



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование пространственной стохастической зависимости
коэффициента преломления атмосферы»

Исполнитель Качалова Полина Юрьевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Жуков Владимир Юрьевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« 7 » июня 2026 года

Санкт-Петербург
2026

Введение.

Коэффициент преломления атмосферы - величина, которая представляет собой отношение скорости света в вакууме к скорости распространения света в атмосфере. В стандартных условиях показатель преломления не на много больше единицы.

В данной работе будет проведено исследование пространственной стохастической зависимости коэффициента преломления атмосферы. Пространственные неоднородности в значениях коэффициента преломления атмосферного воздуха, которые вызваны изменениями его физических параметров, приводят к отклонениям в прямолинейном распространении света — **рефракции**.

Рефракция радиоволн — это изменение траектории распространения световых лучей вследствие неоднородности среды, что приводит к ошибкам в определении координат наблюдаемых целей при радиолокационных наблюдениях.

Данному фактору на сегодняшний день уделяется мало внимания, а данные метеорологических радиолокаторов обрабатывают в предположении о том, что форма антенного луча неизменна и соответствует условиям стандартной атмосферы.

В результате большого количества измерений атмосферных параметров (аэрологических наблюдений) следует вывод, что значение метеорологических величин в атмосфере непостоянно. На них оказывают влияние не только неоднородность среды, но и её характеристики — температура, содержание влажности и давление атмосферы.

Такая неоднородность и постоянная изменчивость приводят к формированию атмосферных рефракций, что впоследствии грозит появлением ошибок при прогнозе опасных метеорологических явлений.

Необходимость учёта рефракции при радиолокационных метеорологических наблюдениях можно подтвердить с помощью многочисленных данных, которые постоянно поступают с радиолокаторов различных метеорологических станций, границы обзора которых перекрываются из-за рефракционных волн.

Целью работы является анализ и моделирование пространственной стохастической изменчивости коэффициента преломления на основе современных теоретических методов и данных натурных измерений.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Анализ физико-географических и синоптико-климатических условий местности расположения станции Воейково.
2. Сбор данных аэрологии с метеорологической станции Воейково за месяцы со стабильной атмосферой: май, сентябрь 2023 года и август, сентябрь 2024 года.
3. Сформировать базу временных рядов для анализа.
4. Оценить качество временных рядов на однородность и стационарность.
5. Рассчитать коэффициенты преломления по высотам.
6. Проверить полученные коэффициенты преломления на значимость с помощью расчёта коэффициентов корреляции.

В первой главе предполагается рассмотреть особенности физико-географического расположения станции Воейково, влияние расположения станции на формирование климата и синоптико-климатические особенности данной местности.

Во второй главе рассматривается пространственная стохастическая зависимость коэффициента преломления атмосферы, разработка метода построения рефракции, предназначенного для

последующего расчёта коэффициента преломления, который будет подвергаться статистической оценке.

В третьей главе будут продемонстрированы статистические расчёты и проведена оценка значимости полученных в ходе работы коэффициентов преломления.

Глава 1. Физико-географические и синоптико-климатические особенности расположения метеорологической станции Воейково.

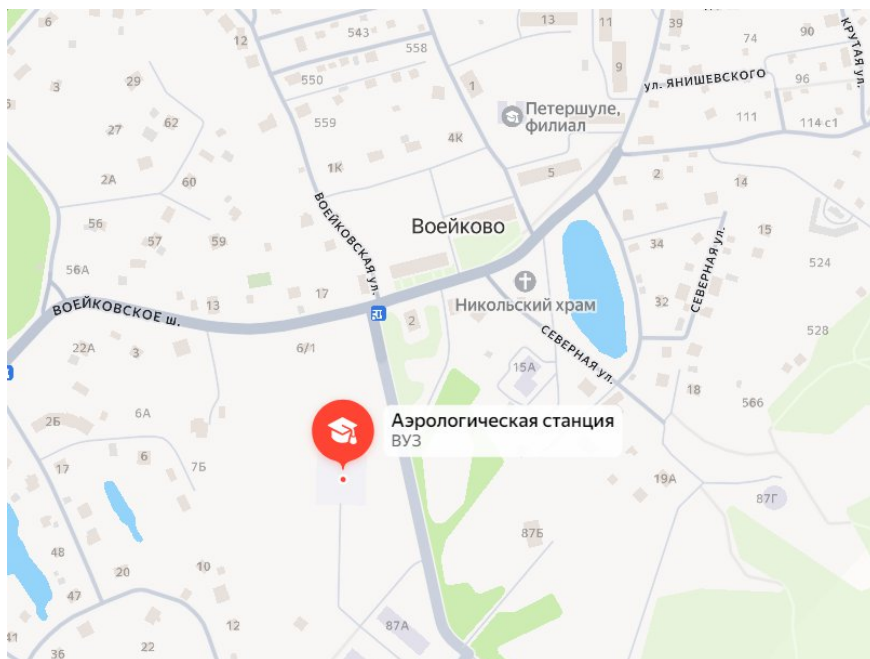
Точность и качество метеорологических наблюдений в большей степени зависит от расположения метеорологической станции. На многие метеопараметры оказывают влияние такие факторы, как: характер подстилающей поверхности, особенности рельефа и удалённость от водоёмов и антропогенных объектов метеоплощадки. Станция Воейково, которая с 2018 года является официальным испытательным полигоном Всемирной метеорологической организации (ВМО) [2][4], это объект, где очень высокие требования к стандартизации условий измерений.

