



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: «Влияние метеорологических факторов на точность измерения
высоты нижней границы облачности»

Исполнитель Алексеева Наталья Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

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

Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна

(фамилия, имя, отчество)

« 04 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Методы и средства измерения высоты НГО	6
1.1. Определение ВНГО	6
1.2. Литературный обзор публикаций по теме	7
1.3. Методы определения ВНГО	9
2. Материалы и методы исследования	14
2.1. Измерительные приборы	14
2.2. Исходные данные	18
2.3. Климатическая характеристика района исследования	21
3. Оценка точности и надежности восстановления ВНГО в различных погодных условиях	24
3.1. Оценка точности восстановления ВНГО в разные сезоны	24
3.2. Оценка влияния твердых осадков на восстановление ВНГО	37
3.3. Оценка влияния жидких осадков на восстановление ВНГО	39
3.4. Оценка влияния туманов на восстановление ВНГО	41
3.5. Расчет повторяемости явлений, влияющих на результаты измерений ВНГО	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	46
Список литературы	49

ВВЕДЕНИЕ

Основным потребителем информации о высоте нижней границы облачности (ВНГО) является авиация. Низкая облачность и ограниченная видимость – основной фактор, который усложняет взлет и посадку как малой, так и большой авиации, а также является основной причиной авиационных происшествий. Существует такое понятие как минимум погоды, который используется в авиации. Минимум погоды – это предельные погодные условия, при которых разрешается выполнять полеты. Одной из составляющей минимума погоды как раз является ВНГО. Полеты при низкой облачности относятся к полетам в сложных метеорологических условиях, поэтому информация о ВНГО и ее прогноз является важной составной частью метеорологического обеспечения авиационной деятельности.

Стоит учесть, что ВНГО одна из наиболее сложных в определении метеорологических характеристик. Все потому, что до сих пор нет четкого определения данному термину, как и эталона, от чего возникают сложности в ее измерении, а вместе с ними и ошибки.

В данной работе рассматриваются причины ошибок при измерении ВНГО на примере приборов ДВО-2, ДВО-4 и CL-31. Однако большее внимание уделено прибору ДВО-2, так как CL-31 – финский датчик, поставки которого приостановлены на территорию Российской Федерации.

Актуальность настоящей работы обусловлена тем, что ВНГО – очень важная характеристика для безопасного полета воздушного судна, при этом нет абсолютно точного прибора для её измерения, поэтому необходимо учитывать причины, которые могут исказить информацию о ВНГО.

Целью работы является определения влияния метеорологических факторов на точность измерения высоты нижней границы облачности.

Данная цель конкретизировалась в следующих задачах:

1. Проанализировать теоретические и эмпирические работы по теме измерения ВНГО
2. Изучить климатические и погодные особенности исследуемого района
3. Выявить факторы, влияющие на измерения ВНГО
4. Выявить закономерности погрешностей измерений
5. Рассчитать повторяемости явлений, при которых достигаются ошибки в измерении высоты нижней границы облачности.

Объект исследования – высота нижней границы облачности.

Предмет исследования – точность измерений ВНГО.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка используемой литературы.

Во введении обозначена актуальность и значимость проблемы, определены цель, задачи, объект и предмет дипломной работы.

В первой главе «Методы и средства измерения высоты НГО» были выявлены причины отсутствия определения ВНГО и, как следствия, эталона, который необходим для оценки точности измерения, также изучены литературные источники по смежным темам с измерением ВНГО и методы измерения высоты нижней границы облачности.

Во второй главе «Материалы и методы исследования» изучены материалы для дальнейшего исследования, изучены приборы, благодаря которым получены результаты измерения, рассчитаны погрешности измерений для трех приборов и изучены климатические и погодные особенности района исследования.

В третьей главе «Оценка точности и надежности восстановления ВНГО в различных погодных условиях» проведено исследование влияния различных погодных явлений на погрешности измерений высоты нижней границы облачности.

В заключении даются выводы о проделанной работе.

Список литературы включает в себя 13 источников.

1. Методы и средства измерения высоты НГО

1.1. Определение ВНГО

Вопрос о формировании облака играет важную роль в теории циклонов, а также служит предметом изучения в метеорологии и предсказании погоды. Общепринято, что перенос влаги осуществляется из нижних (более теплых и потому с большей абсолютной влажностью) воздушных слоев. Предложен ряд механизмов, среди которых конвекция — доминирующая. Однако конвекция как таковая в действительности имеет свои недостатки. В предположении, что пар захватывается движущимся вверх потоком воздуха, приходят к выводу, что при движении воздуха вниз в пределах конвективной ячейки этот пар (или значительная его часть) будет опускаться. Тем не менее, имеет место перемешивание воздушной массы, что приводит к перераспределению влаги в атмосфере. Поэтому можно сказать, что конвекция лишь ускоряет процесс установления некоторого равновесного распределения влаги, но не является причиной направленного движения пара. Механизмы направленного (одностороннего) движения воздуха (холодный воздух с гор или бриз на границе море — суша), как существенно неравновесные процессы, нами не рассматриваются. Поэтому возникает вопрос о конечном равновесном распределении влаги по высоте, к которому стремится система (сухой воздух и насыщенный водяной пар).

Общеизвестно, что температура воздуха в атмосфере уменьшается с высотой. Плотности (или парциальные давления) двух составляющих атмосферы (воздух и пар) также уменьшаются с высотой, но по разным законам. Важнейшая характеристика для описания конденсации — давление насыщенного пара — напрямую зависит от распределения температуры в атмосфере. Распределение пара в атмосфере описывается барометрической формулой в соответствии с температурным профилем основной массы воздуха.

Нижняя граница облака определяется высотой, на которой давление пара достигает насыщения при данной температуре. Для определения этой высоты необходимо знать распределение давления насыщения и фактическое распределение ненасыщенного пара. Оказывается, что зачастую давление насыщенного пара уменьшается быстрее, чем равновесное распределение пара, приводя, таким образом, к образованию облаков. Конденсация влаги внутри облака создает дефицит парциального давления пара, что приводит к вертикальному потоку пара. Однако термодинамика с учетом конденсации существенно отличается от таковой в подоблачном слое.

Как итог: ВНГО не имеет четкого определения из-за особенностей строения подоблачного слоя и зависимости высоты от многих метеорологических параметров (например, таких как характеристик воздушных масс и рельеф местности)

1.2. Литературный обзор публикаций по теме

Для того, чтобы найти отправную точку в данном исследовании, были изучены теоретические и эмпирические работы по теме измерения ВНГО.

«В статье рассмотрен процесс определения высоты нижней границы облаков (ВНГО) и проанализированы существующие способы решения уравнения лазерного зондирования. Предложен новый метод обработки эхосигналов, который существенно сокращает необходимое количество импульсов, испускаемых лазерным измерителем, и тем самым упрощает получение выходных данных, что важно в практической деятельности, особенно в сложных метеорологических условиях при выпадении осадков» [1].

«Рассмотрены различные методы определения параметров, входящих в уравнение лазерного зондирования, выполнен их анализ. Составлен алгоритм определения высоты нижней границы облаков по данным, полученным от лидара, который производит зондирование короткими лазерными импульсами для трех слоев атмосферы» [2].

«Светолокационный измеритель высоты нижней границы облаков относится к измерению оптических характеристик атмосферы с целью определения высоты обнаружения взлетно-посадочной полосы (ВПП) в интересах метеорологического обеспечения полетов авиации. Светолокационный измеритель высоты нижней границы облаков содержит излучатель и приемник световых импульсов, оптическую систему, формирователь запускающих импульсов, хронизатор, блок обработки эхосигналов и измеритель временных интервалов, управляющий преобразователь и блок статистической обработки результатов измерений, содержащий схему управления и соединенные последовательно первое запоминающее устройство, устройство считывания и перезаписи, второе запоминающее устройство и буферное устройство. Управляющие выходы первого и второго запоминающих устройств, устройства считывания и перезаписи, буферного устройства соединены с выходом схемы управления, вход которой связан с выходом хронизатора. Вход первого запоминающего устройства связан с выходом измерителя временных интервалов и первым выходом устройства. Выход буферного устройства связан с входом управляющего преобразователя и является вторым выходом устройства. Выход управляющего преобразователя соединен с управляющим входом формирователя запускающих импульсов. Изобретение позволяет повысить точность измерений при наличии ограниченного ресурса работы излучателя и уменьшить плотность его излучения до безопасных для глаза величин» [3].

«Цель: создание фоновой оптико-метеорологической модели измерения высоты нижней границы облаков для реализации ее в приборах. Применена разработанная модель измерения высоты нижней границы облаков в оптико-электронном комплексе. Разработана методика определения высоты нижней границы облаков. Повышена надежность работы оптико-электронного комплекса. Полученные результаты использованы в ООО "ЛОМО-МЕТЕО"» [4].

«Материалы всероссийской научно-практической конференции «Гражданская авиация: прошлое, настоящее, будущее (Авиатранс-2023)», (Авиатранс-2023) включают статьи ученых, студентов, магистрантов а также представителей авиакомпаний, промышленных предприятий, общественных движений и т.д. В них рассмотрены исторические аспекты развития авиации и авиационного образования, инновационные решения и технологии при производстве, эксплуатации и ремонте авиационной техники и в управлении воздушным движением, актуальные проблемы развития транспортных коммуникаций, вопросы управления и безопасности на транспорте, информационной безопасности объектов гражданской авиации, менеджмента и инноваций в гражданской авиации, а также перспективы развития транспортной отрасли. Материалы публикуются в авторской редакции. Издание предназначено для ученых, занимающихся проблемами совершенствования гражданской авиации, руководителей, специалистов транспортных предприятий, органов власти и управления, а также для преподавателей и студентов» [5].

В статье [6] изучен сезонный ход ВНГО на примере аэропорта республики Адыгея.

1.3. Методы определения ВНГО

Под термином ВНГО принято принимать уровень конденсации водяного пара или трехмерный слой переменной оптической плотности с постепенным ухудшением видимости от легкого затуманивания до полной ее потери.

Принцип измерения высоты нижней границы облаков основан на отличиях характеристик спектральной селективности внутри облака от соответствующих характеристик атмосферы, предшествующей облачности. Благодаря этому свойству в нижней части облака образуется световое пятно от источника света, установленного на поверхности земли, над которой измеряется высота нижней границы облаков. Расстояние между источником света и образованным им световым пятном в основании облака в настоящее время определяется двумя методами: путем измерения углового превышения (триангуляционный метод) и

посредством отсчета времени прохождения луча света от источника света (передатчика) к световому пятну в основании облака и обратно к приемнику. Иногда для определения высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости) рекомендуется использовать шаропилотный метод [7].

Для определения высоты нижней границы облаков (ВНГО) на аэродромах используют визуальные, инструментально-визуальные и инструментальные методы. Для инструментальных измерений ВНГО используются: импульсно-световой измеритель высоты облаков (ИВО-1М); регистраторы высоты облаков (РВО-2, РВО-2М, РВО-3); датчик высоты нижней границы облаков (ДВО-2); лазерные измерители высоты облаков (ДОЛ); метеорологические радиолокаторы (МРЛ). К инструментально-визуальным методам определения ВНГО относится шаропилотный метод.

Визуальный метод используется при отсутствии возможности использования других методов измерения, при этом от наблюдателя требуется большой опыт и определенные навыки.

Измерение углового превышения заключается в определении высоты светового пятна, образовавшегося в основании облачного слоя в результате освещения его узким направленным лучом. Световое пятно может образоваться от прожектора, направленного вертикально вверх с перемещающимся в вертикальной плоскости сканирующим лучом. Высота нижней границы облаков (высота светового пятна) в обоих случаях определяется по формуле 1.3.1.

$$H = \delta \operatorname{tg} \alpha \quad (1.3.1)$$

Где H - высота светового пятна на основании облака, принимаемая за высоту нижней границы облаков, δ — базовое расстояние между приемником света, отражаемого от светового пятна, и прожектором, α — угол, под которым наблюдается световое пятно.

По принципу вертикально направленного светового луча работает потолочный прожектор ПИ-45. Вследствие небольшой силы света

прожекторного луча и отсутствия светочувствительного элемента он используется для измерения ВНГО только в темное время суток. В регистраторе высоты нижней границы облаков М-105 (использовался в 80-е гг.) световое пятно на основании облака создавал качающийся в вертикальной плоскости мощный импульсный прожектор, направленный вертикально вверх. Длина базы М-105 составляла 100 м, и он использовался для измерения ВНГО круглосуточно.

