К., Семенов К.А. Прибор для измерения электрической проводимости воздуха поверхности земли// Труды главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. — 1960.— №110.— 53-66 с.
13. Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера: Природа атмосферного электрического поля [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ikfia.ysn.ru/priroda-atmosfernogo-elektricheskogo-polya/> свободный, (дата обращения: 22.02.2022)
14. Казакова С.Т., Кулиев Д.Д., Жарашуев М.В. Сезонные вариации суточного хода напряженности электрического поля Атмосферы земли// VIII всероссийская конференция по атмосферному электричеству (Нальчик, 23–27 сентября 2019 года) — Санкт-Петербург, 2019. — 16-18 с.
15. Качурин Л.Г. Руководство к лабораторным работам по экспериментальной физике атмосферы/ Л.Г. Качурин, А.И. Мержеевский. — Л.: Гидрометиздат, 1969.— 511с.

16. Кашлева Л.В. Атмосферное электричество/ Л.В. Кашлева— СПб.: РГГМУ, 2008. —116 с.
17. Кудринская Т.В. Физико-статистический анализ атмосферно-электрических характеристик приземного слоя/ Труды научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы (филиала ГГО) — 2006.— №7.— 182-189 с.
18. Кузнецов В.В. Физика Земли/ В.В. Кузнецов — Новосибирск.: 2011. 842 с.
19. Кузнецов В.В. Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели. — М, 2004.— 32 с.
20. Мареев Е. А., Стасенко В. Н., Булатов А. А., Дементьева С. О. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг.// Известия РАН. физика атмосферы и океана. — 2016.— том 52, № 2. — 175-186 с.
21. Махоткин Л. Г., Соловьев В. А. Электрические заряды капель туманов и облаков// Труды главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. — 1960. — №97.— 51-62 с.
22. Махоткин Л.Г. Годовые вариации градиента потенциала и глобальные годовые изменения площади снежного покрова// Труды ордена трудового знамени главной геофизической обсерватории им А.И. Воейкова. — 1980.— №401.—94-97 с.
23. Метеорологический Словарь [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://meteorologist.ru/meteorologicheskiiy-slovar/index.php>, свободный, (дата обращения: 21.02.2022)
24. Методические указания: наблюдения за атмосферным электричеством: РД 52.04.168-2001. Введ. с 13.12.2001. СПб., 2001. 27с.
25. Омуркулов Т.А., Тажибаев К.Т. Глобальные токи Земли [Электронный ресурс]: Электрон.текст.дан. — Портал научно-

практических публикаций, 2016. — Режим доступа:

<http://portalnp.snauka.ru/2016/12/5750> (дата обращения: 10.05.2022)

26. Панчишкина И. Н., Петрова Г. Г., Петров Н.А. Вертикальные электрические токи в атмосфере и их роль в формировании электродинамической структуры приземного слоя // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. — 2008.— №5.— 7 с.

27. Панчишкина И.Н. Экспериментальные исследования процессов переноса электрического заряда в приземном слое атмосферы: Автореф. дис. канд. физ-мат. наук. — Нальчик, 2009.— 24 с.

28. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В., Петров Н.А. Измерительный комплекс для исследования электричества приземного слоя атмосферы. — Ростов-на-Дону, 2010.— 14 с.

29. Тверской П. Н. Атмосферное электричество/ П. Н. Тверской. — Л.: Гидрометиздат, 1949. —252 с.

30. Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества/ Я. И. Френкель. — М.: КомКнига, 2007. —160 с.

31. Хуторянская Д. Ф. Региональная синоптика. — Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. — 227 с.

32. Чернева Н.В. Влияние природных процессов на формирование локального электрического поля атмосферы: Автореф. дис. канд. техн. наук. — СПб., 2010.— 17 с.

33. Шаманский Ю. В. Пространственно-временные изменения электрического поля атмосферы вблизи побережья оз. Байкал// Известия Иркутского государственного университета. — 2009.— Том 1, № 1.— 190-197 с.

34. Электрические свойства льда [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.ppra.ru/additional/06voda/water\\_life\\_21.php](http://www.ppra.ru/additional/06voda/water_life_21.php) свободный, (дата обращения: 12.04.2022)

35. Энциклопедия по машиностроению [Электронный ресурс]. —  
Режим доступа: <https://mash-xxl.info/map/>, свободный, (дата обращения:  
15.01.2022)