В данной главе будут рассмотрены физико-географические особенности района расположения станции и проанализированы основные климатические факторы, которые определяют её положение в зоне умеренного континентального климата. Также рассмотрим синоптические процессы, которые формируют режим погоды в данном регионе.

1.1. Географическое положение станции Воейково.

Метеорологическая станция Воейково находится во Всеволожском районе Ленинградской области, на Колтушской возвышенности, 20 км к востоку от Санкт-Петербурга (рисунок 1) [2]. Координаты станции: 59° 57' с.ш., 30° 42' в.д. [1][4].

Рисунок 1. Расположение на карте аэрологической станции Воейково.



Опираясь на данные последнего нивелирования 2014 года, высота станции над уровнем моря 72 м [2][4]. Во многих источниках встречается значение 75 м, что связано с использованием различных реперов, замеры которых были зафиксированы в разные годы [4]. На сегодняшний день для метеорологических прогнозов актуальной считается заметка 72 м.

Для района станции Воейково характерен рельеф пологоволнистой равнины с максимальными отметками высоты 50–80 м. Протяжённость территории усеяна конечно-моренными грядами и камовыми холмами, которые когда-то образовались за счёт деятельности ледника. Метеорологическая площадка расположена на ровном плато, как и полагается в соответствии с требованиями ВМО по размещению метеорологического оборудования [2].

История создания станции началась с Великой Отечественной войны. В 1944 году Правительство постановило приказ по восстановлению экспериментальной базы Главной геофизической обсерватории (вместо Павловской обсерватории, которая была разрушена). Выделили земельный участок в посёлке Сельцы. После чего распоряжением СНК СССР от 18 июля

1944 года территорию передали Гидрометеорологической службе, и уже 31 декабря 1944 года метеорологическая станция вступила в активную работу. В 1949 году станция и посёлок переименовали с Воейково, в честь 100-летия основания Главной геофизической обсерватории и присвоением ей имени А.И. Воейкова (рисунок 2) [2].

Рисунок 2. Первое здание ГФО. Указ о создании ГФО.



1.2. Характеристика подстилающей поверхности.

Для точности и корректности данных, полученных в ходе наблюдений, очень важно учитывать свойства подстилающей поверхности в районе, где находится станция.

Почва. Раньше на месте территории метеоплощадки располагалось картофельное поле. В 1947 году площадку выровняли и засеяли травой. Покров данной территории представляет собой подзолистую почву на плотном мелкозернистом песке, что занимает большую часть плато [2][10]. Вдоль западного склона встречаются подзолистые почвы на плотной пылевидной супеси. На площадке на сегодняшний день прорастают луговые

травы. Это обеспечивает однородный растительный покров, что является благоприятным условием для проведения корректных теплобалансовых замеров [10].

Гидрография. В 260 м к северо-востоку от метеоплощадки расположено озеро Верхнее, размеры которого составляют 160×50 м, в глубину озеро 2–2,5 м. Урез воды озера находится на отметке 63,9 м [2]. Наличие рядом с метеоплощадкой водоёма, даже небольшого, оказывает влияние на температурный и влажностный режим, что нужно учитывать при обработке наблюдений. Южнее от метеорологической станции, в 150–180 м, расположено водохранилище [2].

Антропогенные объекты. Станция находится на окраине посёлка Воейково. Посёлок представляет собой застройку двухэтажных, трёхэтажных, а также одноэтажных домов [2]. На востоке от площадки, на расстоянии 50 м, тянется шоссейная дорога Воейково - Кирполье. В 160 м находится павильон лаборатории измерения атмосферного электричества и изучения облаков [2]. Следует вывод, что антропогенные факторы минимальны, поэтому влияния на результаты наблюдений не оказывают.

1.3. Климатическая характеристика района.

Область расположения метеорологической станции Воейково относится к умеренно континентальному климату - тёплое лето и холодная снежная зима, без сухого сезона [1][3].

Такой тип климата формируется за счёт западного переноса воздушных масс с Атлантики, что обуславливается относительно мягкой зимой и умеренно тёплым летом для данных широт, а также повышенной облачностью и значительным количеством осадков.

Температурный режим. Анализируя многолетние данные температур данного района, можно сформировать следующие условия:

- Среднегодовая температура воздуха составляет около $+5^{\circ}\text{C}$ [5].
- Средняя температура наиболее холодного месяца (январь) колеблется около $-7...-9^{\circ}\text{C}$.
- Средняя температура наиболее тёплого месяца (июль) составляет $+17...+18^{\circ}\text{C}$.
- Минимальное значение температуры в районе -40°C , средний из абсолютных минимумов составляет -30°C [8].
- Максимальное значение температуры достигает $+35^{\circ}\text{C}$ [5].

Важной особенностью температурного режима является значительная межгодовая изменчивость, связанная с варьированием интенсивности западного переноса и вторжений арктических или континентальных воздушных масс.