Измерение ВНГО по времени прохождения сигнала. На принципе измерения расстояния путем определения времени прохождения луча света к нижнему основанию облака и обратно основаны светолокационные измерители высоты нижней границы облаков.

В наблюдениях за высотой нижней границы облаков на аэродромах, оборудованных средствами для посадки по приборам, иногда используются шары-пилоты. До внедрения в оперативную работу светолокаторов (ИВО) шары-пилоты были единственным средством измерения высоты нижней границы облаков в дневное время, ночью использовались потолочные прожекторы. Шары-пилоты, предназначенные для определения высоты нижней границы облаков, представляют собой латексную оболочку, наполненную легким газом (водородом или гелием) таким образом, чтобы их вертикальная скорость составляла 120-180 м/мин. Скорость подъема шара-пилота определяется по длине окружности наполненной оболочки и свободной подъемной силе. Использование шаров-пилотов полезно в случае выхода из строя основных приборов. Средства измерения ВНГО конструктивно состоят из передатчика, приемника и пульта управления. Для измерения высоты нижней границы облаков в светлое время суток необходим мощный источник света, излучаемого от передатчика к основанию, и чувствительный приемник света. В качестве источника света в светолокационных измерителях используются импульсные газоразрядные лампы большой мощности, обеспечивающие с помощью параболического зеркала излучение света. Световые импульсы, которые

отражаются от основания облака, принимаются чувствительным фотоэлементом и преобразуются в электрический сигнал, который усиливается и передается в пульт управления. Там измеряется время между моментом излучения импульсного светового сигнала и моментом приема отраженного сигнала. Время прохождения светового сигнала от передатчика до основания облака и обратно определяется с помощью измерителя временных интервалов или электронно-лучевой трубки, которая используется в измерителях высоты нижней границы облаков ИВО (РВО). Передатчики и приемники световых импульсов устанавливаются в открытых местах, над которыми должно производиться измерение высоты нижней границы облаков. Пульт управления устанавливается в рабочем помещении и служит не только для преобразования измерительных сигналов, поступающих от измерителя ВНГО, в высоту нижней границы облаков, но и для дистанционного управления передатчиком, приемником и индикации результатов измерения. В гидрометеорологической сети России измерители высоты нижней границы облаков, работающие на светолокационном принципе, получили широкое применение. Измеритель высоты облаков (ИВО) много раз модернизировался (ИВО-1, ИВО-1м, РВО, РВО-2 и РВО-2м). Приборы ИВО-1 м и РВО-2м являются основными средствами измерения высоты нижней границы облаков на аэродромах гражданской авиации России.

Лазерные измерители ВНГО состоят из передатчика, приемника и обрабатывающего (регистрирующего) устройства. Передатчик, приемник и обрабатывающее устройство монтируются в одном блоке. В современных лазерных измерителях в качестве источника световых импульсов используются полупроводниковые лазеры, вырабатывающие импульсы света мощностью около 75 Вт с частотой около 1 кГц. Длина волны излучения лазера составляет 900 нм. Оптические устройства передатчика располагаются таким образом, что лазерный источник и детектор приемника находятся в фокусе телескопической системы. На поверхности линз наносятся соответствующие покрытия толщиной в одну четверть длины волны излучения лазера с целью уменьшения отражения

и обеспечения высокого уровня пропускания света. Отверстие источника света герметично закрывается стеклянным окошком и устанавливается под углом для обеспечения стока воды от осадков. Приемник имеет ту же конструкцию, что и передатчик, только вместо источника света в него входят фотодиод и оптический фильтр. Фильтр не пропускает большую часть фонового рассеянного солнечного излучения, облегчая прием рассеянного лазерного излучения. Излучатель и приемник устанавливаются таким образом, чтобы пучок света излучателя и поле зрения приемника совмещались на высоте 300 м. Верхние части передатчика и приемника снабжены оптическими отражателями, предохраняющими устройство от прямого солнечного излучения. Лазерные импульсы света практически пронизывают атмосферу до 3-5 км. Встречая на пути облака, лазерные импульсы отражаются, рассеиваются и поглощаются. Входные сигналы отражения и рассеяния, поступающие на детектор приемника, разделяются электронным обрабатывающим устройством на последовательные импульсы, каждый из которых отображает минимальное обнаружимое приращение высоты. В лазерных облакомерах оно равно 15 м. Для того чтобы отличить полезный сигнал от шумов, а также получить профиль сигналов обратного рассеяния и отражения, число сигналов обратного рассеяния и отражения, поступивших в приемник от лазерных импульсов, суммируется. Полезный сигнал умножается на число импульсов лазерного света, а шумы при суммировании подавляют друг друга. Степень подавления белых (гауссовых) шумов равна корню квадратному из числа выборок (импульсов). Технические подробности излучения лазерных импульсов, приема рассеянных и отраженных от них сигналов и их обработка не полностью раскрываются изготовителями. Лазерные облакомеры являются в настоящее время наиболее точными средствами измерения высоты нижней границы облаков и вертикальной видимости [7].

Основным отличием РВО-2М от ИВО является конструкция защитных стекол передатчика и приемника. Открывающиеся и закрывающиеся

дистанционно управляемые защитные крышки для защиты стекол передатчика и приемника из конструкции ИВО и РВО-2 исключены. Защитные стекла передатчика и приемника ИВО заменены в РВО-2М на наклонные стекла с токопроводящим обогревным покрытием. Включение (выключение) обогрева стекол производится с пульта управления. РВО-2М предназначен для определения высоты нижней границы облаков непосредственно над местом установки передатчика и приемника световых импульсов в любое время суток. При работе с пульта управления по отсчетам на электронно-лучевой трубке и шкале высот производится измерение времени запаздывания импульса, поступившего от приемника, относительно импульса, поступившего от передатчика.

Облакомер CL31. Облакомер CL31 является лазерным измерителем высоты нижней границы облаков и вертикальной видимости, выпускается фирмой Vaisala (Финляндия). Применена лазерная импульсно-диодная технология LIDAR (Light Detection and Ranging), при которой короткие мощные импульсы посылаются в вертикальном направлении. Обратно рассеянный сигнал при поступлении в приемник запоминается, обрабатывается и выдается в виде цифровых сигналов в терминал, где отображается в виде измеренных значений высоты нижней границы облаков или вертикальной видимости. Диапазон измерения высоты нижней границы облаков и вертикальной видимости составляет 0-7500 м, разрешение — 5 м, интервал измерений — 2 с. Высота датчика — 1190 мм, размер измерительного блока — 620 235 200 мм, масса 12 кг. Дистанционность передачи измерительных сигналов по двухпроводной линии связи составляет 300 м, через модем — 16 км.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Измерительные приборы

В данном исследовании был применен светолокационный метод измерения высоты нижней границы облачности, а именно датчики ДВО-2

и CL-31. Главное отличие этих датчиков заключается в том, что в качестве излучателя в ДВО-2 применена импульсная лампа, а в CL-31 лазерный излучатель.

Принцип действия измерителей высоты облаков ДВО-2 основан на измерении времени прохождения светового импульса. Полученный временной интервал преобразуются в значение высоты нижней границы облаков (ВНГО). Значения ВНГО выводятся на индикатор блока измерительного и передаются по линиям связи на дистанционный пульт или автоматическую метеостанцию. Измерители ДВО-2 состоят из источника световых импульсов, приемника, блока измерительного, пульта дистанционного. Конструктивно источник световых импульсов и приемник выполнены в корпусах одного типа. Верхние крышки источника и приемника имеют наклонные стекла, которые защищают от скопления осадков и пыли. На защитные стекла с внутренней стороны нанесено токопроводящее покрытие, обеспечивающее обогрев стекла. Источник световых импульсов состоит из импульсной лампы, системы поджига, отражателя (параболическое зеркало), юстировочно-фокусирующего механизма, блока питания, терморегулятора обогрева стекла, электронного коммутатора, модуля защиты и фильтрации. Приемник состоит из фотоусилителя, диафрагма которого расположена в фокальной плоскости параболического отражателя. Фотоусилитель служит в качестве преобразователя световых импульсов в электрические сигналы. Конструкция остальных узлов приемника аналогична конструкции передатчика. Блок измерительный состоит из двух самостоятельных блоков: блока питания и платы измерительной, на которой расположены цифровые идентификаторы и кнопки переключения режимов работы датчика. Пульт дистанционной размещен в металлическом корпусе и состоит из двух печатных плат: платы клавиатуры и индикации и платы управления. Пульт дистанционный служит для дистанционного управления блоком измерительным, приема информации о ВНГО, отображения результатов, передачи данных на персональный компьютер (ПК) через последовательный канал связи RS-232. Датчики высоты облаков ДВО-2 могут работать автономно

и в составе автоматизированных метеорологических станций. Датчики высоты облаков ДВО-2 работают круглосуточно, имеют последовательный интерфейс RS-232C. Дальность подключения датчиков высоты облаков ДВО-2 составляет 8 км. Информация о измеренных данных отображается на экране пульта дистанционного и блока измерительного, измеренные данные в памяти датчика ДВО-2 не хранятся, данные могут архивироваться только на внешнем накопителе (ПК). Для защиты измерителей ДВО-2 от несанкционированного вмешательства источник световых импульсов, приемник, блок измерительный и пульт дистанционный пломбируются.

В приборе CL31 применена лазерная импульсная диодная технология LIDAR (LIDAR = Light detection and ranging), при которой посылаются короткие мощные импульсы в вертикальном или почти вертикальном направлении. Отраженный луч, или обратное рассеяние, вызванное дымкой, туманом, мглой, виргой, выпадающими осадками и облаками, измеряется по мере прохождения лазерных импульсов атмосферы. Получаемый профиль обратного рассеяния, т.е. отношение интенсивности сигнала к высоте, запоминается и обрабатывается и таким образом определяется нижний край облачности. Зная скорость света, время задержки между посылкой лазерного импульса и приемом отраженного сигнала, можно определить высоту нижней границы облаков. Облакомер CL31 одновременно способен определить три слоя облачности. Если нижняя граница облачности размыта из-за осадков или тумана, CL31 выдает сообщения о вертикальной видимости. Никаких настроек на месте установки не требуется. Встроенное программное обеспечение выполняет сервисные и контрольные функции, а также непрерывно выдает сведения о состоянии прибора. Программное обеспечение разработано таким образом, что позволяет выдать полный профиль обратного рассеяния.

Сравнительный анализ (до проведения опыта)

Главное отличие – излучатель. В ДВО-2 это лампа, в CL31 – лазер. Нельзя однозначно сказать, какой из них лучше или хуже. Диаграмма направленности лампы шире, чем лазера, что говорит о том, что информация от ДВО-2 будет получена от большей территории, чем от CL31.

Следует предположить, что осадки окажут влияние на работу приборов. На данном этапе трудно оценить это влияние, но можно предположить, что из-за более широкой диаграммы направленности излучатель в виде лампы будет более точным. Также виды осадков будут иметь свое влияние: предположу, что при твердых осадках точность измерения ВНГО будет ниже (излучательная способность, в особенности лазера, будет уменьшаться). Интенсивность осадков: при более интенсивных осадках измерительная ошибка будет увеличиваться.

Атмосферные явления также могут влиять на определение ВНГО

Чисто экономически ДВО-2 дешевле в два раза, если сравнивать цены в интернет - ресурсах (информация на момент 05.01.2024). Также следует отметить, что ДВО-2 - российский датчик, производства ЛЗОС, проблем с поставкой данного датчика не предвидится, в то время как CL31 - финский датчик, производства «Вайсала» на момент 05.01.2024 приобрести большая проблема. Информация с официального сайта «Вайсала»: «Компания Vaisala решила приостановить свою деятельность в России и Беларуси до дальнейшего уведомления. С 1 марта 2022 года мы не принимаем никаких новых заказов от клиентов из России и Беларуси» [10].

Для того, чтобы можно было оценивать точность измерения ВНГО, на основе ДВО-2 в Институте радарной метеорологии в Воейково был создан третий прибор ДВО-4, который от ДВО-2 отличается тем, что высоковольтная часть измерительного блока расположена в передатчике, измерительная плата и источники питания для нее и фотоусилителя расположены в приемнике.

