



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Влияние атмосферной турбулентности на полеты воздушных
судов»

Исполнитель Сложеникина Ольга Игоревна ПМ-Б17-1-3
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)
Богаткин Олег Георгиевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой 
(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«10» июня 2021 г.

Санкт-Петербург
2021

СОДЕРЖАНИЕ

Сокращения	2
Введение	3
1 Атмосферная турбулентность и ее влияние на полеты воздушных судов	5
1.1 Физика явления	5
1.2 Влияние турбулентности на полеты воздушных судов	11
1.3 Прогноз атмосферной турбулентности	21
1.3.1 Синоптический метод прогноза	21
1.3.2 Физико-статистический метод прогноза атмосферной турбулентности	24
2 Исходные данные и методы обработки	28
2.1 Характеристика и методы обработки исходного материала	28
2.2 Климатическая характеристика Северо-Западного федерального округа	30
3 Оценка вертикальных градиентов температуры и ветра в районе крупных аэродромов Северо-Западного федерального округа	32
3.1 Аэропорт Мурманск имени Николая II	32
3.2 Аэропорт Архангельск имени Ф.А. Абрамова	34
3.3 Аэропорт Нарьян-Мар	37
3.4 Аэропорт Воркута	40
3.5 Аэропорт Сыктывкар имени П.А.Истомина	43
3.6 Статистические характеристики метеовеличин	47
Заключение	57
Список используемых источников	60
Приложение А	
Приложение Б	

Сокращения

ТЯН	–	турбулентность ясного неба
ВС	–	воздушное судно
АМСГ	–	авиационная метеорологическая станция гражданская

Введение

Турбулентность как явление — это неупорядоченное перемещение воздуха. Изучение турбулентности, зон её возникновения и причин образования является очень значимым для полетов воздушных судов. Так как в современном мире авиация все больше и больше развивается, изучение турбулентности носит очень важный характер. Актуальность и пракτικότητα исследования данной темы заключается в ряде решения авиационных задач. При полетах важно знать где может встретиться зона турбулентности, так как это напрямую влияет на безопасность. Для того, чтобы иметь представления о возможных местах возникновения турбулентности, необходимо знать атмосферные характеристики в тропосфере и стратосфере.

Для исследования была взята турбулентность как явление, её причины возникновения, формирования и развития.

Предметом исследования являются методики прогнозирования характеристик болтанки: её интенсивность, местоположение, время существования. Наибольшее внимание уделено прогнозу зон турбулентности.

Целью данной бакалаврской работы является исследование условий, приводящих к возникновению интенсивной турбулентности для повышения эффективности метеорологического обеспечения полетов в районе исследования. Для достижения поставленных целей были поставлены следующие задачи:

1. Изучить физические процессы, приводящие к формированию и развитию турбулентности;
2. Рассмотреть методы оценки влияния турбулентности на полеты воздушных судов;
3. Описать характеристики турбулентности, а также её влияние на полеты воздушных судов при различных метеоусловиях;
4. Изучить методы прогноза турбулентности

5. Провести анализ данных и расчет вертикальных градиентов метеорологических величин. Температуры воздуха, скорости и направления ветра на стандартных изобарических поверхностях вблизи пяти аэропортов, находящихся на территории северной части Северо-Западного федерального округа;

6. Выявить район с вертикальными градиентами, превышающими критические значения.

Методы исследования, используемые в данной работе:

1. Анализ литературы;
2. Сравнение методов прогноза атмосферной турбулентности, выявление наиболее используемых и эффективных;
3. Классификация турбулентности;
4. Изучение характеристик атмосферной турбулентности;
5. Анализ градиентов, рассчитанных на основе метеорологических параметров: температуры воздуха, скорости и направления ветра. Выявление наиболее опасных зон и слоев атмосферы при полете над северной частью Северо-Западного федерального округа.

Бакалаврская работа состоит из введения, трех глав и заключения.

1. Атмосферная турбулентность и ее влияние на полеты воздушных судов

1.1 Физика явления

Сегодня мы знаем, что большое количество атмосферных процессов носит турбулентный (неупорядоченный) характер. Но первым, кто заметил, что при увеличении скорости потока в воздушной или водной среде появляются хаотические образования волнового и вихревого характера стал Осборн Рейнольдс. Он то впервые и установил явление турбулентности.

Главное отличие турбулентного движения от ламинарного заключается в том, что значения различных величин в нем непостоянны. Например, изменчивость поля скорости, наличие неоднородностей и вихрей, которые в свою очередь, приводят к перемешиванию.

Существует безразмерная комбинация, называемая числом Рейнольдса

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (1.1)$$

где L -характерный размер потока вязкой жидкости, U - характерная скорость течения, ν -кинематическая вязкость жидкости.

Если число Рейнольдса превышает некоторое критическое значение $Re_{кр}$, то ламинарное движение становится турбулентным. Физический смысл критического значения числа Рейнольдса состоит в действии двух противоположно направленных сил- силы инерции и силы вязкости.

По результатам экспериментов было установлено, что ламинарное движение переходит в турбулентное при числе Рейнольдса (Re) равном 2500-5000. Число Рейнольдса для атмосферы определить достаточно сложно, так как трудно определить масштаб потока в целом. [1] Число Рейнольдса учитывает только динамический фактор формирования турбулентности.

Турбулизация воздушных течений чаще всего возникает из-за контрастов температуры, скорости и направления ветра. Они в свою очередь образуются благодаря следующим факторам, а именно:

1. Трение воздушных потоков о землю и, как следствие, формирование ветра с большими градиентами скорости;
2. Неравномерный прогрев подстилающей поверхности земли, следовательно, формирование термической конвекции;
3. Процессы облакообразования, при которых происходит выделение тепла конденсации и кристаллизации;
4. Взаимодействие воздушных масс с различными характеристиками вблизи атмосферных фронтов и высотных фронтальных зон;
5. Потеря устойчивости волнами, которые образовались в слоях инверсии, на тропопаузе и вблизи иных атмосферных поверхностей раздела;
6. Изменение воздушных течений горными препятствиями и возникновение волновых возмущений роторных движений на их подветренной стороне. [1]

Эти процессы могут действовать одновременно, тем самым влиять на усиление или ослабление друг друга, а также влиять на степень турбулизации потока.

Л.Ф. Ричардсон рассмотрел вопрос возникновения турбулентности с учетом влияния не только динамических, но и термических факторов.