Ветровой режим. В годовом разрезе на станции Воейково преобладают ветры юго-западного и западного направлений [5]. Повторяемость юго-западного ветра составляет 20% (зимой - 21%, летом - 19%), западного - 19% (зимой - 17%, летом - 20%). Южный ветер также имеет значительную повторяемость - 14% (зимой до 17%) [8].

Среднегодовая скорость ветра составляет 4,6 м/с [5]. Наибольшая среднемесячная скорость ветра отмечается в зимние месяцы, что связано с усилением барических градиентов в холодный период.

Осадки и снежный покров. Годовое количество осадков в среднем 654 мм. Две трети осадков выпадает в тёплый период года (апрель–октябрь) [5]. Режим подобного рода связан с развитием циклонической активности и конвективных процессов в летнее время.

Снежный покров устанавливается в период с конца октября по начало декабря (средняя дата появления — 26 октября, устойчивый покров формируется к концу ноября — началу декабря). Сход снежного покрова происходит в апреле (средняя дата — 5–10 апреля). Продолжительность залегания снежного покрова составляет 130–145 дней [5].

1.4. Синоптико-климатические особенности региона.

Синоптический режим в районе станции Воейково определяется взаимодействием нескольких крупномасштабных атмосферных процессов.

Циклоническая деятельность. Регион находится в зоне активного прохождения атлантических циклонов, траектория которых чаще всего пролегает через Скандинавский полуостров и Финский залив, передвигаясь на территорию Ленинградской области [1][3]. Прохождению циклонов характерны: пасмурная погода, обложные осадки, усиление ветра и повышение температуры зимой (оттепель). Максимум циклонической активности приходится на осенне-зимние месяцы (октябрь–февраль), что сопровождается увеличением облачности и повторяемостью осадков.

Антициклонические условия. Резкий поток континентального арктического воздуха с северо-востока, который напрямую связан с образованием Сибирского антициклона, приносит в холодный период ясную морозную погоду. В такой период минимальные температуры могут превышать экстремальные значения ($-35...-40^{\circ}\text{C}$). Летом антициклоны приносят тёплую погоду (до $+35^{\circ}\text{C}$) при малооблачном небе [5].

Атмосферные фронты. Активная циклоническая деятельность определяет частое прохождение атмосферных фронтов (тёплых, холодных и

фронтов окклюзии). Особенно значимы холодные фронты, которые в тёплый период вызывают ливневые осадки, грозы и шквалистые усиления ветра.

Специфика локальной циркуляции. Наличие близкого крупного мегаполиса (Санкт-Петербург) и локального озера Верхнее может создавать локальные циркуляции: бризовую циркуляцию в тёплый период при слабом градиенте ветра, а также «остров тепла» со стороны города при западном переносе. Эти эффекты должны учитываться при анализе данных, особенно для пограничного слоя атмосферы.

Заключение по главе.

Метеорологическая станция Воейково находится в таких физико-географических условиях, которые характерны для южной части таёжной зоны Восточно-Европейской равнины. Ровный рельеф, однородный растительный покров, удалённость от крупных антропогенных источников загрязнения и водоёмов (за исключением малого озера) создают благоприятные условия для метеорологических наблюдений.

Климат района формируется под влиянием западного переноса и активной циклонической деятельности, что определяет значительную облачность, повышенное, по сравнению с районами, для которых характерен континентальный климат, количество осадков и градиенты температуры. Годовой ход температур и осадков соответствует умеренному континентальному климату с чётко выраженными сезонами.

Глава 2. Пространственная стохастическая зависимость коэффициента преломления атмосферы.

Под пространственной стохастической зависимостью коэффициента преломления атмосферы подразумевается изменение показателя преломления воздуха в атмосфере за счёт турбулентной неоднородности среды и изменений параметров температуры, давления и влажности на высотах.

Коэффициент преломления – это изменение направления распространяющихся лучей света в атмосфере в связи с неоднородностью среды, где показатель преломления меняется с высотой. С изменением показателя преломления появляется такое явление, как рефракция. Рефракцией принято называть изменение траектории распространения световых волн, которое проявляется в кажущемся смещении астрономических объектов. При радиолокационных наблюдениях подобное явление приводит к ошибкам в определении координат наблюдаемых целей.

При аэрологических наблюдениях и измерениях параметров атмосферы можно сделать вывод, что помимо неоднородности среды на появление рефракции также влияют температура, давление и влажность.

При таком раскладе мы сталкиваемся с проблемой коррекции получаемых оценок. Во избежание такого исхода событий, следует рассчитать коэффициент преломления по известным нам профилям метеорологических параметров и определить рефракцию с последующим учётом возникающих погрешностей.

В данной главе будут рассмотрены основы формирования показателя преломления и методы его расчёта, а также проведена оценка связи коэффициента преломления.

2.1. Коэффициент преломления атмосферы.

Коэффициентом преломления атмосферы – значение, которое показывает, насколько сильно атмосфера среды замедляет распространение радиоволн по сравнению со скоростью в вакууме. Перемещение волны из среды в среду меняет её направление. Это изменение направления и будет называться преломлением.