В настоящей работе были проанализированы данные Санкт-Петербурга с мая 2010 по апрель 2011 года.

2.2. Исходные данные

В главе 1 уже говорилось о том, что у измерителя высоты облачности отсутствует эталон, который необходим для оценки погрешности измерений. В соответствии с «Руководством по метеорологическим приборам и методам наблюдений» (ВМО -№8, шестое издание 2000г.) при отсутствии эталонов метеозлемента, за истинное (эталонное) значение принимается среднее (медианное) его значение, полученное по синхронным измерениям нескольких (не менее трех) датчиков (приборов), установленных так, чтобы соблюдался принцип репрезентативности. При этом необходимо выполнить следующие условия:

1. Количество приборов должно быть максимально возможным, но не менее трех
2. Расстояния между приборами, измеряющими высоту НГО должно быть минимально
3. Измерения должны быть непрерывными и проводиться в одно время с дискретностью в 1 минуту
4. Необходимо обеспечить визуальное определение высоты нижней границы облачности и метеорологических явлений, таких как дымка, туман, морось, дождь, снег, ливень и т.д.

Для сравнения результатов измерения высоты нижней границы облачности тремя приборами необходимо обработать данные. На первом этапе исходные данные были разделены на временные интервалы. Внутри минутного интервала было выбрано минимальное измеренное значение, которое принималось за высоту нижней границы облачности в данную минуту измерения по каждому из трех приборов. Если данных нет хотя бы у одного из датчиков измерения ВНГО – измерения не учитывались.

Далее по каждому дню были сформированы таблицы в EXCEL с данными измерений ВНГО трех датчиков, которые в дальнейшем были распределены в

папки по четырем сезонам (осень, зима, весна и лето). Пример таблицы с исходными данными представлен в таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1. Фрагмент таблицы с исходными данными за осенний период

Диапазон	σ_{H_0}						H_0	Явления	форма облаков	кол.	
	$H_{тр}$	σ_{H_1}			σ_{H_2}						
		Dvo2	Dvo4	CL31	Dvo2	Dvo4	CL31				
$\Sigma(<61)$	54.18	5.11	3.6	3.69	9.59	6.84	6.68	В	Явления	форма облаков	кол.
<61	53.55	3.39	2.18	2.91	6.57	4.24	5.38	1		<50	179
	52.46	5.09	2.72	3.35	9.97	5.52	6.36	2		50	295
	53.02	5.85	3.64	2.41	11.04	7.00	4.40	3		200	392
	55.19	6.92	3.88	5.43	12.99	7.73	9.76	4	осадки	500	129
	52.39	5.47	3.21	2.88	10.62	6.45	5.24	5		500	133
	56.06	3.83	5.45	3.18	6.90	9.80	5.70	6	осадки	Cb, Fmnb	330
	49.39	4.40	3.97	0.43	8.95	8.05	0.89	7		Cb, Fmnb	30
	56.18	7.76	2.70	5.06	13.78	4.87	8.90	8	осадки	Sc	24
	54.84	4.86	2.10	5.67	8.88	4.01	10.19	9		Sc	51
	56.83	5.55	4.98	8.02	9.69	8.90	14.23	10	ж осадки	Sc, Fmnb	31
	57.40	5.39	2.20	6.08	9.47	3.95	10.53	11		St, Sc	75
$\Sigma(61-200)$	124.01	9.64	11.05	16.87	7.78	8.58	13.08	В	Явления	форма облаков	кол.
61-200	70.13	3.89	6.91	6.51	5.65	9.67	9.15	1	ж осадки	50	50
	69.86	5.66	4.67	8.23	7.87	6.36	11.22	2		50	374
	77.56	8.03	3.25	8.15	10.14	4.17	9.93	3	ж осадки	200	222
	83.75	21.24	15.09	33.35	23.45	16.05	25.20	4		200	87
	63.33	6.48	2.16	6.40	10.28	3.37	9.88	5	ж осадки	500	537
	68.84	6.74	2.30	6.18	9.91	3.20	8.87	6		500	641
	92.97	19.97	7.14	16.06	25.10	6.83	21.22	7		Sc	51
	173.27	4.09	11.06	13.36	2.74	6.67	8.35	8		Sc, Cb, Sc	83
	91.60	14.96	13.93	26.72	11.37	10.27	19.28	9	ж осадки	Sc, Cb, Sc, Fmnb	49
	180.47	8.09	4.51	9.64	4.49	2.49	5.31	10	ж осадки	Sc, Cb, Sc	74
	91.02	23.14	5.39	21.05	25.53	5.66	23.35	11		Sc, Sc	80

Поскольку значимой в авиации считается облачность с нижней границей до 1500 метров или ниже верхнего предела минимальной высоты в секторе, в зависимости от того, какая величина больше, при расчетах учитывалась облачность только нижнего яруса.

Для иллюстрации исходных измерений был построен график зависимости ВНГО, измеренной приборами ДВО-2, ДВО-4 и CL-31, от времени, представленный на рисунке 2.2.1.

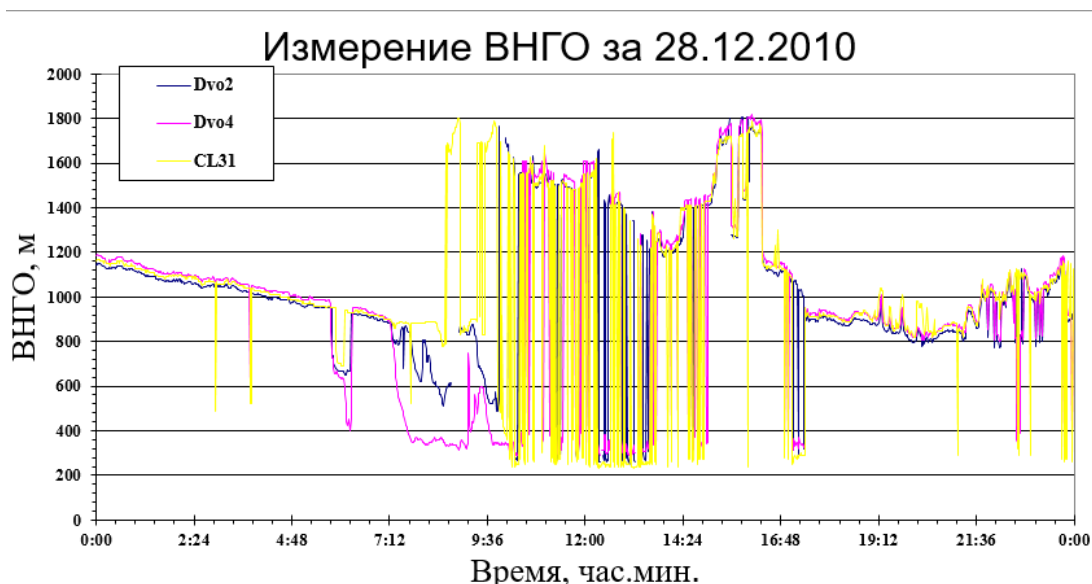


Рисунок 2.2.1. Данные измерений ВНГО тремя приборами за 28.12.2010

Синим цветом показаны измерения прибором ДВО-2, фиолетовым – ДВО-4, желтым – CL-31. При сильных разбросах или «гребенках» погрешности измерений большие, при более гладких участках ошибка не достигает больших значений. Гребенки возникают при переменном приеме сигнала с одного объекта на другой, поэтому «гребенка» равнозначна ошибке. Сильные гребенки у всех приборов наблюдались примерно с 10 до 17:30.

С 0ч до примерно 5:40 наблюдался гладкий участок для ДВО-2, приборы ДВО-4 и CL-31 в 2:56 и 3:47 измеряют с ошибкой. До 21:00 наблюдался более-менее гладкий участок для трех приборов, далее сильная гребенка до конца суток фиксируется у лазерного измерителя облаков, приборы ДВО измеряли с ошибкой примерно с 22 до 23:00.

Среднее значение (далее – эталонное/истинное) было найдено по формуле 2.2.1. для каждого срока

$$H_{\text{ср}} = \frac{H_{\text{ДВО2}} + H_{\text{ДВО4}} + H_{\text{CL31}}}{3} \quad (2.2.1)$$

где $H_{\text{ДВО2}}, H_{\text{ДВО4}}, H_{\text{CL31}}$ – высота, измеренная приборами ДВО-2, ДВО-3 и CL-32 соответственно

Далее по формуле 2.2.2 для каждого срока и датчика было найдено среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{(H_{\text{ср}} - H_{\text{изм}})^2}{2}} \quad (2.2.2)$$

где $H_{\text{изм}}$ – измеренная высота НГО

И, наконец, погрешность измерения ВНГО была найдена по формуле 2.2.3. для каждого срока и датчика

$$\Delta H = \frac{\sigma}{H_{\text{ср}}} \times 100\% \quad (2.2.3)$$

2.3. Климатическая характеристика района исследования

Ранее было выявлено, что на подоблачные структуры влияют рельеф местности, осадки и характеристики воздушных масс.

Основной особенностью климата Санкт-Петербурга является непостоянство погоды, обусловленное частой сменой воздушных масс, которые, в зависимости от района формирования, подразделяются на морские, континентальные и арктические. Морские воздушные массы поступают с запада, юго-запада или северо-запада при перемещении через северо-западные районы России атлантических циклонов. Циклоны приносят пасмурную, ветреную погоду и осадки. Зимой они являются причиной резких потеплений, а летом, наоборот, несут прохладу. С востока, юга или юго-востока входит сухой континентальный воздух. В антициклонах, сформировавшихся в этих воздушных массах, устанавливается малооблачная и сухая погода, летом жаркая, а зимой холодная. С севера и северо-востока, главным образом со стороны Карского моря, приходит сухой и всегда очень холодный арктический воздух, формирующийся надо льдом. Вторжения арктических воздушных масс сопровождаются наступлением ясной погоды и резким понижением

температуры воздуха. В областях повышенного давления, сформировавшихся в этих воздушных массах, даже летом наблюдаются заморозки, а зимой – наиболее сильные морозы. Разнообразие синоптических процессов и частая смена воздушных масс являются причиной больших междусуточных колебаний метеопараметров. Перепады температуры воздуха, обусловленные сменой воздушных масс, могут значительно превышать амплитуду суточных колебаний и нередко достигают $\pm 20^\circ$ и более [12].

Санкт-Петербург по своему географическому местоположению попадает в зону избыточного увлажнения. Выпадение осадков в Санкт-Петербурге определяется, главным образом, интенсивностью циклонической деятельности. В течение года осадки выпадают неравномерно: большая их часть (51 %) приходится на теплый период (май-сентябрь) и только 49 % – на холодный (октябрь-апрель). В среднем за год выпадает 667,7 мм осадков. Максимум осадков в Санкт-Петербурге приходится обычно на август (86,4 мм), а минимум – на март (35,4 мм). В отдельные годы, однако, такая закономерность нарушается, и как максимум осадков, так и минимум может наблюдаться в разные месяцы.

Одной из основных характеристик осадков является их интенсивность. В холодный период года, когда в Санкт-Петербурге преобладают продолжительные обложные осадки, интенсивность их невелика, в среднем 0,2...0,4 мм/ч. В летние месяцы интенсивность возрастает до 1,1...1,3 мм/ч за счет ливневых осадков.

Показательной характеристикой режима увлажнения является число дней с осадками. В Санкт-Петербурге за год в среднем отмечается 120 дней с суточным количеством осадков 1 мм и более. Максимальное число дней с осадками 1 мм и более приходится на осеннее-зимние месяцы (11-12 дней), минимальное – на весенние (8 дней).

Несомненно, что климат Санкт-Петербурга является дождливым, однако, бывают периоды бездождя. Непрерывные периоды, когда осадки не выпадают совсем или их суточное количество не превышает 0,1-0,2 мм, могут длиться до 25-30 дней.