Число Ричардсона

$$R_i = \frac{g}{T} \frac{(\gamma_a - \gamma)}{\left(\frac{d\bar{u}}{dz}\right)^2} \quad (1.2)$$

где γ_a – адиабатический вертикальный градиент температуры; γ – действительный вертикальный градиент температуры; $\frac{d\bar{u}}{dz}$ – вертикальный градиент средней скорости ветра; g – ускорение силы тяжести; T – температура

Динамическое число Ричардсона

$$R_f = \alpha \frac{g}{T} \frac{(\gamma_a - \gamma)}{\left(\frac{d\bar{u}}{dz}\right)^2} \quad (1.3)$$

где

$$\alpha = \frac{k_T}{k} \quad (1.4)$$

где k – коэффициент турбулентного обмена количества движения; k_T – коэффициент турбулентного теплообмена.

Динамическое число Ричардсона (R_f) определяет роль термической конвекции в образовании турбулентной энергии, а число R_i показывает отношение архимедовых сил к силам инерции. Стационарная турбулентность возможна лишь при $R_f=1$, а с учетом диссипации энергии турбулентности – при $R_f < 1$.

От воздействия вертикального градиента потенциальной температуры зависит воздействие сил Архимеда на турбулентность.

При устойчивой стратификации вертикальный градиент потенциальной температуры - положительный, в ней сила Архимеда противодействует развитию турбулентности, а при неустойчивой стратификации вертикальный градиент потенциальной температуры отрицателен, архимедовы силы способствуют появлению и развитию конвективных движений.

Термическая неустойчивость имеет существенное значение в облаках, а также на малых высотах в безоблачной тропосфере. В средних и верхних слоях тропосферы, вне облаков, способствует образованию турбулентности сдвиг ветра. При сильном повышении температуры подстилающей поверхности в безоблачные дни наблюдаются сверхадиабатические градиенты температуры от поверхности до 500-1000 м. На больших высотах такие градиенты могут наблюдаться только в тонких слоях, толщина которых несколько десятков или сотен метров.

В безразличной термической стратификации вертикальный градиент потенциальной температуры близок к 0, а значит, силы Архимеда не влияют на возникновение турбулентных движений.

В атмосфере с неоднородным полем температур турбулентность может развиваться тогда, когда значение числа Ричардсона меньше некоторого значения $Ri_{кр}$. Критическое значение числа Ричардсона характеризует условия затухания и развития турбулентных движений в термически неоднородной атмосфере. Неравенство $Ri < Ri_{кр}$ показывает, что происходит развитие турбулентности, а также, что чем меньше Ri , тем больше турбулентной энергии может накопиться в данных условиях. [1]

Турбулентные вихри есть во всех слоях атмосферы и для их классификации используют такой параметр, как особенность развития. По нему турбулентность можно разделить на:

1. Орографическую (механическую) турбулентность. Она возникает из-за неровностей земной поверхности, из-за которых в свою очередь возникают возмущения, которые приводят к образованию восходящих и нисходящих вертикальных движений.

2. Термическую (конвективную) турбулентность. Она возникает из-за неравномерного нагрева подстилающей поверхности или при переносе холодного воздуха на теплую подстилающую поверхность.

3. Динамическую турбулентность. Она возникает в слоях атмосферы, где есть значительные вертикальные и горизонтальные сдвиги ветра и температуры. Из-за градиентов в атмосфере образуются гравитационные и гравитационно-сдвиговые волны, которые при определенных условиях могут терять устойчивость, разрушаться и переходить в турбулентные вихри более мелкого масштаба. [2]

Рассмотрим отдельно турбулентность ясного неба.

Турбулентность ясного неба – это турбулентность при чистом небе в свободной атмосфере, иногда сопровождается незначительным количеством облаков верхнего яруса, также турбулентность ясного неба может образовываться и после пролета другого самолета. Главной особенностью является образование в спокойной окружающей потоке, а значит, это явление сложно прогнозирования, так как нет видимых факторов для определения.

В свободной атмосфере возникновение ТЯН объясняется термодинамическими факторами, а в горных районах- орографическими. Горизонтальные размеры зоны ТЯН от нескольких километров до нескольких сотен километров, в то время как вертикальные размеры чаще всего не превышают и одного километра.

Турбулентность ясного неба встречается в циклонах при больших боковых сдвигах ветра, при слабо выраженной расходимости изогипс, в зонах

резкого излома изогипс на высотном гребне. В горных районах турбулентность ясного неба бывает чаще, чем над равниной, так как с подветренной стороны склона наблюдается наибольшая деформация воздушного потока.

Метеорологические условия образования ТЯН:

1. вертикальный сдвиг ветра 8 м/с на 100 м;
2. горизонтальный сдвиг ветра 10 м/с на 100 км.
3. горизонтальный градиент температуры 2 ° /100 км;
4. вертикальный градиент температуры 1 ° /100 м;

На данный момент в самолетах для прогнозирования и выявления зон с ТЯН применяются радиолокационные станции (РЛС), которые являются преимущественно импульсными и работают на основе эффекта Доплера. А также МРЛК БЗ ГА «МОНОКЛЬ» (метеорологический радиолокационный комплекс ближней зоны гражданской авиации), которая состоит из метеорологической радиолокационной станции, которая осуществляет излучение зондирующими радиоимпульсами. [6] Оба эти прибора используются непосредственно на борту самолета и применяются для обнаружения турбулентности.

В 2017 году авиастроительный концерн Boeing, вместе с Агентством аэрокосмических исследований Японии (JAXA) и транспортной компанией FedEx начали летные испытания авиационного лидара, который был создан для выявления зон с турбулентностью ясного неба, а также для предупреждения пилотов о них. Главным преимуществом данной разработки является то, что он выявляет ТЯН и предупреждает о ней на расстоянии около 17,5 км. «Лидар» или лазерный локатор — это сокращение от фразы «световое детектирование и измерение дальности» (с английского: Light Detection and Ranging). Лидар работает на основе испускаемого лазером оптического све-

тящегося излучения, которое определяет расстояние до объекта, а также его местоположение. [7]

Несмотря на новейшие разработки турбулентность ясного неба все еще изучена очень мало, так как требуется время на исследования, связанные с применением новых технологий, а данных, собранных за более ранние годы достаточно мало. Но, ученые пытаются решить эту проблему. В 2019 году ученые Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» разработали проект «Многофункциональный лидар для контроля воздушной среды аэропорта». Данный проект предназначен для определения сдвигов ветра и турбулентности, а также температуры, влажности и нижней границы облаков. [8] Можно сказать, что в будущем определять и изучать турбулентность ясного неба будут преимущественно при помощи лидаров, так как данные, которые получают благодаря им являются наиболее точными и оправданными, в отличие от тех, которые получают благодаря радиолокационным приборам.