Показатель преломления - величина не постоянная. На её изменение оказывают влияние атмосферные процессы и метеорологические параметры.

Изменение температуры влияет на величину показателя преломления. Чем выше температура, тем ниже показатель. Связано это с плотностью тёплого воздуха, которая значительно меньше, чем плотность холодного.

Влияние оказывает также атмосферное давление, с ростом которого увеличивается и значение коэффициента преломления.

Самым основным метеопараметром, влияющим на рост индекса преломления, является влажность воздуха. Чем больше воздух насыщен водяным паром, тем выше показатель.

Коэффициент преломления n определяет величину рефракции.

В вакууме значение коэффициента преломления атмосферы равно единице. Его можно представить как отношение скорости света в вакууме c к скорости распространения света в окружающей среде v , используя формулу [12]:

$$n = c/v \quad (1.1)$$

Для газов и воздуха n будет отличаться от единицы, поэтому следует использовать индекс преломления N , он характеризует отличие самого коэффициента преломления от единицы, которое увеличено в миллион раз [12]:

$$N = (n-1) * 10^6 \quad (1.2)$$

Индекс преломления выражается в N – единицах [12]:

$$1 N-e\partial. = 10^{-6} \quad (1.3)$$

В более обширном волновом диапазоне будет правильно рассмотреть групповой коэффициент преломления, который напрямую описывает зависимость коэффициента преломления от метеорологических величин [12]:

$$(n - 1) = 83,11 * 10^{-6} * p/T - 11,4 * 10^{-6} * e/T \quad (1.4)$$

Следовательно, из данной формулы можно вывести прямую связь коэффициента преломления от метеорологических параметров[12]:

$$\Delta N = \partial N / \partial T * \Delta T + \partial N / \partial P * \Delta P + \partial N / \partial e * \Delta e \quad (1.5)$$

Получается, что связь между индексом преломления и параметрами атмосферы (формула 1.4), можно рассматривать отдельно по каждому из этих параметров. В таком случае мы можем рассчитать частные производных для каждого параметра по отдельности. При таких расчётах мы берём значения температуры, влажности и давления, которые соответствуют нормальным условиям стандартной атмосферы[13]: $T = 293,15$ К; $P = 1013,25$ гПа; $e = 13,33$ гПа.

Рассчитанные величины производных для каждого параметра представлены в таблице 1.1.

1.1. Таблица величин частных производных для метеорологических параметров стандартной атмосферы.

$\partial n / \partial T$	$\partial n / \partial P$	$\partial n / \partial e$
$-1 \cdot 10^{-6} \text{ К}$	$0,3 \cdot 10^{-6} \text{ гПа}$	$-0,04 \cdot 10^{-6} \text{ гПа}$

Формулу 1.5 можно рассмотреть, как произведение градиента коэффициента преломления каждого параметра к градиенту самого параметра в атмосфере. Тогда получится:

$$\text{grad } n \approx -1 \cdot 10^{-6} \text{ grad } T + 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ grad } P - 0,04 \cdot 10^{-6} \text{ grad } e \quad (1.6)$$

2.2. Возникновение атмосферной рефракции.

Атмосферная рефракция происходит при попадании пучка света в неоднородную среду (атмосферу Земли). Такое искривление лучей обусловлено изменением плотности воздуха с высотой. Некий пучок света под наклоном попадает в атмосферу. Из-за неоднородности среды одна часть волны распространяется в более плотном слое, а другая попадает в более разреженный слой. В плотном слое скорость движения волны остаётся прежней, а в менее плотном верхнем слое увеличивается из-за отсутствия препятствий. Происходит отклонение волны, которую мы и называем рефракцией.

Это оптическое явление видится нами, как изменение точного расположения наблюдаемых целей.

В метеорологических наблюдениях мы видим лишь последствия рефракции – погрешности в измерениях, а людям, не связанным с наукой и

радиолокационными измерениями, удаётся наблюдать рефракцию во всех её необычных проявлениях почти каждый день.

Например, нижний край солнца за счёт рефракции поднимается и искажается сильнее, чем верхний, с земли будет казаться, что солнце немного сплющено. Такое визуальное восприятие сжатого солнечного диска можно наблюдать также при восходе и закате.

Редкое явление рефракции, которое можно наблюдать в последние минуты заката – зелёная вспышка света, которая связана с более интенсивным преломлением синих и фиолетовых лучей, и менее интенсивным для красных.

В жаркую погоду из-за искривления луча могут возникать так называемые миражи, когда любые земные объекты будто бы меняют своё положение и форму.

Рефракция напрямую зависит от состояния среды, в которой она формируется. С ростом температуры рефракция будет уменьшаться, так как при нагреве воздуха его плотность меньше. Мы можем наблюдать это в жаркую погоду, когда изгиб волны рефракции направлен вверх за счёт разного прогрева слоёв воздуха и возникает иллюзия, будто впереди находится вода.

С ростом давления рефракция будет увеличиваться потому, как плотность воздуха тоже будет становиться больше. Также, рефракция возрастает, когда увеличивается влажность воздуха.

Длина самой световой волны тоже влияет на образование рефракции, связано это с показателем преломления, который напрямую зависит от частоты света. Так, лучи фиолетового и синего цвета преломляются сильнее красных.