3. Оценка точности и надежности восстановления ВНГО в различных погодных условиях

3.1. Оценка точности восстановления ВНГО в разные сезоны

Проанализировав данные ошибок по сезонам и высотам НГО были сформированы таблицы 3.1.1 и 3.1.2

Таблица 3.1.1. Погрешности измерения трех датчиков в зависимости от ВНГО

Диапазон высот НГО, метры	Погрешность, %
601-1000	$\pm 11,34$
201-600	$\pm 9,54$
61-200	$\pm 8,4$
<61	$\pm 8,04$
>1001	$\pm 4,95$

По данным таблицы 3.1.1 видно, что наименьшая относительная погрешность при измерении облачности высотой более 1001 метра, всего 4,95%. Однако для авиации больший интерес представляет более низкая облачность (до 200м) и туманы.

Погрешность при измерении облачности высотой нижней границы до 200 метров практически постоянна и составляет 8%. Если перевести значение погрешности в метры, то получается, что погрешность у облачности с высотой в 100 метров составит ± 8 метров, что уже немало. У облака с высотой нижней границы 200 м погрешность составит всего 4 метра, что незначительно. Однако в тумане (ВНГО 50м) погрешность составит 16 метров, что составляет две барические ступени, ошибка считается большой.

В диапазоне ВНГО 601-1000 метров наблюдается самая большая относительная погрешность в 11,34%

Таблица 3.1.2. Погрешности измерения ВНГО в зависимости от времени года

Время года	Относительная погрешность, %
Зима	$\pm 10,47$
Лето	$\pm 9,28$
Весна	$\pm 6,06$
Осень	$\pm 7,95$

Наибольшее значение погрешности в таблице 3.1.2. наблюдается в зимний период, предположительно потому что световой луч отражается от кристаллов льда/снега лучше, чем от дождевых капелек. Все дело в том, что световой импульс, который проходит путь от излучателя, может встретить на пути осадки и отразиться от них, не дойдя до нижней границы облака. В таком случае за ВНГО будет взята высота «столкновения» светового импульса с осадками.

Для оценки точности восстановления ВНГО были построены графики зависимости ошибок измерений трех датчиков от высоты нижней границы облачности, представленные на рисунке 3.1.1.

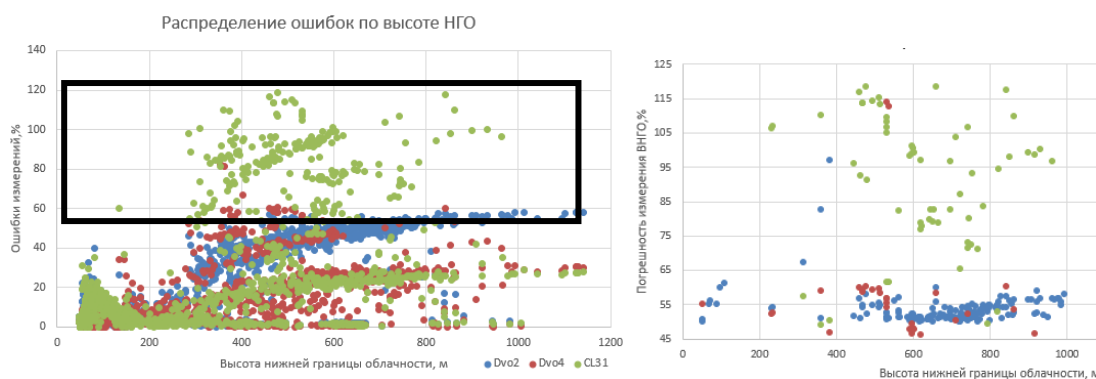


Рисунок 3.1.1. Распределение погрешностей измерений по ВНГО за 19.09.2010

На данном графике синим цветом выделены ошибки измерения прибором ДВО-2, бордовым – ДВО-4, зеленым – CL31. Наибольшее количество ошибок выявлены при измерении лазерным облакомером. Большинство ошибок находятся в диапазоне от 0 до 25%, что связано с тем, что граница любого облака неточна, размыта, неравномерна, поэтому такие ошибки рассматривать нет

смысла. При дальнейшем анализе рассматривались большие ошибки измерений, принятые за 50% и более в данной работе.

Для оценки точности восстановления ВНГО были построены таблицы и графики зависимости больших ошибок измерений (в 50% и более) прибора ДВО-2 от высоты нижней границы облачности по сезонам. Далее за эти же дни и сроки были построены графики по приборам ДВО-4 и CL31.

В осенний период измерения проводились три дня в сентябре (3, 13, 23 сентября); пять дней в октябре (14, 15, 25, 28 и 29 октября) и пять дней в ноябре (4, 7, 10, 16 и 20 ноября) 2010 года. Больше всего ошибок измерений в 50 и более % было получено 13 сентября 2010 года – 127 штук.

Для сравнения точности измерений ВНГО за осенний период на рисунке 3.1.2 представлен график зависимости погрешностей измерений более 45 % от ВНГО трех приборов.

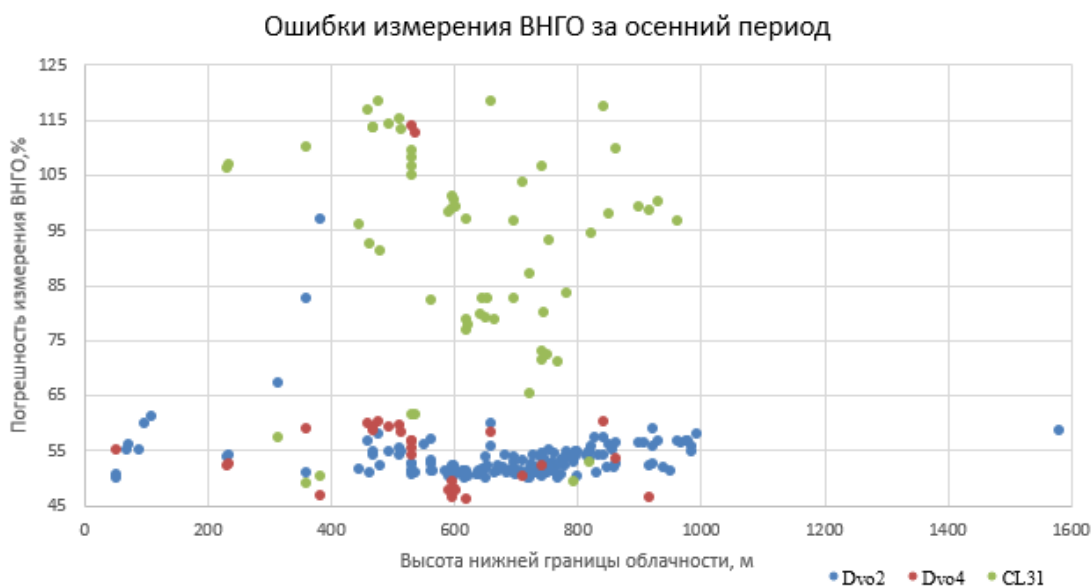


Рисунок 3.1.2. Распределение больших погрешностей измерения по ВНГО трех приборов за осенний период

На данном графике синим цветом выделены ошибки измерения прибором ДВО-2, бордовым – ДВО-4, зеленым – CL31. Наибольшие значения погрешностей измерений выявлены при измерении высоты нижней границы облачности прибором CL31, наименьшие – ДВО4. Можно сделать вывод, что

лазерный измеритель сильно проигрывает приборам ДВО. Также на графике заметно, что большая часть ошибок распределена в пределах высот от 400 до 1000 метров. В данных диапазонах высот располагаются облака, которые приносят осадки (кучево-дождевые Cb и слоисто-дождевые Ns), а также кучевые Cu, слоисто-кучевые Sc и слоистые St облака. Можно сделать вывод, что большинство ошибок было связано с осадками.

На рисунке 3.1.3. представлен график зависимости ошибок измерений более 50 % ДВО-2 от ВНГО за осенний период

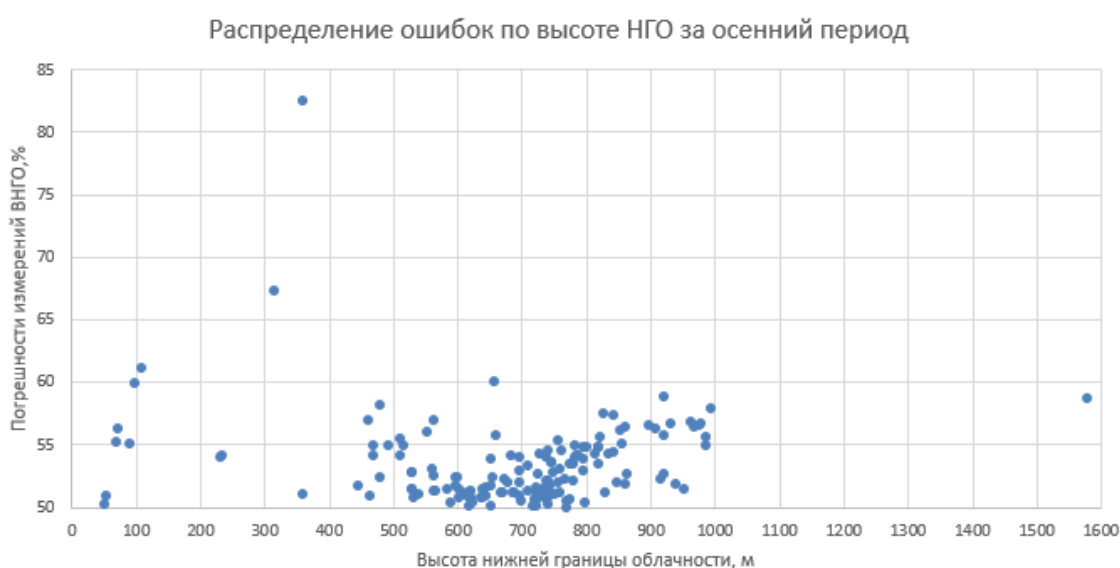


Рисунок 3.1.3. График зависимости больших погрешностей измерения ДВО-2 от ВНГО за осенний период

Анализируя график заметно скопление точек в интервале высот от 400 до 1000 метров. Именно в этом диапазоне чаще всего встречаются ошибки в измерении ВНГО в осенний период, значения ошибок колеблются от 50 до 60 %. Максимальная ошибка наблюдалась на высоте 383 м и составила 97%. Значение высоты за этот срок было проверено на грубый выброс методом трех сигм. Данное измерение принято за грубый выброс и не учитывалось при дальнейшем анализе. В диапазоне высот от 1000 метров до 1580 метров ошибки больше 50% в дни наблюдений отсутствуют.

Для дальнейшего анализа были проанализированы архивные данные погоды с сайта gr5.ru за каждый день проведенных измерений.

3 сентября 2010 года ошибки в 50 и более % были выявлены в 14:03 и в период с 23:29 - 23:58. Анализируя архивные данные о погоде можно заметить, что между сроками шел дождь, в сроки также наблюдался дождь, который явно имел влияние на ошибку в измерении ВНГО. Подобная ситуация наблюдалась 4 сентября, 14 и 15 октября.

13 сентября большие ошибки измерения наблюдались в течение всего дня. В сроки 3 и 6 часов наблюдался тихий ветер (2 м/с), дымка, в остальные сроки наблюдаются ветер 1 – 3 м/с, незамерзающий дождь, между сроками также наблюдался дождь.

23 сентября большие ошибки измерения наблюдаются с 0:36 до 2:52 часов. В срок 00 часов по данным из архива gr5 ветер и облачность отсутствовали. По данным измерений среднее значение ВНГО по трем приборам (которое используется в качестве эталона) практически равно проценту ошибки в 0:36 часов, затем процент ошибки остается практически неизменным, а высота нижней границы облачности растёт. В срок 3 часа наблюдался тихий ветер (1 м/с) и слоисто-кучевая, образовавшиеся из кучевой облачности, явлений нет.

25 октября с 0:08 до 3:12 часов наблюдаются ошибки в измерении ВНГО в 50% и более. В срок 00 часов осадков не наблюдалось, ветер легкий (2 м/с), в срок 3 часа ветер тихий (1 м/с), наблюдался дождь. Между сроками также наблюдался дождь

28 октября ошибка в 50% и более наблюдалась лишь в 19:00. В сроки 18 и 21 часов наблюдался незамерзающий дождь и легкий ветер (3 м/с), между сроками также наблюдался дождь.

29 октября, 4 и 16 ноября ошибки в измерении высоты нижней границы облачности не превышали 50%, однако по данным архивов gr5 в течение суток шёл незамерзающий дождь (в некоторые сроки слабый дождь). 20 ноября в

течение суток шел слабый непрерывный снег или снег с дождем. В эти дни погрешности в 50% и более не наблюдались как у приборов ДВО, так и у CL31.