1.2. Влияние турбулентности на полеты воздушных судов.

При полете в турбулентной зоне движение самолета становится возмущенным, он испытывает на себе скачки скорости, изменение угла атаки и крен, также ВС подвергается колоссальным нагрузкам, колебаниям центра тяжести, а также угловым колебаниям. Полет сопровождается:

1. Изменением высоты курса и скоростью полета;
2. Ухудшением управляемости и устойчивости ВС, а также ухудшением комфорта полета для пассажиров;
3. Увеличением износа отдельных деталей и частей ВС. [2]

При изучении влияния действия турбулентности на воздушные суда используют два метода, а именно: рассматривают турбулентность как отдельные независимые порывы или же как объединение случайных порывов. [1]

Методы оценки интенсивности турбулентности.

Важно отметить, что для самолета важны только те турбулентные пульсации, масштаб которых соизмерим с его размерами. Как слишком мелкомасштабные пульсации, так и длиннопериодические- и те и другие не оказывают влияния на полет. Значит, при оценке интенсивности турбулентности необходимо учитывать именно ту часть спектра, которая оказывает влияние на полет.

Так как измерить турбулентность очень сложно, то измеряют её влияние на воздушное судно. Для этого ввели термин болтанка.

Наиболее значимое влияние болтанка оказывает на воздушное судно при его взлете и посадке. Так, при взлете самолет попадая в зону турбулентности может столкнуться с резкими подбрасываниями вверх, что может привести к появлению закритических углов атаки, а при посадке попадая в зону турбулентности самолет может столкнуться с резкими понижениями, которые могут приводить к слишком быстрому соприкосновению с земной поверхностью.

Болтанка и её интенсивность обозначается величиной приращения перегрузки воздушного судна.

Перегрузка (n) – это отношение подъемной силы в данный момент времени (Y) к подъемной силе горизонтального полета (Y_0)

$$n = \frac{Y}{Y_0} \quad (1.5)$$

Масса самолета (G) равна подъемной силе при горизонтальном полете). Значение любой мгновенной величины равно: $Y=Y_0+\Delta Y$. Таким образом, формулу 1.6 можно представить в виде

$$n = \frac{Y}{G} = \frac{Y_0+\Delta Y}{G} = \frac{Y_0}{G} + \frac{\Delta Y}{G} = 1 + \frac{\Delta Y}{G} \quad (1.6)$$

Во время горизонтального полета значение перегрузки равно единице, а в иных случаях рассчитывается по формуле. Но, чтобы упростить задачу, находят не значение перегрузки, а её приращение

$$\Delta n = n - 1 \quad (1.7)$$

$$\Delta n = \frac{mj}{mg} = \frac{j}{g} \quad (1.8)$$

где m – масса самолета; j – ускорение, которое будет иметь самолет, при полете в турбулентной атмосфере; g – ускорение свободного падения.

У приращения перегрузки нет размерности — это безразмерная величина и она определяется в долях ускорения свободного падения.

Для измерения перегрузки используют приборы Акселерометр и Акселерограф.

1. Акселерометр – этот прибор предназначен для того, чтобы измерять скорость подвижных объектов, принцип действия которого основан

на законах инерции. Акселерометры делятся на два вида: для измерения угловых и линейных ускорений.

2. Акселерограф — это прибор, предназначенный для того, чтобы фиксировать и записывать величины ускорения самолета.

Только изучая обе составляющие ветра, горизонтальную и вертикальную можно сделать вывод о верном расположении оси турбулентного вихря.

Болтанку оценивают по 4-х бальной шкале:

1. Слабая болтанка

В ИКАО определяется как: 

Перегрузки и их приращения в долях g : $0.8 \leq n \leq 1.2$, $\Delta n = \pm 0.2$

При слабой болтанке полет проходит на автопилоте, а воздушное судно испытывает влияние отдельных легких вздрагиваний.

2. Умеренная болтанка

В ИКАО определяется как: 

Перегрузки и их приращения в долях g : $0.5 \leq n \leq 1.5$, $\Delta n = \pm 0.5$

При полете допускается использование автопилота, самолет испытывает волнения, покачивания, изменяется высота полета, возникают толчки ВС. На приборах заметны колебания стрелок. При умеренной болтанке затрудняется ходьба по салону.

3. Сильная болтанка

В ИКАО определяется как: 

Перегрузки и их приращения в долях g : $0 \leq n \leq 2.0$, $\Delta n = \pm 1.0$

При сильной болтанке полет осуществляется в ручном режиме с использованием руководства по летной эксплуатации. ВС испытывает мощные броски,

которые сопровождаются резкими поворотами самолета вокруг своей оси. Мощные броски ВС вниз сопровождаются ощущением невесомости, а вверх — сильным ощущением прижатия к креслу. Могут произойти летные происшествия. Несоблюдения правил полета приводит к болезненным последствиям.

Между слоями, по высотам турбулентность распределена неравномерно. В слое от 0 до 1 км периодичность болтанки составляет 25%. В слоях от 1 до 6 км — 25%. На высоте от 6 до 11 км периодичность достигает 15%. [2]

Это распределение турбулентности с высотой можно описать физическими факторами. В слое от 0 до 1 км болтанка объясняется влиянием подстилающей поверхности и местным рельефом. В слое от 1 до 6 км периодичность болтанки меньше, так как это некая зона перехода, на которую уже не влияет земная поверхность, и еще не влияют струйные течения и градиенты скорости ветра. В слое от 6 до 11 км струйные течения и градиенты скорости ветра уже оказывают свое влияние, где и вызывают болтанку самолетов.

Нужно оговориться, что значение повторяемости болтанки зависит от того, какой был характер полета, длительный и на больших высотах или короткий на малых. ВС, полет которых происходит на малых высотах и на более коротких дистанциях, попадают в болтанку чаще, чем те, полет которых более длительный и проходит на больших высотах.

Турбулентность чаще всего наблюдается в струйных течениях и вблизи тропопаузы. В этих районах чаще всего можно встретить ТЯН.