Различают два типа рефракции: астрономическая и земная. Астрономическая рефракция представляет собой поток света, проходящий через все слои атмосферы. Такая рефракция наиболее стабильна, за счёт максимального угла падения космических лучей. Земная рефракция, которая

интересует нас больше всего, происходит между объектами, находящимися внутри нескольких слоёв атмосферы. Она не стабильна из-за постоянных градиентов метеопараметров и суточных и сезонных колебаний. В пограничном слое атмосферы (высота от 0 до 100 м) при температурных градиентах кривизна светового потока может огибать земную поверхность.

На сегодняшний день основной проблемой, с которой сталкиваются при решении задач радиолокационных измерений, является изменение траектории электромагнитного потока в той среде, в которой этот поток распространяется. Таким образом, при диагностировании расположения целей по способу радиолокации, точное местонахождение отслеживаемого объекта в результате даёт погрешность, которая обуславливается разного вида рефракциями. В метеорологии данная проблема имеет очень большое значение, ведь переменчивость рефракции препятствует точному распознаванию грозовых облаков на моменте их образования. До сих пор в процессе проведения наблюдений зондирования атмосферы применяют стандартную радиоатмосферу [6, 7, 8], в которой градиент коэффициента преломления постоянен и равен:

$$-4 * 10^{-8} \text{ 1/м} \quad (1.7)$$

Таким образом, уменьшение давления и влажности будут происходить с высотой логарифмически, а уменьшение температуры – линейно. Однако стоит учесть, что атмосфера Земли - не статичный объект, в ней постоянно происходят изменения параметров, особенно метеорологических [9, 10]. Как следствие, большое различие значений коэффициентов преломления приводит к образованию разного типа рефракций. Если коэффициент преломления изменяется вдоль траектории распространения света, возникает дальномерная рефракция. Если же изменения коэффициента преломления протекают к траектории распространения света, рефракция будет называться

угловой. Рефракция характеризуется градиентом коэффициента преломления, что сильно сказывается на достоверности измерений. Как результат, полученные с нескольких радаров карты при стыковке дают разные значения координат интересующей нас цели.

Мы уже определились, что ближе к земле атмосфера максимально изменчива, значит, интересующее нас искажение луча будет сформировано на высоте от 0 до 700 м.

2.3. Оценка связи коэффициентов преломления.

Оценка значимости коэффициента преломления сильно облегчает практику радиолокационных измерений при расчёте рефракции.

С помощью статистической оценки на значимость можно решить сразу несколько задач:

1. Предсказание разброса радиоволны. Зная корреляцию коэффициента преломления по разным высотам, можно предположить, как поведёт себя на этих самых высотах радиосигнал.
2. Возобновить вертикальный разрез параметров метеорологических величин на разных высотах. Ранее упоминалось, что температура, давление и влажность тесно связаны с индексом преломления. Зная его корреляционную связь на высотах, можно предположить, какими будут значения влажности на этих самых высотах.
3. Оценка пространственной связи. Можно вычислить и проверить на согласованность две абсолютно разные метеостанции, которые расположены на разных высотах.
4. Узнать высоту, до которой можно точно восстановить профиль данных индекса преломления, имея только значения с нижнего уровня. Зная профиль на более низких высотах, можно смело предсказать значения выше.

Как ранее было упомянуто, степень преломления атмосферы зависит от метеопараметров. Чтобы оценить пространственную связь данного показателя, для начала потребуется его найти.

Для расчёта очень важно выбрать подходящие данные. Ранее было подмечено, что для точности расчётов необходимо выбрать месяцы со спокойной атмосферой, где отсутствовали турбулентные потоки. Связано это с влиянием любых неоднородностей среды на изменение угла распространения света.

Далее, из данных аэрологического зондирования за выбранные нами месяцы, выделяются столбики со значением температуры, давления и влажности, ведь именно они оказывают влияние на перемену значений степени преломления.

Данные локатора фиксируются в разных точках на разных высотах. Можно использовать метод интерполяции, чтобы привести все данные к единой высоте.

Расчёт коэффициента преломления будем проводить по формуле[14]:

$$N = (n - 1) 10^6 = \frac{78}{T} \left(p + \frac{4800e}{T} - \frac{e}{7} \right) \quad (1.8)$$

Когда индекс преломления по каждой интересующей нас высоте рассчитан, выполняется статистический анализ данных. Для этого выполняется оценка среднего значения, дисперсии и среднеквадратичного отклонения, основанных на результатах данных коэффициента преломления. Это позволяет нам быстрее найти ошибку в расчётах, при сомнительных результатах коэффициента корреляции.

Для оценки значимости очень важно понимать, какие именно высоты нас интересуют. Цель: определить значимость на высоте от 0 до 500 м, от 0 до 600 м, от 0 до 700 м.

Определить значимость можно по средствам вычисления коэффициента корреляции между интересующими нас высотами.

Значение корреляции – это гармоничное преобразование двух критериев, показывающее, что переменная одного критерия зависит от переменной другого и тем самым имеет взаимосвязь.