7 ноября наблюдалась самая большая ошибка за осенний период (97,2%), зафиксированная в 17:59. В срок 18ч и между сроками наблюдался ливень.

Вывод: проанализировав архивные данные погоды за осенний период, было выявлено влияние жидких осадков на измерение высоты нижней границы облачности. Максимальная ошибка измерения ВНГО выявлена в ливневой дождь. Большая погрешность измерений также наблюдается при временных не затяжных жидких осадках (морось и/или дождь). При условии, что жидкие осадки идут в течении всех суток, ошибка измерений не превышает 50% для всех трех приборов. Также на ошибку измерения имеет влияние дымка и туман. Наибольшие ошибки измерения выявлены при измерении прибором CL31, наименьшие – ДВО-4.

Для сравнения точности измерений за зимний период на рисунке 3.1.4 представлен график зависимости погрешностей измерений от ВНГО трех приборов.

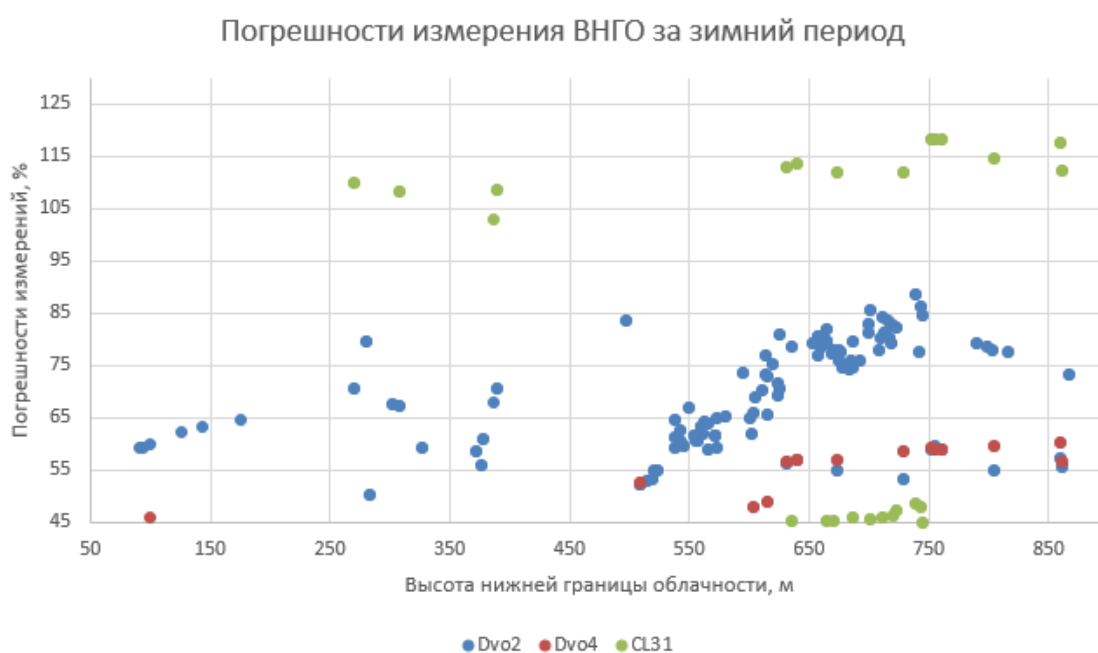


Рисунок 3.1.4. Распределение больших погрешностей измерения по ВНГО трех приборов за зимний период.

Синим цветом выделены ошибки измерений прибора ДВО-2, бордовым – ДВО-4, зеленым – CL31. В зимний период всё не так однозначно, как в осенний. Как минимальные, так и максимальные ошибки зафиксированы для прибора CL31. Ошибки за зиму в целом выше, чем за осень. Погрешностей прибора ДВО-4 значительно меньше, чем у ДВО-2 и лазерного измерителя ВНГО. В данном случае нельзя однозначно сказать по каким причинам выявляются большие погрешности измерений ВНГО.

В зимний период измерения проводились 2, 23 и 28 декабря 2010 года; 13, 18, 19 и 27 января 2011 года; 21 февраля 2011 года. Ошибки в 50% и более были найдены 23 и 28 декабря, 13, 18, 19 и 27 января. Больше всего ошибок в 50% и более было выявлено 28 декабря – 160 штук.

На рисунке 3.1.5 представлен график зависимости ошибок измерений от ВНГО за зимний период

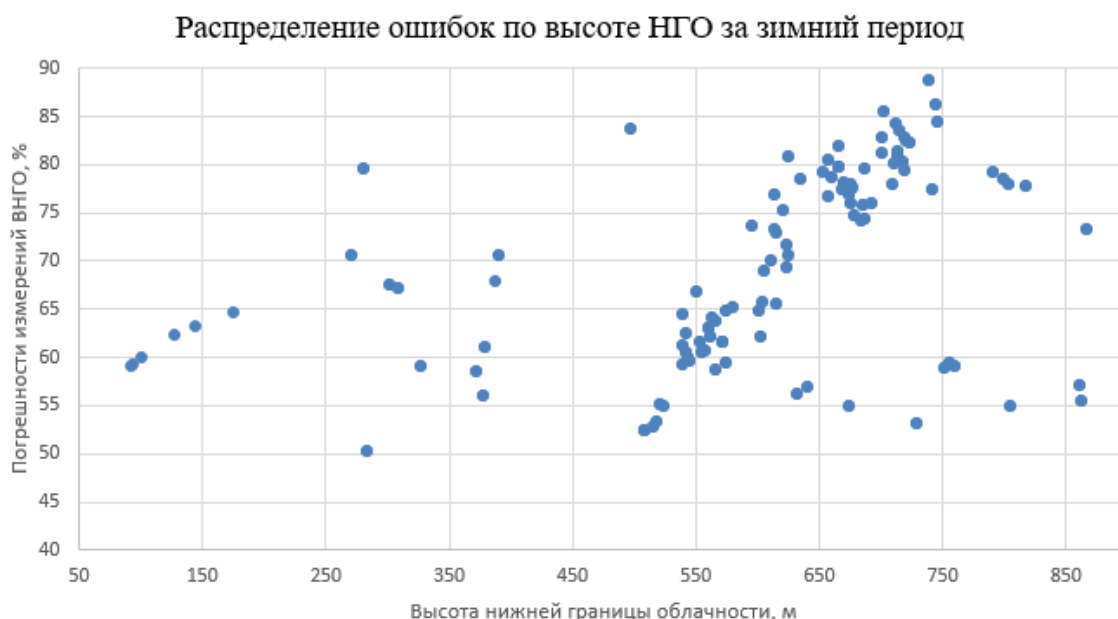


Рисунок 3.1.5. График зависимости больших погрешностей измерения ДВО-2 от ВНГО за зимний период

Анализируя график заметно скопление точек в интервале высот от 500 до 750 метров, причем самое кучное наблюдается в интервалах высот 500-600 метров и 650-740 метров. Максимальная ошибка наблюдалась на высоте 838 метров и составила 88,7%. В диапазонах высот от 200-250 метров и 300-500

ошибок не наблюдалось. В диапазоне высот от 500 до 750 метров заметно увеличение ошибки с увеличением высоты.

13 января 2011 года погрешность измерения в 16:47 составила 68%. В течение суток наблюдался непрерывный слабый снег, однако в сроки 12 и 15 часов наблюдался сильный непрерывный снег.

28 декабря 2010 года наблюдалась максимальная ошибка за весь зимний период (88,7% в 12:20). До срока 15 часов шёл снег, до 9ч непрерывный, с 9 с перерывами, в 12 часов зафиксирован не ливневой снег, с 15 часов осадков не наблюдалось.

2 декабря 2010 года в течение суток шёл непрерывный слабый снег, наблюдался легкий ветер (2-3 м/с) или штиль, больших погрешностей измерений не наблюдалось. Подобная ситуация наблюдалась 18, 19 и 27 января.

21 февраля 2011 года ошибок в 50% и более не выявлено. В течение суток осадков не наблюдалось, ветер тихий (1-2 м/с) или штиль.

Вывод: сравнивая с ошибками за осенний период, можно сказать, что ошибок за зиму больше, как и значение ошибки выше. Можно сделать вывод, что твердые осадки влияют на измерение ВНГО в большей степени, чем жидкие. Максимальная ошибка наблюдалась в срок с переменной интенсивности слабых твердых осадков. При обложных осадках погрешность измерений всех трех приборов не достигает 50%. При слабом ветре или безветрии и при отсутствии осадков погрешность измерения ВНГО приборами ДВО-2 и CL31 не достигает 50%.

Для сравнения точности измерений за весенний период на рисунке 3.1.6. представлен график зависимости погрешностей измерений от ВНГО трех приборов.

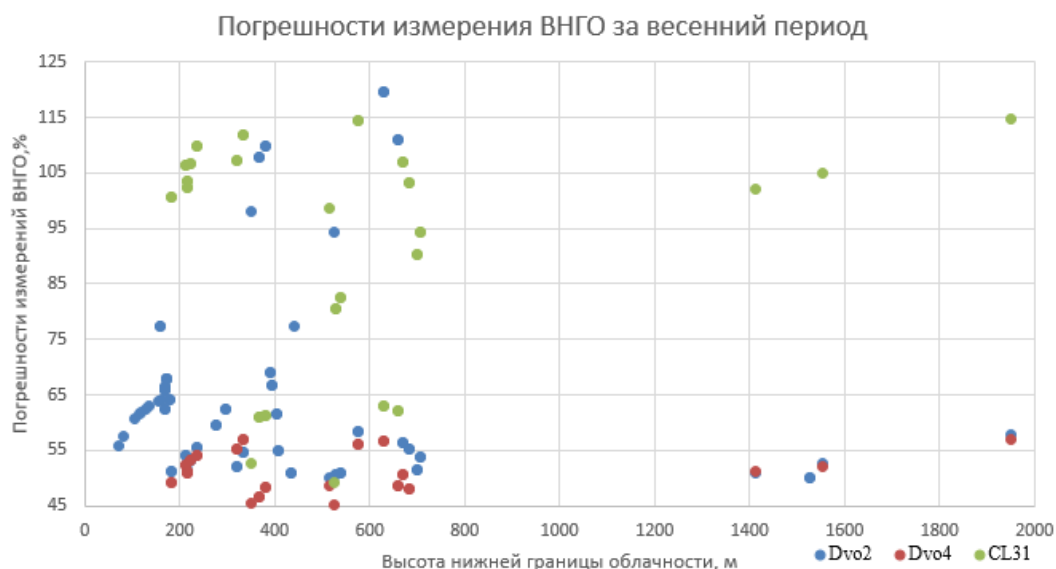


Рисунок 3.1.6. Распределение больших погрешностей измерения по ВНГО трех приборов за весенний период.

Синим цветом выделены ошибки измерений прибора ДВО-2, бордовым – ДВО-4, зеленым – CL31. Наименьшие ошибки снова у прибора ДВО-4, сильно больше у лазерного измерителя высоты облачности. Основные ошибки находятся в диапазоне высот от 50 до 750 метров. В данном диапазоне высот, в основном, находятся просвечивающие слоистые облака и дождевая облачность (как слоистая, так и кучевая). Причиной ошибок могут быть осадки и проход луча мимо просвечивающего облака.

В весенний период измерения проводились 3, 8, 13, 14 и 30 марта 2011 года, 22, 23 и 30 апреля 2010 года и 5, 10, 11, 12, 13, 24, 26, 27 и 28 мая 2010 года. Больше всего ошибок было выявлено 30 апреля.

На рисунке 3.1.7 представлен график зависимости больших погрешностей измерений ВНГО за весенний период.



Рисунок 3.1.7. График зависимости больших погрешностей измерения ДВО-2 от ВНГО за весенний период

Анализируя график, сразу заметно, что количество точек значительно меньше, чем за осенний и зимний периоды. Однако именно весной наблюдаются ошибки в более чем 100%. Максимальная ошибка наблюдалась 14 марта и составила 119,5%.