Горизонтальные размеры турбулентных зон гораздо больше, чем вертикальные, а следовательно, при горизонтальном полете вероятность попадания в турбулентную зону снижается. Чем меньше широта, тем больше горизонтальные размеры и величина турбулентного слоя. В авиации есть такое понятие, как «встречаемость болтанки» — это то расстояние, которое необходимо пройти ВС до встречи с болтанкой. [2]

Турбулентные зоны делят на три вида:

1. Непрерывные турбулентные зоны
2. Прерывистые турбулентные зоны.
3. Отдельные броски самолета

Турбулентные зоны также характеризуются временем жизни. Для того, чтобы его определить проводят полеты между определенными точками, а затем, анализируют перегрузки, которые и помогают выявить зоны турбулентности, а также время их существования.

Влияние турбулентности на полет при различных условиях

1. Турбулентность в облаках

В зависимости от физики образования облака, зависит частота образования в нем турбулентности. В облаках, образование которых связано с вертикальными токами, турбулентность встречается гораздо чаще.

В таблице 1.1 представлены данные о зависимости повторяемости болтанки от типа облака. Данные получены С.М. Шметером. [2]

Таблица 1.1 – Повторяемость (%) болтанки самолетов в облаках различных форм (по С.М. Шметеру)

Форма облаков					Без уточнения формы
St, Sc	Ns-As	Ac	<u>Ci, Cs, Cc</u>	Cu, Cu <u>cong, Cb</u>	
34%	30%	29%	34%	95%	40%

Обычно, в слоистообразных облаках наблюдается слабая болтанка, и максимальные её значения находятся на верхней границе, особенно, если плотность облаков различна. А в облаках вертикального развития болтанка, наоборот, более интенсивна, так как в них наблюдаются вертикальные токи, размеры которых соизмеримы с размерами самолетов. Болтанка наиболее интенсивна при входе в облачность и при выходе из неё, это называется «болтанка у стены облаков».

2. Орографическая турбулентность

Орографическая турбулентность образуется из-за влияния подстилающей поверхности, а именно: из-за её неоднородности, из-за наличия горного хребта, а также его положению относительно направления ветра, из-за скорости ветра. Под влиянием орографических условий в атмосфере появляются колебания, которые усиливаются в неустойчивом потоке, а при разрушении они оказывают влияние на развитие турбулентности. Под влиянием орографических факторов образуются волновые колебания, которые могут достигать верхних слоев атмосферы.

По С.М. Шметеру можно обозначить четыре типа обтекания гор воздушными массами:

I-й тип обтекания (рис. 1.1, а). Легкий ветер на вершине горного хребта. Линии тока слегка смещены, турбулентность незначительна.

II-й тип обтекания (рис. 1.1, б). На вершине горной цепи скорость ветра около 5-7 м/с. На наветренной стороне- сходимостъ потоков и смещения линий тока, а на подветренной- вертикальный вихрь с горизонтальной осью.

III-й тип обтекания (рис. 1.1, в). Скорость ветра возрастает с набором высоты, на вершине горного хребта она составляет 8-10 м/с. На подветренной стороне гор, образуются вихри, которые способны отрываться от горной цепи и переноситься с воздушным потоком. Над зоной вихрей появляется

структура подветренных волн, которые ослабевают по мере удаления от горной цепи.

VI-й тип обтекания (рис. 1.1, г). Скорость ветра увеличивается на высоту до полутора раз выше горного хребта, а затем, резко затухает. При таком типе обтекания за горной цепью формируется сильнейшая турбулентность. [2]

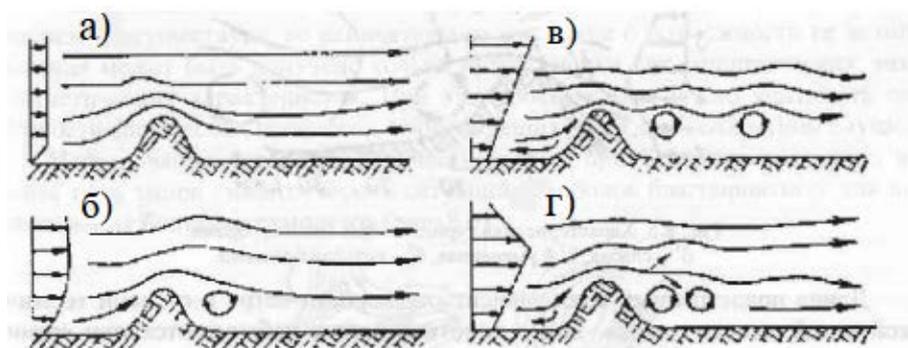


Рис. 1.1 Структура воздушного потока над горами

Скорость вертикальных токов максимальная на уровне вершины горного хребта, а затем, при увеличении высоты уменьшается скорость воздушного потока.

Во время полета ВС большую опасность для него представляют нисходящие токи, так как при попадании в них, воздушное судно может просто-напросто не смочь набрать нужную высоту, а как следствие, может случиться катастрофа.

Чтобы оценить вероятность образования орографической турбулентности надо учитывать влияние таких факторов, как:

- Синоптические условия и их изменения. Наиболее важно влияние атмосферных фронтов, так как из-за них наблюдаются значительные изменения температуры, скорости и направления ветра;
- Струйные течения. За струйными течениями стоят сильные сдвиги ветра, которые могут приводить к увеличению турбулизации атмосферы.

- Рельеф местности. При взаимосвязи отдельных возмущений возможны изменения общего воздушного потока.
- Суточные и сезонные изменения. Для каждой конкретной местности характерны свои суточные и сезонные изменения. Формированию инверсий в нижних слоях атмосферы способствует радиационное выхолаживание, которое оказывает влияние на образование подветренных волн.

3. Турбулентность в струйных течениях

Это самая частая и сильная болтанка, которая оказывает влияние на полеты ВС. Она чаще всего незаметна и образовывается при ясном небе, либо же в облаках, образование которых связано со струйными течениями. Они выглядят как полосы облаков с четкими краями, которые вытянуты вдоль потока. В таких облаках болтанка наиболее интенсивная. Самая интенсивная турбулентность находится на границах струйного течения, именно в том месте, где отмечаются наибольшие значения скорости ветра. В струйных течениях, зоны «тихие» и зоны сильной турбулентности сменяют друг друга. Те зоны, что находятся внутри струйных течений имеют свойство высокой изменчивости, как временной, так и пространственной.