Корреляционные связи делят по форме, направлению и силе связи. По форме связь может быть прямолинейной и криволинейной. Прямолинейная – та, в которой изменение одного параметра несёт изменение другого. Криволинейная – та, где преобразование значения одной переменной не всегда приводит к изменениям величины второй. По направлению корреляционное соотношение разделяют на прямую, и обратную связь. Прямая имеет положительное значение двух переменных. С ростом первой переменной, возрастает и вторая, а с уменьшением второй, уменьшается первая. При обратной связи, наоборот, коэффициент корреляции отрицательный, связь работает в обратную сторону. Чем выше/ниже значение одного составляющего, тем ниже/выше значение второго соответственно. По интенсивности корреляционные связи определяются по самому максимальному коэффициенту корреляции, независимо от её направления. Таким образом, самое большое значение признака корреляции равно единице, а самое маленькое равно нулю.

Проверить параметр корреляции на значимость можно через плотность его связей, которая представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Плотность связей коэффициента корреляции.

Плотность	Значение коэффициента корреляции.
Сильная	$r > 0,70$
Средняя	$0,69 > r > 0,50$
Умеренная	$0,49 > r > 0,30$

Слабая	$0,29 > r > 0,20$
Очень слабая	$r < 0,19$

Если коэффициенты корреляции будут значимыми, мы сможем сделать вывод, что связь между интересующими нас высотами будет прямой. Получается, подтверждается зависимость изменения одного параметра от другого. Если так, то мы с уверенностью можем сказать, что выше 700 м показатели будут меняться с такой же зависимостью, с которой они изменяются на более низких высотах. Это значит, что наше предположение об упрощении подобным методом расчёта атмосферной рефракции подтверждается.

Заключение по главе.

Рассмотрев зависимость коэффициента преломления от физических процессов, следует вывод: данный показатель не является статичным параметром. Данный факт подтверждает необходимость его расчёта. Прямая зависимость показателя преломления с рефракцией указывает на пути решения интересующих нас задач. Углубление в теорию и составление плана выполнения практического задания формирует чёткое представление по предстоящей работе и её оформлению.

Глава 3. Практическое применение оценки значимости коэффициента преломления.

При выборе темы для ВКР я ориентировалась на предмет, который был мне интересен больше всего в годы обучения. Когда на третьем курсе у нас появилась дисциплина «Методы зондирования окружающей среды», я тут же заинтересовалась этим предметом. Зондирование атмосферы изучает все процессы, которые происходят в среде выше уровня земли, и позволяет увидеть эти процессы на практике.

Множество явлений, наблюдаемых нами из окон своих домов или из окон транспорта по пути на работу, скрывают в себе комбинацию сложных цепочек и взаимосвязей, многие из которых не изучены на сегодняшний день.

В наше время в изучении пространственной стохастической зависимости коэффициента преломления разрабатываются новые методики, а старые, в свою очередь, дают сбой. Новое – это хорошо забытое старое.

Основной целью моего практического задания является доказательство уже изученного метода оценки коэффициента преломления для создания модели атмосферной рефракции.

3.1. Подготовка данных аэрологического зондирования атмосферы.

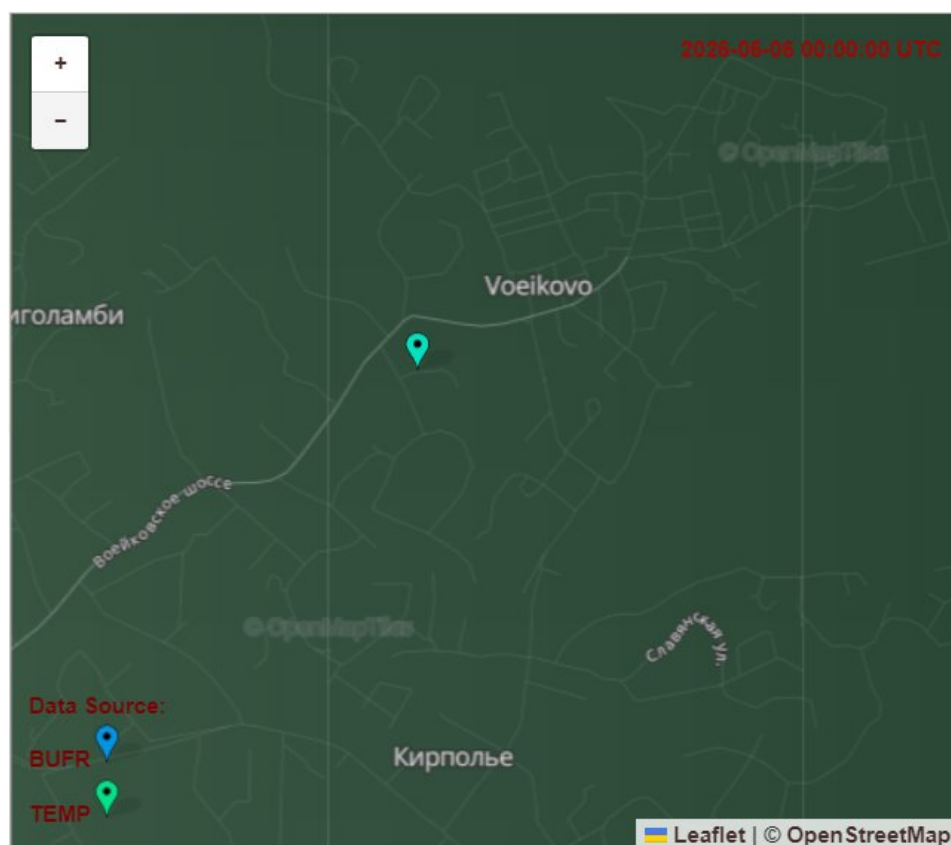
Метеорологическая станция Воейково – основная станция вблизи Санкт-Петербурга, на которой проводятся аэрологические измерения. Заранее ознакомившись с физико-географическими и климатообразующими особенностями района нахождения метеорологической площадки, было установлено, что эта станция нам подходит.