14 марта – день с максимальной ошибкой за весенний период. В течение суток процент общей облачности составил 100% (кроме сроков 15 и 18ч). С 6 до 9ч наблюдался непрерывный слабый дождь, в 9ч – дымка. Максимальная ошибка наблюдалась в 7:01. Подобная ситуация наблюдалась 28 мая, максимальная ошибка достигает в срок с непрерывной умеренной незамерзающей моросью.

30 марта в течение суток наблюдался ливневой снег, большие погрешности измерений наблюдаются к моменту начала ливня.

23 апреля наблюдался обложной дождь и/или морось до срока 21ч. Большие ошибки измерения высоты нижней границы облачности наблюдались в сроки с перерывами от осадков.

В ночные часы 27 мая наблюдались большие погрешности измерения, которые связаны с изменением интенсивности мороси (из слабой перешла в умеренную). Подобная ситуация наблюдается 22 и 30 апреля.

11 и 12 мая наблюдался тихий, легкий ветер или штиль, осадков не наблюдалось. С 12 часов облачности не наблюдалось до срока 21ч. Ошибки наблюдаются в срок появления облачности. Данную ошибку можно связать с тем, что в момент измерения ВНГО над приборами ДВО-4 и CL31 находилось мелкое кучевое облако, в то время как над ДВО-2 облачность ещё не развивалась, поэтому при расчете эталонного – среднего значения погрешность ДВО-2 оказалась большой. Подобная ситуация наблюдалась 8 марта. При дальнейшем анализе данные ошибка не учитываются.

3 марта, 5, 10, 13, 24 и 26 мая больших ошибок измерения не наблюдалось. 3 марта до срока 9ч облачности не наблюдалось, осадков не было, после срока 12ч шел непрерывный слабый снег. 5 и 13 мая осадков в течение суток не наблюдалось. 10, 24 и 26 мая течение суток шел непрерывный дождь и/или морось.

Вывод: в весенний период больших ошибок измерения наблюдалось меньше, чем за осенний и зимний периоды, однако максимальное значение ошибки за весенний период значительно выше. Ошибки близкие и превышающие 100% наблюдалась в срок с непродолжительным непрерывным дождем или моросью. Остальные большие ошибки связаны с изменением интенсивности осадков, переходами из мороси в дождь/ливень и обратно, а также при наличии ливневого снега. Больших погрешностей измерения ВНГО не наблюдалось в дни без осадков или дни с обложными жидкими осадками. Наименьшее количество и значение ошибок выявлены прибором ДВО-4, наибольшие - CL31.

Для сравнения точности измерений за летний период на рисунке 3.1.8 представлен график зависимости погрешностей измерений от ВНГО трех приборов.

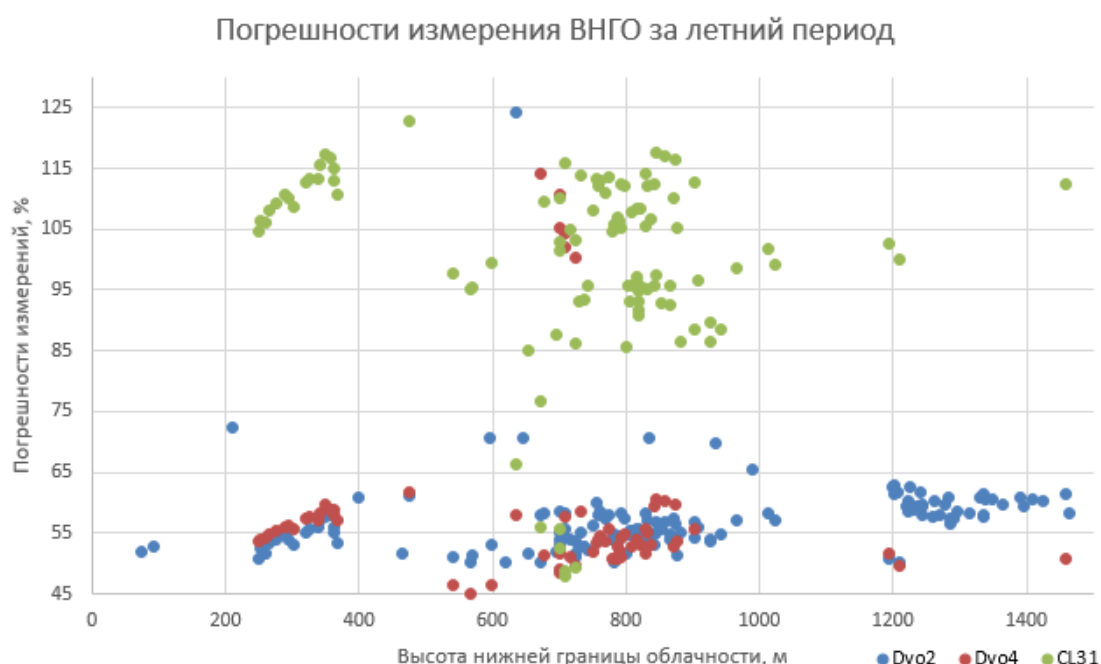


Рисунок 3.1.8. Распределение больших погрешностей измерения по ВНГО трех приборов за летний период.

Оранжевым цветом выделены ошибки измерений прибора ДВО-2, голубым – ДВО-4, фиолетовым – CL31. Меньше всего ошибок выявлено прибором ДВО-4, больше всего ДВО-2, однако по значению ошибки лазерного измерителя ВНГО значительно превышают ошибки приборов ДВО. Ошибки распределены по большим диапазонам высот, нельзя однозначно сказать, что повлияло на такие результаты. Очень большие ошибки измерения у CL31 наблюдаются в диапазоне высот от 600 до 1000м.

В летний период измерения проводились 2, 8, 16, 20 июня, 26, 28 и 29 августа 2010 года. Наибольшее количество ошибок наблюдались 28 августа.

На рисунке 3.1.9 представлен график зависимости ошибок измерения от высоты нижней границы облачности за летний период.



Рисунок 3.1.9. График зависимости больших погрешностей измерения ДВО-2 от ВНГО за летний период

Максимальная ошибка наблюдалась 26 августа и составила 124,2%. Данная ошибка является максимальной за весь рассмотренный период.

Ошибка измерения ВНГО 26 августа сопровождается ливневыми осадками. 28 августа большие ошибки измерения наблюдались в ночные часы (с 0ч до 2:23ч). В сроки с 0 до 3ч по архивным данным гр5 наблюдался ливневой дождь. Подобная ситуация наблюдается 2 и 20 июня.

Удивительно, но больших ошибок измерения не наблюдалось 8 и 16 июня, хотя наблюдался дождь, меняющий свою интенсивность. 29 августа также не наблюдалось больших погрешностей, в течение суток наблюдалась хорошая погода: осадков не наблюдалось, ветер 1-2 м/с.

Вывод: в летний период наблюдался максимум погрешности измерения ВНГО за все сезоны, который связан с ливневыми осадками. На удивление, но по сравнению с другими сезонами, в летний период изменение интенсивности осадков не влияет на ошибку измерения ВНГО прибором ДВО-2. При хорошей погоде без осадков ошибка не превышает 50%. За летний период лазерный

измеритель облачности показал наибольшее отклонение от истинного значения по сравнению с приборами ДВО.

Анализируя вышеперечисленное, можно сделать вывод, что на качество измерения высоты нижней границы облачности приборов в наибольшей степени влияют осадки, наибольшие ошибки выявлены при ливневых жидких и твердых осадках. Также свое влияние на ошибку измерения имеет интенсивность осадков: ошибка увеличивалась при смене интенсивности осадков. При обложных осадках большие погрешности измерений ВНГО не выявлены для всех рассматриваемых приборов. Наименьшее число и значение ошибок получено прибором ДВО-4, наибольшее число погрешностей измерений выявлены прибором ДВО-2, однако их значения в редких случаях достигали и превышали 100%, в то время как измерения прибором CL31 были отклонены от истинного значения более чем на 100% за каждый сезон.

3.2. Оценка влияния твердых осадков на восстановление ВНГО

При рассмотрении влияния сезонов на качество измерения высоты нижней границы облачности было выявлено, что большие погрешности измерения наблюдались в осадки.

Максимальные ошибки при твердых осадках были выявлены при слабых осадках. Для примера был рассмотрен день со слабыми осадками – 28 декабря 2010 года. Для детального рассмотрения был построен график зависимости ошибок измерения прибора ДВО-2 от ВНГО за 28 декабря, который представлен на рисунке 3.2.1

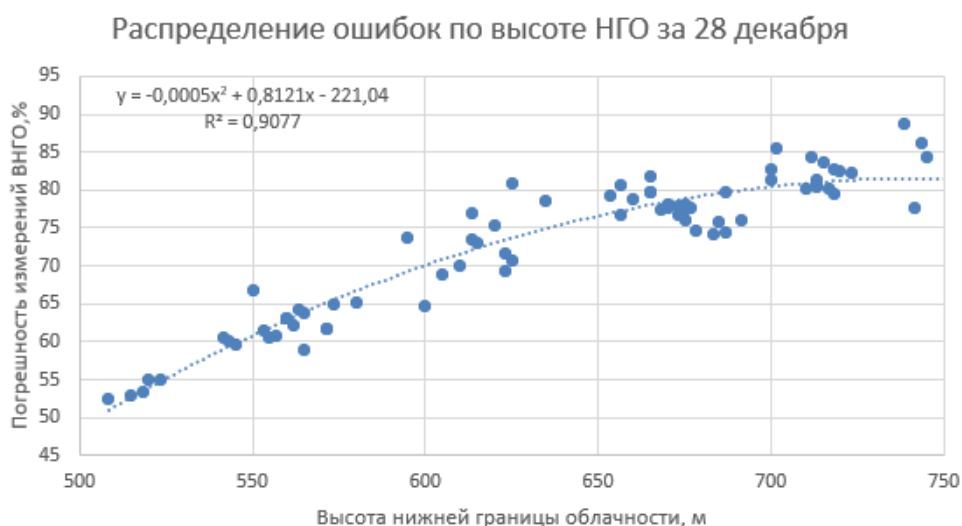


Рисунок 3.2.1. График зависимости погрешностей измерения от ВНГО за декабрь

Отмечу, что до облачности с высотой основания 500м и после высоты 750 ошибок в 50% и более не наблюдалось, для большей наглядности ось абсцисс была усечена. По графику видно, что ошибка измерения нелинейно растет с увеличением ВНГО в диапазоне от 500 до 750 м. Для определения мультипликативной погрешности (поправки) в этом диапазоне было построено уравнение регрессии. Коэффициент детерминации R^2 показывает насколько значения данных близки к аппроксимирующей линии тренда. В данном случае он равен 0,91. Чем ближе R^2 к единице, тем лучше линия тренда соответствует данным. В связи с этим можно вывести уравнение систематической ошибки измерения высоты нижней границы облачности при твердых осадках для прибора ДВО-2 в диапазоне от 500 до 750 м:

$$\Delta H = -0,0005 \cdot H_{\text{НГО}}^2 + 0,8121 \cdot H_{\text{НГО}} - 221,04 \quad (3.2.1)$$

где ΔH – ошибка измерения ВНГО, $H_{\text{НГО}}$ – измеренная высоты нижней границы облачности.

Вывод: большие погрешности при слабых осадках связаны с тем, что приборы фиксируют слой выпавших твердых осадков как высоту нижней границы облачности и действительную высоту попеременно, потому появляется «гребенка». Больше всего разбросов данных фиксируется при измерении

лазерным измерителем ВНГО. Погрешности, фиксируемые прибором CL-31, но не фиксируемые приборами ДВО, были выявлены в сроки с разорванной облачностью. Первая причина, по которой прибор CL-31 принимает за ВНГО высоту большую действительной, связана с тем, что приборы ДВО имеют большую диаграмму направленности, чем лазерный измеритель облачной высоты, поэтому свет от лампы не пропустит «просвет» между облаками и зафиксирует нужную высоту. Вторая причина, по которой лазерный облакомер фиксирует высоту НГО ниже действительной, может быть связана с тем, что лазер отразился от аэрозоля.

3.3. Оценка влияния жидких осадков на восстановление ВНГО

При рассмотрении влияния сезонов на качество измерения высоты нижней границы облачности было выявлено, что жидкие осадки также приносят большие погрешности измерений ВНГО.

В дни с обложными осадками больших ошибок измерения прибором ДВО-2 не наблюдалось. Примером такого дня является 29 октября. В основном ошибки для трех приборов не превышают 25%.