Повторяемость турбулентности

Для расчета повторяемости турбулентности используют отношение расстояния, пройденного ВС в турбулентной зоне к общему расстоянию, пройденному самолетом в зоне струйного течения.

Средняя интенсивность турбулентности рассчитывается по формуле:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^4 n_i \sigma^{(i)}}{\sum_{i=1}^4 n_i} \quad (1.9)$$

где $\sigma^{(i)}$ – интенсивность болтанки самолета в баллах; n_i – число случаев болтанки данной интенсивности. [1]

Турбулентные зоны в струйных течениях

Расположение турбулентных зон в струйных течениях главным образом зависит от вертикальных и горизонтальных градиентов скорости ветра. Повторяемость болтанки в холодных частях струйного течения выше, так как там выше градиенты скорости ветра. Но, нужно учитывать, что такое распределение не всегда стабильно и может меняться под действием орографических факторов. [1]

Существует два вида сдвигов ветра:

1. Сдвиг по потоку. Наблюдается, когда происходит усиление или ослабление скорости ветра по направлению потока;
2. Боковой сдвиг. Наблюдается, когда происходит сильное ослабление ветра в направлении, которое перпендикулярно потоку. [2]

1.3. Прогноз атмосферной турбулентности

Атмосферная турбулентность является одним из наиболее опасных явлений погоды, а её прогноз – один из наиболее важных, так как попадание ВС в зону турбулентности может являться причиной для образования летного происшествя.

Ещё раз отметим, что атмосфера всегда находится в состоянии турбулентности, но болтанку, которая влияет на ВС вызывает разница в полях ветра и температуры.

В прогнозах для авиации обычно указывают интенсивность турбулентности, а также высоту верхней и нижней границы. Для прогноза турбулентности применяют два метода: синоптический и физико-статистический.

1.3.1. Синоптический метод прогноза

Синоптический метод заключается в полном анализе синоптической обстановки, для этого используют приземные карты, карты барической топографии, кольцевые и прогностические карты и т.д. На них выделяют участки с наибольшей вероятностью болтанки. Для того, чтобы дать прогноз определяют тип облачности, наличие или отсутствие фронтальных зон, а также интенсивность фронтальных разделов при их наличии. Используются высотные карты для определения характера адвекции, типа и особенностей барического поля, а также для определения скорости ветра.

Наиболее часто турбулентность образуется при таких синоптических ситуациях, как:

I-й тип барического поля (рис. 1.2, а). Ложбина, внутри которой образовался циклон. Тогда, турбулентность формируется в той зоне, где наблюдается сходимость или расходимость изогипс. Скорость ветра достигает 100-150 км/ч, средние значения горизонтальных сдвигов превышают 15-20 км/ч на 100 км. В зоне сходимости изогипс граница с большей возможностью появления болтанки находится от приземной линии ХФ до оси ложбины. В зоне сходимости изогипс наблюдается умеренная болтанка, а в зоне расходимости- сильная.

II-й тип барического поля (рис. 1.2, б). Высотный циклон. В тыловой части циклона, чаще всего, болтанка умеренная, скорость ветра достигает 100-120 км/ч, также есть небольшая сходимость изогипс. А в передней части

циклона, в районе расходимости изогипс и горизонтальных сдвигов ветра, где скорость ветра 100-150 км/ч- интенсивность болтанки больше, чем умеренная.

III-й тип барического поля (рис. 1.2, в). Ложбина, в которой болтанка наблюдается в передней части, несколько правее от её оси в области расходимости изогипс. В такой синоптической ситуации- болтанка умеренная. Вероятность образования болтанки увеличивается при углублении ложбины. Скорость ветра зачастую около 100км/ч, а сдвиги ветра незначительны.

IV-й тип барического поля (рис. 1.2, г). Ложбина, в которой область болтанки располагается в тыловой части, в области сходимости изогипс. Скорость ветра здесь примерно 80-100 км/ч, а боковые сдвиги 5-10 км/ч на 100 км. При данной синоптической ситуации, обычно, болтанка значительная.

IV-й тип (рис. 1.2, д). Высотный гребень. Первая зона болтанки расположена в передней части, а вторая – в тыловой части гребня. Скорость ветра при данной синоптической ситуации незначительна и обычно не превышает 40-60 км/ч, боковые сдвиги 10-15 км/ч на 100 км. Интенсивность болтанки обычно умеренная или слабая. [3]

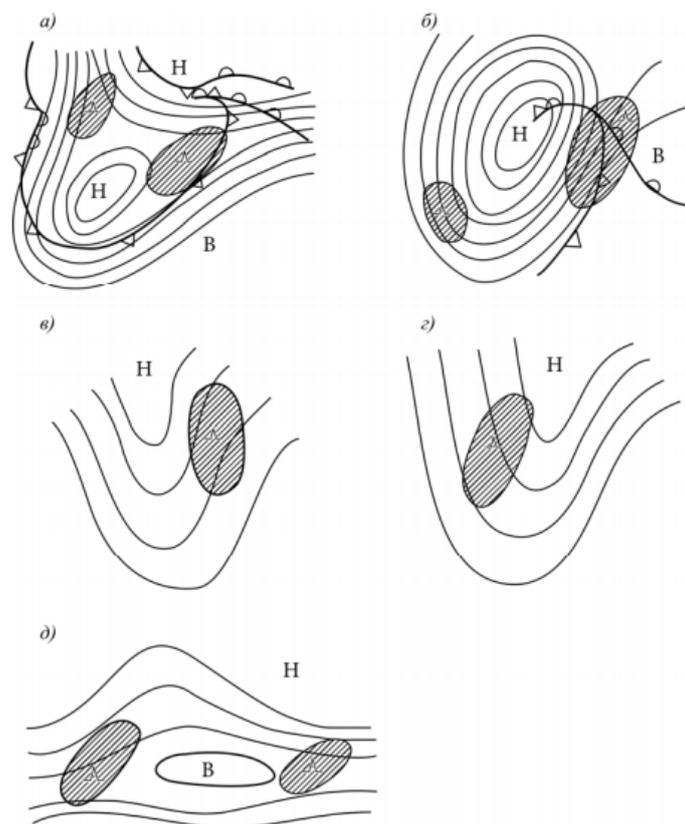


Рис. 1.2. Распределение и положение зон болтанки при различных типах синоптических ситуаций.