Как было описано ранее, умеренно континентальный климат, преобладание чередования в осеннее и зимнее время циклонической, а в летнее время антициклонической деятельности, среднегодовые максимумы и

минимумы температур создают условия, немного затрудняют нам выбор данных. Нас интересуют месяцы со стабильной атмосферой, а влияние любых синоптических изменений сокращают количество таких месяцев, но они есть.

По архиву данных погоды за 2023-2024 год с сайта Вайомингского университета[15] (рисунок 3) были выбраны следующие месяцы, которые наиболее подходят нам для расчётов: май 2023 года; сентябрь 2023 года; август 2024 года; сентябрь 2024 года.

Рисунок 3. Карта расположения аэрологической станции Воейкого с сайта университета Вайоминг.



Далее работа заключалась в обработке выбранных нами данных. Основной задачей стало корректно вставить их в программу Excel для последующих расчётов (приложение 1).

Как упоминалось ранее, данные аэрологии не фиксируются статично, отсчёт происходит в одно и то же время, но высота в это время может немного отличаться. Например: в срок 12 часов по UTC 1 мая 2023 года локатором данные температуры были сняты на высоте 553 м, а в это же время 1 сентября 2023 года – на высоте 382 метра. Для этого нам важно приравнять все данные аэрологии к единым высотам: 500, 600 и 700 м. Воспользуемся в работе макросам, который заранее был создан моей коллегой Никитиной В.С. (приложение 2).

3.2. Расчёт коэффициента преломления по данным аэрологического зондирования.

Теперь, когда у нас единые высоты для всех дней месяца и данные на этих высотах в сроки 00 и 12 по UTC, рассчитаем коэффициент преломления по известной нам формуле 1.8:

$$N = (n - 1)10^6 = \frac{78}{T} \left(p + \frac{4800e}{T} - \frac{e}{7} \right)$$

1.8

Формула также была добавлена в программу макроса, в целях упрощения задачи и экономии времени.

Полученные коэффициенты преломления в месяцы с устойчивой атмосферой по высотам представлены в приложении 3, так как их очень много. Здесь эти данные продемонстрированы в таблице 2.1 в виде среднего значения, рассчитанного отдельно с помощью полученных коэффициентов преломления по каждой высоте за каждый срок.

Таблица 2.1. Среднее значение рассчитанных коэффициентов преломления.

Месяц	0 м	500 м	600 м	700 м
Май 2023	312,53	291,15	287,44	279,33
Сентябрь 2023	330,90	311,46	306,86	302,27
Август 2024	323,76	313,98	309,44	313,02
Сентябрь 2024	328,70	309,23	304,18	299,02

Средние значения коэффициентов преломления схожи и находятся в одном диапазоне, что позволяет заведомо предположить значимость коэффициентов корреляции.

Для выявления ошибок и статистической страховки были рассчитаны дисперсия коэффициентов преломления (таблица 3) и СКО (таблица 4).

Таблица 3. Дисперсия коэффициентов преломления по высотам.

Месяц	0 м	500 м	600 м	700 м
Май 2023	104,545	73,031	59,411	1377,368
Сентябрь 2023	238,859	116,365	68,930	55,197
Август 2024	625,240	149,513	98,098	70,506
Сентябрь 2024	350,514	142,343	74,760	68,670

Дисперсия показывает разброс рассчитанных нами показателей преломления, что, в последствие, может отразиться на интересующих нас коэффициентах корреляции.

**Таблица 4. Среднеквадратичное отклонение коэффициентов
преломления по высотам.**

Месяц	0 м	500 м	600 м	700 м
Май 2023	10,225	12,632	8,546	7,708
Сентябрь 2023	15,455	29,201	10,787	8,302
Август 2024	25,005	12,228	9,904	8,397
Сентябрь 2024	18,722	19,845	11,931	8,646

По средней степени разброса значений прослеживается статистическая связь: с увеличением высоты разброс значений будет уменьшаться. Связано это с отсутствием данных выше 700 м.

3.3. Проверка на значимость коэффициентов преломления атмосферы.

Корреляционная связь – это согласованное изменение двух признаков, отражающее тот факт, что изменчивость одного признака находится в соответствии с изменчивостью другого.

Вычисления коэффициента корреляции выполняются по средствам функции «КОРР» в программе Excel.