Максимальные ошибки наблюдаются в дни с выпадением ливневых осадков. На рисунке 3.3.1. представлен график распределения ошибок по высоте за 26 августа.

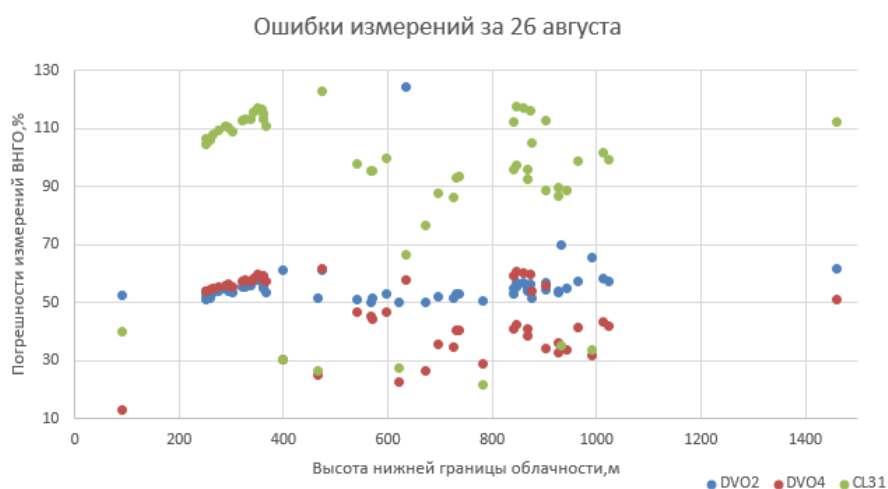


Рисунок 3.3.1. Распределение погрешностей измерения ВНГО в ливневые осадки

Синим цветом на графике выделены погрешности измерений ВНГО при измерении прибором ДВО-2, бордовым – ДВО-4, зеленым – CL31.

По графику видно, что в диапазоне высот с 1010 до 1450 метров ошибок не наблюдалось. Наибольшие ошибки выявлены при измерении лазерным облакомером, наименьшие – ДВО-4. Погрешность в 50-70% наблюдались при измерении диапазона высот 220 – 1010 метров приборами ДВО. Явной зависимости ошибок измерения от ВНГО (как линейной, так и нелинейной) для прибора ДВО-2 выявлено не было. В диапазоне высот от 400 до 1000 метров ошибка измерения растет с высотой при измерении лазерным датчиком.

Для дальнейшего анализа был рассмотрен день с переменной интенсивности жидких осадков (в данном случае – мороси). На рисунке 3.3.2. представлен график измерений ВНГО тремя датчиками за 27 мая.

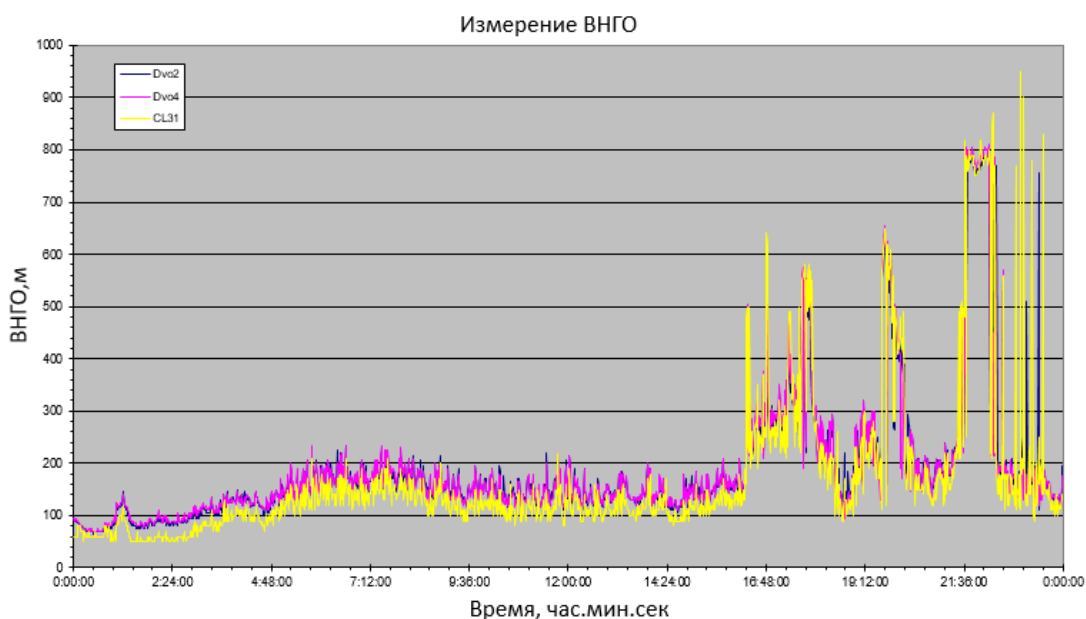


Рисунок 3.3.2. Измерение ВНГО за сутки с переменными интенсивностями мороси

На графике синим цветом показаны измерения ВНГО датчиком ДВО-2, малиновым – датчиком ДВО4, желтым – CL31. По графику видно, что примерно до 16 часов три датчика измеряют примерно одинаково, сильной «гребенки» не наблюдалось. После 16 часов наблюдался сильный разброс измерений для всех приборов. С 15 до 18 часов, по архивным данным, наблюдалась перемена

интенсивности мороси. По графику видно, что в некоторых случаях датчик фирмы «Вайсала» реагирует в большей степени, чем приборы ДВО.

Вывод: при выпадении обложных осадков ошибка измерения ВНГО не превышает 25% как для приборов ДВО, так и для лазерного облакомера, при ливневых и слабых кратковременных осадках ошибки достигают довольно больших значений. Наибольшие ошибки при ливневых осадках выявлены для лазерного датчика, наименьшие – ДВО-4. Ливневые осадки идут, в основном, из кучево-дождевых облаков, нижняя граница которых находится ниже 2 км. Большая ошибка связана с тем, что сигнал попеременно принимался со слоя выпадающих ливневых осадков и ВНГО. Ошибка приборов ДВО меньше, чем у облакомера фирмы «Вайсала», так как у приборов ДВО большая диаграмма направленности, благодаря которой капля не перекрывает измерительное устройство в полной мере, что не скажешь о лазере. Однако больше – не значит лучше, это доказывается тем, что прибор ДВО-4 измеряет с меньшей ошибкой, относительно ДВО-2. При смене интенсивности осадков наибольшие погрешности фиксируются при измерении лазерным датчиком, причем в большинстве случаев результат измерения занижен, что также связано с диаграммой направленности лазера и импульсных ламп, однако в данном случае разность ошибок не существенна, как при ливневых осадках. При условии, что жидкие осадки идут в течении всех суток, ошибка измерений не превышает 25%, что связано с тем, что обложные осадки идут с слоисто-дождевых облаков, которые не только достаточно плотные, но и имеют большую горизонтальную протяженность, поэтому световой луч или лазер не пройдут мимо облачной границы, что не приведет к большой ошибке в измерении высоты нижней границы облачности.

3.4. Оценка влияния туманов на восстановление ВНГО

При изучении результатов измерений ВНГО было выявлено, что туман может являться фактором, влияющим на чистоту измерений различных датчиков. На рисунке 3.4.1. представлен график распределения погрешностей

измерения высоты нижней границы облачности тремя датчиками за сутки с выявленной дымкой.

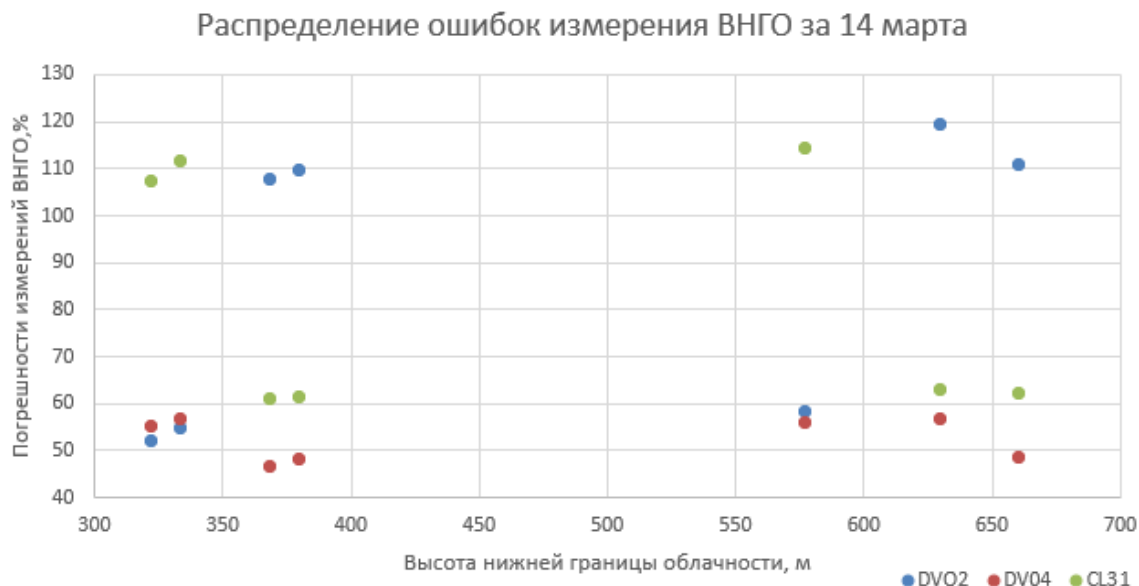


Рисунок 3.4.1. График зависимости погрешностей измерений от ВНГО за 14 марта

На графике синим цветом обозначены погрешности измерений прибором ДВО-2, бордовым – ДВО4, зеленым – лазерный облакомер. Ошибок до 300м, в диапазоне от 380 до 570 метров не наблюдалось. Ошибки прибором ДВО-4 не превышают 60%, а ДВО-4 и CL31 переходят отметку в 100%.

Все ошибки наблюдаются в период с 5ч до 7ч, по архивным данным в срок 6ч наблюдалась дымка. По данным визуальных наблюдений (как те, что представлены в файле с измерениями, так и архивов), облачность в данные сроки отсутствовала или высота основания облака достигала 2,5 км.

Также причиной больших погрешностей измерений ВНГО может быть выпадение кристаллической изморози. Изморозь кристаллическая – слой пушистых, пластинчатых или призматических кристаллов льда, образующиеся при температуре -11°C и ниже в дымке или ледяном тумане, при безоблачном небе и безветрии.

Выпадение кристаллической изморози зафиксировано 27 января 2011 года. С 9 до 15 часов температура воздуха составила от -18°C до -12°C , штиль, облачность отсутствовала, дымка и/или туман.

На графике 3.4.2. представлены измерения за день с выявленной кристаллической изморозью тремя датчиками.

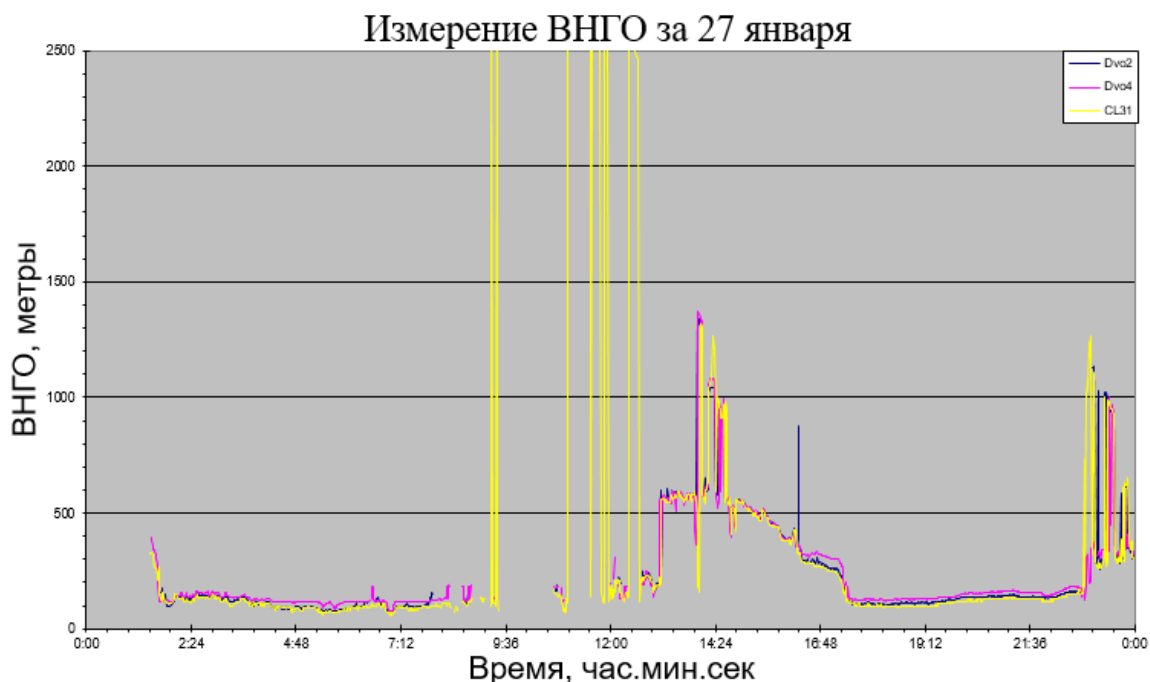


Рисунок 3.4.2. Измерения ВНГО за 27 января 2011 года.