Иными синоптическими условиями для образования болтанки являются:

Холодный фронт 1-го и 2-го рода на приземной карте погоды; теплый фронт или фронт окклюзии, которые связаны с тропосферными или стратосферными струйными течениями; струйные течения, скорости которых >25 м/с и другие определенные метеопараметры; периферия циклона, ложбина, гребень.

Синоптический метод прогноза — он опирается не на статистические значения, а, непосредственно, на наблюдения за данным конкретным процессом, а значит, этот метод является наиболее точным.

1.3.2. Физико-статистический метод прогноза атмосферной турбулентности

Он заключается в оценке пороговых значений, расчетов при помощи номограмм, графиков и т.д. Также, рассчитывают критические значения, которые определяют турбулизированность атмосферы.

Чаще всего, для прогноза болтанки используют графический метод, а также метод комплекса критериев. [3] Для применения обоих методов используются данные температурно-ветрового зондирования.

1. Графический метод

Смысл метода заключается в том, чтобы построить вертикальные профили температуры, скорости и направления ветра. Наклон каждого линейного отрезка к горизонтальной оси описывает вертикальный градиент той или иной метеовеличины. Зависимость наклона и градиентов такая, что чем больше угол наклона, тем меньше вертикальный градиент.

Для оценки атмосферной турбулентности используют критические значения, которые равны 7°C для температуры воздуха, 15° - для направления ветра и 10м/с для скорости ветра.

После построения вертикальных профилей сравнивают результаты работы с критическими значениями, а затем, делают выводы о возможности формирования турбулентности в данном районе. Чем больше различных метеорологических параметров имеют превышения критических значений, тем больше вероятность болтанки.

Самый главный плюс этого метода — это его оперативность, в то время как минусом данного метода является то, что он не учитывает горизонтальные градиенты, что приводит к ошибкам в результатах прогноза. [3]

2. Метод комплексных критериев

Заключается в том, чтобы определить значения шести критериев турбулентности, таких как: скорость ветра $> 25\text{ м/с}$; вертикальный градиент скорости ветра 10 м/с/км ; горизонтальный градиент скорости ветра 5 м/с/100км ; вертикальный сдвиг направления ветра $15^\circ/\text{км}$; вертикальный градиент температуры 7°С/км ; горизонтальный градиент температуры 2°С/100 км .

Для того, чтобы произвести расчеты, необходимо разделить длину всего пути на участки, равные 300-400 км, где узлами будут пункты, в которых производилось температурно-ветровое зондирование. Далее, по данным зондирования производят расчеты вертикальных и горизонтальных градиентов скорости, направления ветра и температуры, а также определяется скорость ветра на каждом выделенном участке.

После анализа всех полученных данных дается прогноз турбулентности. Если на высоте полета есть хотя бы три из указанных условий, то указывается турбулентность. [3]

Это не все существующие методы прогноза, есть иные, но они не получили повсеместного использования, так как подходят не для всех регионов и не для всех типов местности. Но, при нужных условиях могут использоваться и быть результативными. Перечислим их и дадим краткую характеристику:

1. Прогноз термической турбулентности по аэрологической диаграмме.

Этот метод лучше использовать до уровня 400 гПа, то есть до высоты примерно 7,2 км, а это значит, что использование этого метода для самолетов гражданской авиации не подходит.

2. Прогноз турбулентности в горных районах.

Прогноз турбулентности в горных районах — это очень индивидуальная особенность каждой местности. Поэтому, для правильных прогнозов необходимо долгое время изучать местность и наблюдать за ней.

3. Прогноз турбулентности в приземном слое с помощью графиков.

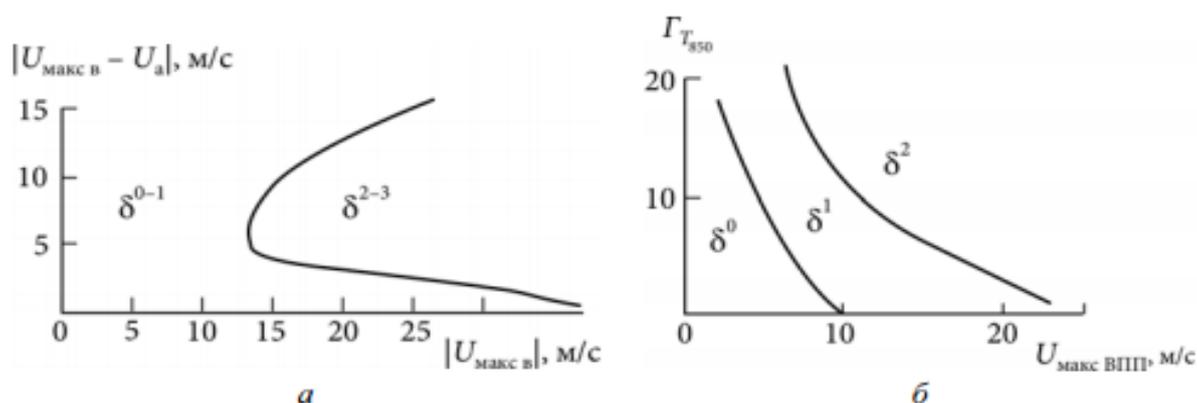


Рис 1.3. График для прогноза болтанки в приземном слое: а – по приземным данным, б – по данным о ветре на ВПП и горизонтальном градиенте температуры на уровне 850 гПа

По рисунку 1.3 (а) на оси абсцисс откладывают максимальную скорость ветра у земли на возвышенности, а по оси ординат – разность скоростей ветра на возвышенности и на ВПП. Далее, выделяются две зоны интенсивности болтанки: δ^{0-1} – слабая болтанка, δ^{2-3} – умеренная или сильная болтанка.

По рисунку 1.3 (б) по оси абсцисс откладывают максимальную скорость ветра на ВПП, а по оси ординат – горизонтальный градиент температуры на уровне 850 гПа. Выделяют три зоны болтанки: δ^0 – болтанки не будет, δ^1 – слабая болтанка, δ^2 – умеренная болтанка.

В основной массе аэропортов нашей страны, самым популярным методом прогноза атмосферной турбулентности является синоптический метода, так как наши специалисты сильны в обработке получаемых данных и их правильной обработке. Физико-статистические методы прогноза станут использовать больше тогда, когда появится современная техника, которая даст возможность быстро и своевременно выполнять расчеты.