Результирующие значения коэффициента взаимосвязи показателя преломления от самой меньшей высоты до интересующих нас высот путём функции в программе Excel продемонстрированы в таблице 5.

**Таблица 5. Коэффициент корреляции коэффициента преломления
атмосферы.**

Месяц	0-500 м	0-600 м	0-700 м
Май 2023	0,892	0,871	0,245
Сентябрь 2023	0,068	0,154	0,184

Август 2024	0,009	-0,211	-0,227
Сентябрь 2024	0,258	0,369	0,420

Анализируя полученные при вычислении коэффициенты корреляции, в августе 2024 года наблюдались отрицательные значения, что говорит о наличии обратной связи. Противоположная корреляционная связь для коэффициента преломления указывает на то, что с увеличением переменного параметра, в нашем случае это высота, уменьшается значение зависимого переменного параметра, в нашем случае это значение коэффициента преломления. Причиной в такой ситуации может служить неоднородность среды. Видимо при выборе месяцев со стабильной атмосферой была допущена ошибка. Даже рассчитанный коэффициент преломления статистически часто повторяется (приложение 4).

Чтобы подтвердить наши предположения о неустойчивости атмосферы, рассмотрим данные о погоде за тот период [16, 17, 18].

По данным с сайта архива погоды зафиксировано около 10 случаев гроз в районе расположения метеостанции Воейкова, пару случаев встречаемости обложных осадков и более 10 случаев порывистого ветра в августе 2024 года (приложение 6). Следовательно, атмосфера в этом месяце не являлась статичной, на неё оказывали влияния турбулентные перемешивания, обусловленные конвективными потоками. Прогрев воздуха в августе в умеренно континентальном климате теряет свою интенсивность, зато почва продолжает прогреваться с той же силой. Прогретый у земли воздух поднимается вверх, ведь плотность тёплого воздуха меньше относительно холодного. При подъёме тёплый воздух перестаёт удерживаться за счёт температуры и попадает в кучево-дождевые облака, в которых происходит процесс электризации капель воды из-за активных конвективных потоков, что и приводит к образованию грозы. В августе 2024 года грозы длились несколько дней, приблизительно в одно и то же время – 18 часов по UTC.

Подобное явление характерно для тёплых месяцев данного климата. Значит, для данного месяца высчитывать коэффициент преломления было не нужно.

Получается, мы рассматриваем коэффициенты корреляции только за май 2023 года, сентябрь 2023 года и сентябрь 2024 года.

Рассмотрим таблицу 6. В ней представлены коэффициенты корреляции коэффициента преломления без ненужного нам месяца – августа 2024 года.

Таблица 6. Величина коэффициентов корреляции коэффициента преломления по высотам за месяцы со стабильной атмосферой.

Месяц	0-500 м	0-600 м	0-700 м
Май 2023	0,892	0,871	0,245
Сентябрь 2023	0,068	0,154	0,184
Сентябрь 2024	0,258	0,369	0,420

Параметр корреляции по данным расчётам получился допустимый, в пределах нормы. Максимальное значение наблюдалось в мае 2023 года. Именно в это время атмосфера более стабильна. Объяснением этому служит отсутствие гроз на протяжении всего месяца, что характерно для особенностей климата данного региона в весенние месяцы. Небольшое количество дней с осадками, что также обусловлено особенностями климата (приложение 5). Плавный градиент температуры воздуха и почвы, так как солнце весной ещё только начинает постепенно прогревать почву, суточный ход температуры более плавный, угол преломления света в такой среде минимальный.

Если рассматривать осенние месяцы за разные годы, значение коэффициента корреляции очень схожи и имеют одинаковую зависимость – с увеличением толщины слоя значение увеличивается. Это обуславливается усилением конвективных потоков, которые образуются из-за слабого

прогрева почвы и воздуха, что приводит к быстрому выхалаживанию поверхности земли. Данные подтверждаются особенностями климата, характерного для региона, на котором расположена станция.

Заключение по главе.

На основе полученных данных коэффициентов преломления была проведена оценка значимости. Значения коэффициентов корреляции подтверждают прямую связь между параметром преломления и высотой. Также подтвердилась связь между индексом преломления и метеорологическими параметрами. Физико-географические особенности места нахождения аэрологической станции Воейково послужили опорной точкой для выбора месяцев и данных для последующих расчётов интересующих нас величин.

Метод определения последующего угла отклонения атмосферной рефракции доказан. Определение данным методом параметра преломления значительно упрощает радиолокационные измерения и помогает определить взаимосвязь между атмосферными процессами и искажением в них радиоволны.

Вывод.

Целью работы являлся анализ и моделирование пространственной стохастической изменчивости коэффициента преломления на основе современных теоретических методов.

Моделирование пространственной стохастической зависимости коэффициента преломления напрямую зависит от состояния среды и изменения в этой среде параметров. Данное утверждение было доказано путём выполнения практического задания.

В ходе выполнения работы были рассмотрены все факторы, влияющие на изменения результирующих значений коэффициента преломления. Также представлены расчёты в устойчивой и неустойчивой атмосфере. Проведена параллель между результатами и влияющими на них факторами.

Теоретические сведения подтвердились. Рассматриваемый метод оправдал свою актуальность и точность. Работа завершена.