По графику наблюдается сильная гребенка с 9 до 12:39 при измерении прибором CL31. Приборы ДВО не измеряют ВНГО до 12 часов, после 12 наблюдаются небольшие колебания. К 12:55 результаты измерений выравниваются.

Вывод: в дни с наблюдаемой дымкой (или туманом) ни одному из датчиков не стоит доверять, так как все датчики, измеряющие ВНГО, принимали за высоту нижней границы слой дымки или тумана, и как следствие выявлялась большая погрешность измерений, для которой нельзя вывести уравнение. При выпадении кристаллической изморози также нельзя доверять данным измерениям, так как приборы ДВО не измеряют при выпадении изморози, а лазерный облакомер принимает слой выпавшей изморози за ВНГО. Такой разброс ошибок связан с тем, что дымка или туман неоднородны по плотности (как по горизонтали, так и по вертикали). Очевидно, что при замерзающей дымке или мгле (та же дымка, но с наличием пыли и/или дыма), или выпадении кристаллической изморози погрешность измерений увеличиться, так как от аэрозольных частиц световой

луч или лазер отражается лучше, чем от сконденсированного водяного пара, как и от кристаллов льда.

3.5. Расчет повторяемости явлений, влияющих на результаты измерений ВНГО

Ранее было выявлено, что на точность измерения ВНГО влияют твердые и жидкие осадки, туманы и дымки. Для оценки влияния ошибочных результатов измерений ВНГО за год были посчитаны повторяемости явлений.

Для решения данной задачи были взяты архивные данные с сайта gr5 за 2022 год (с 1 января по 31 декабря 2022 года) по Санкт-Петербургу.

В таблице 3.5.1. представлены повторяемости различных явлений за год

Таблица 3.5.1. Повторяемости явлений за год

Явление	Повторяемость явления, %
Дымка	0,9
Туман	0,3
Морось	2,9
Дождь	11,8
Ливневой дождь	2,3
Изморозь	0,4
Снег	14,8
Ливневой снег	0,5
Дождь или морось со снегом	0,3
Без осадков	65,8

Для более наглядного представления по данным таблицы 3.5.1. была построена диаграмма повторяемости дымки, тумана, мороси, дождя, ливневого

дождя, изморози, снега, ливневого снега, дождя или мороси со снегом и без осадочных за 2022 год в Санкт-Петербурге, представленная на рисунке 3.5.1.

Повторяемость явлений за год в Санкт-Петербурге

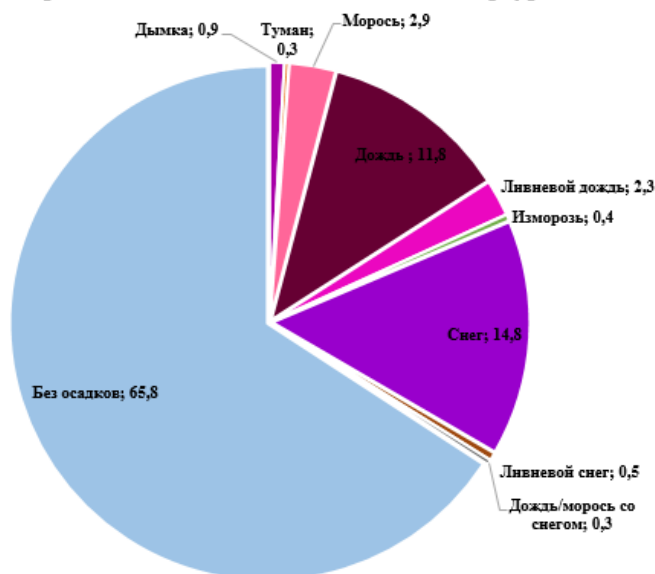


Рисунок 4. Диаграмма повторяемости явлений в Санкт-Петербурге за 2022 год

В дни без осадков светолокационные датчики измеряют облачность с минимальной погрешностью. Большие погрешности наблюдаются в ливневые осадки (как жидкие, так и твердые), их повторяемость за год – всего 2,8 %. Также большая ошибка измерения наблюдается в дымку или туман, за год туман наблюдался лишь в 2,2% случаев. 14,8 % всех явлений составил снег, который также приносит большую погрешность измерений. 11,8% всех явлений составил не ливневой дождь, влияющий на измерение ВНГО трех датчиков.

Вывод: в Санкт-Петербурге большую часть года (65,8% всех сроков) погрешности измерений высоты нижней границы облачности будет минимальна, качество измерения будет высоким. 26,6% всех сроков большие ошибки будут приносить не ливневые дождь и снег, 2,8 % - ливневые осадки, 2,2 % - морось и дымка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время измерение высоты нижней границы облачности является проблематичным, так как нет четкого определения данному метеорологическому элементу, который является очень важным для авиации, так как низкая облачность является одним из основных факторов авиационных происшествий. Существует несколько методов измерения ВНГО, однако ни один из них не будет точным.

В данной работе проводились исследования методом светолокации на примере трех датчиков – ДВО-2, ДВО-4 и CL31 в течение года (с мая 2010 года по апрель 2011 года). Измерения проводились на метеостанции ГГО им. А.И. Воейкова (поселок Воейково). В ходе исследования было выявлено, что ошибки измерения напрямую зависят от сезона и высоты основания облака.

Влияние высоты облака обосновывается тем, что практически все облака не имеют четкой горизонтальной нижней границы из-за физических особенностей образования облака, от чего и складывается проблема определения ВНГО. Слоистая облачность имеет более размытую границу, а мощное кучево-дождевое облако более четкую границу, однако такое облако приносит осадки. Кучевая облачность обычно состоит из нескольких мелких облаков, между которыми имеются просветы, в который может попасть световой луч или лазер и измерить не ту высоту основания облачности.

Влияние сезона связано с климатическими особенностями региона, а именно с выпадающими осадками и наблюдаемыми явлениями погоды. В ходе работы было выявлено, что самые непредсказуемые ошибки, которые не имеют зависимости, наблюдаются во время дымки, тумана и при выпадении кристаллической изморози (также в тумане и/или дымке), что связано с физическими особенностями образования данных явлений: они очень неоднородны по плотности как по горизонтали, так и по вертикали. Большие ошибки, выявленные при осадках ливневого и неливневого характера связаны с

тем, что датчики фиксируют за высоту нижней границы облака слой выпадающих осадков и ВНГО попеременно, при ливнях ошибка увеличивается., причем при твердых осадках погрешность измерения увеличивается, так как лазер и световой луч отражаются от кристаллов льда лучше, чем от капель воды. При обложных осадках погрешности не достигали больших значений, что связано с тем, что, в основном, длительные осадки выпадают из слоисто-дождевых облаков, которые имеют большую горизонтальную протяженность и практически не имеют просветов, в которые может попасть световой луч или лазер и выдать ошибку, а также имеют большую плотность, относительно слоистой облачности.

Также ходе работы было выведено уравнение погрешности при слабых твердых осадках для высот 500-750 метров для прибора ДВО-2.

Также была посчитана повторяемость явлений за год, при которых выявляются большие ошибки измерений. Большую часть года наблюдается ясная погода, при которой ошибки измерения всех приборов не выявлены или незначительны, 26,6 % всех сроков составили не ливневые снег и дождь, которые будут нести за собой погрешности в измерении ВНГО, туманы и дымки составили всего 2,2 % всех сроков.

При сравнении результатов измерений трех датчиков было выявлено, что самый удачный из них – ДВО-4, так как при измерении этим прибором количество и значение погрешностей были наименьшими. Хуже всех показал себя лазерный облакомер фирмы «Вайсала», однако на момент 2024 года поставки на территорию Российской Федерации данного прибора приостановлены.

Рекомендации по улучшению качества измерений датчиком ДВО-2: в передатчике необходимо применять импульсную лампу ИСШ-100-3М, т.к. диаграмма направленности передатчика становится более острой и в приемном

устройстве необходимо применять более чувствительный фотоусилитель ФУП-2 для уменьшения пропусков при измерении ВНГО.

Список литературы

1. Демин, А. В. Повышение достоверности приема эхосигнала при определении высоты нижней границы облаков / А. В. Демин, Е. А. Селедкина // Навигация и гидрография. – 2017. – № 47. – С. 85-92. – EDN ZHEQQV.
2. Федорцев, Р. В. Алгоритм расчета высоты нижней границы облаков / Р. В. Федорцев, Е. П. Каролик, А. А. Кудряшов // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2010. – № 5. – С. 32-36. – EDN VJWIIB.
3. Патент № 2136016 С1 Российская Федерация, МПК G01S 17/95, G01W 1/00. Светолокационный измеритель высоты нижней границы облаков : № 97112768/28 : заявл. 29.07.1997 : опубл. 27.08.1999 / О. А. Волков, Р. А. Круглов, В. А. Чижевский, Н. И. Симонов ; заявитель Открытое акционерное общество "ЛОМО", Главная геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова. – EDN LICJGC.
4. Константинов, К. В. Разработка и исследование методов автоматизации измерений высоты нижней границы облаков : специальность 05.13.12 "Системы автоматизации проектирования (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Константинов Константин Владимирович. – Санкт-Петербург, 2009. – 104 с. – EDN QEKHAN.
5. Гражданская авиация: прошлое, настоящее, будущее : материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия гражданской авиации России (Авиатранс-2023), Ростов-на-Дону, 20 октября 2023 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ, 2023. – 221 с. – ISBN 978-5-605-08704-5. – EDN QUSSQM.
6. Цай, С. Н. Сезонный ход повторяемости высоты нижней границы облаков в аэропорту Майкоп Республики Адыгея / С. Н. Цай, В. А. Величко, В. В. Дымов-Иванов // Гражданская авиация: прошлое, настоящее, будущее : материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия гражданской авиации России (Авиатранс-2023), Ростов-на-Дону, 20 октября 2023 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ, 2023. – С. 156-161. – EDN ALOORE.
7. Толмачева, Н. И. Методы и средства гидрометеорологических измерений : (для метеорологов) : учебное пособие / Н. И. Толмачева ; Н. И. Толмачева ; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Пермский гос. ун-т". – Пермь : ПГУ, 2011. – 222 с. – ISBN 978-5-7944-1623-7. – EDN QKKJBD.

8. Приложение к свидетельству об утверждении типа средств измерения "Описание типа средств измерения" от 19.10.2015 № 64248
9. Авторское свидетельство № 295101 А1 СССР, МПК G01W 1/00. Светолокационный облакомер : № 1315616/18-10 : заявл. 19.03.1969 : опубл. 04.02.1971 / Р. А. Круглов. – EDN XPIPVY.
10. Облакомер CL-31 // VAISALA URL: <https://www.vaisala.com/ru/lp> (дата обращения: 05.01.2024).
11. «Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений» (ВМО - №8, шестое издание 2000г.)
12. Смирнова, Е. А. Цикличность климата Санкт-Петербурга и Ленинградской области / Е. А. Смирнова // Наукосфера. – 2023. – № 9-1. – С. 45-51. – DOI 10.5281/zenodo.8338248. – EDN ХАКТИЕ.
13. Архив погоды в Санкт-Петербурге // rp5 URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 03.05.2024).