2. Исходные данные и методы обработки

2.1. Характеристика и методы обработки исходного материала

Для правильного обеспечения и планирования полетов воздушных судов берут во внимание климатические характеристики местности. Они помогают отследить локальные особенности местности, а также повысить безопасность и экономичность воздушных полетов.

Для данной работы в качестве исходных данных послужили приземные карты погоды и карты барической топографии, предоставленные Филиалом Федерального государственного бюджетного учреждения Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды «Центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Республики Коми», а также данные с сайта rs5.ru. При сборе данных с карт погоды использовался метод интерполяции.

Все исходные данные были обработаны, осреднены и сведены в таблицу. В ней содержится информация о названии городов, рядом с которыми находятся аэропорты, номера исследуемых месяцев, исследуемые изобарические поверхности, а также данные о средних температуре, скорости и направлении ветра. Данные взяты за январь, апрель, июль и октябрь 2020 года. Данные месяцы являются серединами каждого сезона соответственно: зимы, весны, лета и осени. Для исследования были взяты города: Сыктывкар, Воркута, Нарьян-Мар, Архангельск и Мурманск. Уровни, на которых были взяты данные: 0 км- приземная карта погоды; 1,5 км- 850 гПа; 3,0 км- 700 гПа; 5,5 км- 500 гПа. Эти высоты выбраны по нескольким критериям: во-первых, в связи с труднодоступностью получения данных, а во-вторых, именно эти высоты являются теми, на которых происходит набор высоты, а

значит, ВС очень уязвимо. Поэтому мы и рассматривает эти высоты в данной работе. Таблицы исходных данных представлены в приложении А.

Для того, чтобы сделать предположение о наличии зон турбулентности, было решено посчитать градиенты температуры, скорости и направления ветра по формулам:

$$\frac{dt}{dz} = \frac{t_2 - t_1}{z_2 - z_1} \quad (2.1)$$

$$\frac{dv}{dz} = \frac{v_2 - v_1}{z_2 - z_1} \quad (2.2)$$

$$\frac{dd}{dz} = \frac{d_2 - d_1}{z_2 - z_1} \quad (2.3)$$

где t – температура воздуха; v – скорость ветра; d – направление ветра; z – высота основных изобарических поверхностей в км.

Далее, после произведенных вычислений градиентов по всем выбранным метеопараметрам для каждого дня каждого месяца, полученные результаты были осреднены и так же сформированы в таблицу, которая представлена в приложении Б. Данные осредняются с целью выявления района с наибольшей повторяемостью болтанки.

2.2. Климатическая характеристика Северо-Западного федерального округа

Моря Северного Ледовитого и Атлантического океанов омывают большую часть Северо-Западного федерального округа, тем самым определяя его климат. От Балтийского моря до Уральских гор прослеживаются различия в климате, и в значительной степени это связано с удалением от Атлантического океана и холодных северных морей.

Территории Северо-Западного федерального округа находятся в субарктическом и умеренном климатических поясах. Тип климата - умеренно-континентальный.

В данном регионе явно выделяются тёплый и холодный сезоны, лето и зима соответственно. Также хорошо выражены переходы — весна и осень. Влажность воздуха убывает с запада на восток: наиболее влажный воздух в районе Балтийского моря, а наиболее сухой в республике Коми.

В холодный период года, с октября по март, с Атлантического океана приходят воздушные массы. На данной территории большое количество рек, озёр и болот, так как здесь наблюдается низкая испаряемость выпадаемых осадков.

В тёплый период года, с апреля по сентябрь, на территорию СЗФО приходят воздушные массы с Северного Ледовитого океана и зачастую приносят с собой прохладный и влажный воздух, а также холодные дожди.

В районе Балтийского моря преобладают незначительные колебания среднесуточных, а также среднегодовых температур, но при движении на юго-восток, можно наблюдать увеличение амплитуды как среднегодовых, так и среднесуточных температур.

На севере СЗФО средняя температура января составляет -20, а июля +12 градусов, далее, двигаясь южнее, можно наблюдать повышение средних июньских температур: +15 в Печоре, +18 в Санкт-Петербурге и Сыктывкаре. А понижения средних температур января наблюдаются с запада на восток: -3 в Калининграде, -14 в Сыктывкаре и -20 в Нарьян-Маре.

Северо-Западный федеральный округ принадлежит к лесной зоне. На его северо-восточной части преобладают хвойные леса, а остальная часть относится к зоне смешанных лесов, где помимо хвойных деревьев присутствуют также широколиственные виды деревьев.

Рельеф данной территории представляет собой низменную равнину, расположенную по большей части не выше, чем 100 м над уровнем моря. Но, есть участки, где высота над уровнем моря достигает 250-320 м.

В третьей главе произведена оценка полученных результатов, а также сделаны предположения о возможности формирования турбулентности.

3. Оценка вертикальных градиентов температуры и ветра в районе крупных аэродромов Северо-Западного федерального округа

3.1. Аэропорт Мурманск имени Николая II

В январе наблюдаются минимальные высоты основных изобарических поверхностей, а также минимальные значения температуры на них. Значения скоростей ветра примерно сравнимы со значениями в апреле, но, достаточно разнятся со значениями в другие два месяца. Направление ветра изменяется от 216 до 299°.

Максимальный градиент температуры наблюдался в слое 850-700 гПа и равен 9,4 °С/км. Минимальный градиент составил 0,9 °С/км в слое 0-850 гПа.

Максимальное значение градиента скорости ветра наблюдалось в слое 0-850 гПа и равнялось 5,7 м/с/км. Минимальное- в слое 850-700 гПа и равнялось 0,2 м/с/км.

Максимальный градиент направления ветра составил 33 °/км и наблюдался он в слое 850-700 гПа. Минимальный градиент был равен 11,6 °/км. в слое 700-500 гПа.

По январю можно сделать такой вывод: максимальные градиенты наблюдались в слое 1,5-3,0 км, кроме градиента скорости ветра, а минимальные градиенты невозможно объединить в группу, так как в каждом слое оказался свой минимальный градиент.

В апреле значения высот стандартных изобарических поверхностей больше, чем в зимние месяцы. Средние температуры -выше, значения средних скоростей ветра также выше, чем в январе, направление ветра менялось от 150 до 199°.

Максимальное значение градиента температуры составило 7,2 °С/км в слое 850-700 гПа. Минимальное 5,0 °С/км в слое 700-500 гПа.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и составил 4,9 м/с/км. Минимальный градиент был равен 0,2 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра был в слое 850-700 гПа и составил 23,1 °/км. Минимальный равен 1,6 °/км, в слое 700-500 гПа.

Исходя из полученных данных делаем вывод, что максимальные градиенты температуры и направления ветра наблюдались в слое 1,5-3,0 км, а максимально значения градиента скорости оказалось в слое 0-1,5 км. Минимальные градиенты температуры и направления ветра наблюдались в слое 3,0-5,5 км. Минимальный градиент скорости ветра оказался в слое 1,5-3,0 км.

В июле значения высот стандартных изобарических поверхностей максимальны, также, как и значения температуры. Значения скоростей ветра достаточно сильно отличаются от скоростей ветра в апреле и январе. Направления ветра менялось от 130 до 199°

Максимальный градиент температуры в июле составил 7,4 °С/км в слое 850-700 гПа. Минимальные значения составили 3,9 °С/км в слое 0-850 гПа.

Максимальный градиент скорости ветра составил 2,0 м/с/км в слое 0-850 гПа. Минимальные значения равны 0,7 м/с/км в слое 700-500 гПа.

Максимальный градиент направления ветра был в слое 0-850 гПа и составил 33 °/км. Минимальные значения равны 4,2 °/км в слое 850-700 гПа.

В общем, максимальные градиенты в июле наблюдались в слое 0-850 гПа.

В октябре значения высот основных изобарических поверхностей несколько меньше, чем в летние месяцы, температура на них соответственно,

тоже меньше. Значения скорости ветра незначительно выше летних, но достаточно сильно отличаются от зимних. Направление ветра менялось от 173 до 244°.

Максимальное значение градиента температуры наблюдалось в слое 700-500 гПа и составляло 6 °С/км. Минимальный градиент был равен 4,7 °С/км и наблюдался в слое 0-850 гПа.

Максимальный градиент скорости ветра в октябре составил 4 м/с/км в слое 0-850 гПа. Минимальное значение равно 0,2 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра равен 17,7 °/км в слое 0-850 гПа, а минимальное значение равно 9,9 °/км в слое 700-500 гПа.

Из полученных данных можно сделать вывод, что максимальные градиенты скорости и направления ветра наблюдались в слое 0-850 гПа. Максимальное значение градиента температуры в слое 700-500 гПа.

В целом, можно сказать, что для Мурманска в первое полугодие характерны максимальные градиенты направления ветра в слое 850-700 гПа, а во втором полугодии в слое 0-850 гПа. По скорости ветра все максимальные градиенты оказались в слое 0-850 гПа. Что касается температуры воздуха, максимальные градиенты были в слое 850-700 гПа, за исключением октября. Таким образом можно сделать вывод, что зона с наиболее интенсивной турбулентностью в районе Мурманска находится в слое от земли до 3 км.

3.2. Аэропорт Архангельск имени Ф.А. Абрамова

В январе отмечались минимальные значения высот основных изобарических поверхностей, а также минимальные значения температур на них. Значения средних скоростей ветра средние почти для всех изобарических по-

верхностей, за исключением поверхности 500 гПа. Направление ветра менялось от 203 до 317°

Максимальное значение градиента температуры наблюдалось в слое 700-500 гПа и равно 6,4 °С/км. Минимальное значение равно 1,9 °С/км в слое 0-850 гПа.

Максимальный градиент скорости ветра равен 6,6 м/с/км в слое 0-850 гПа. Минимальное значение равно 0,8 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра равен 29,5 °/км в слое 0-850 гПа. Минимальный градиент равен 14,6 °/км в слое 700-500 гПа.

Из полученных данных можно сделать вывод, что максимальные градиенты направления и скорости наблюдались в слое от земли до высоты 1,5 км. Градиент температуры максимален в слое 3,0-5,5 км.

В апреле значения высот стандартных изобарических поверхностей больше, чем в зимние месяцы. Средние температуры - выше январских, значения средних скоростей ветра на некоторых высотах ниже, чем в январе, направление ветра менялось от 209 до 260°.

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 700-500 гПа и равны 6,2 °С/км. Минимальные значения были в слое 0-850 гПа и равны 4,9 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 5,5 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 0,6 м/с/км в слое 700-500 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен 24 °/км, а минимальный градиент наблюдался в слое 850-700 гПа и был равен 12,6 °/км.

В апреле, максимальные значения градиентов направления и скорости ветра наблюдались в слое от земли до высоты 1,5 км. Максимальный градиент температуры был в слое от 3,0 до 5,5 км.

В июле максимальны высоты основных изобарических поверхностей, а также максимальны значения температуры на них. Значения скоростей ветра минимальны, направление ветра по высоте изменялось от 120 до 190°.

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 850-700 гПа и равны 5,8 °С/км. Минимальные значения были в слое 0-850 гПа и равны 4,1 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 4,2 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 1,1 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен 36 °/км, а минимальный градиент наблюдался в слое 700-500 гПа и был равен 2,4 °/км.

Максимальные градиенты скорости и направления ветра также, как и в апреле наблюдаются в слое от земли до 1,5 км. А максимальный градиент температуры максимален в слое от 1,5 до 3,0 км.

В октябре значения высот основных изобарических поверхностей незначительно отличаются от значений июля. Но, значения средних температур изменились достаточно сильно. Значения скоростей ветра незначительно отличаются от значений скоростей ветра в июле. Направление ветра по высоте изменялось в диапазоне от 160 до 250 °.

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 700-500 гПа и равны 5,3 °С/км. Минимальные значения были в слое 0-850 гПа и равны 4,0 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 4,0 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 0,6 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен 45 °/км, а минимальный градиент наблюдался в слое 700-500 гПа и был равен 1,6 °/км.

Максимальные значения градиентов скорости и направления ветра наблюдались в слое от земли до 1,5 км, максимальный градиент температуры наблюдался в слое от 3 км до 5,5 км.

Проанализировав полученные результаты можно сделать вывод, что максимальные градиенты скорости и направления ветра в районе Архангельска наблюдаются в слое от 0 до 850 гПа в течение всего года. В общем, градиент температуры максимален в слое 700- 500 гПа. Следовательно, наиболее интенсивная турбулентность может наблюдаться в слое от земли до высоты 1,5 км, а также в слое от 3,0 до 5,5 км.

3.3. Аэропорт Нарьян-Мар

В январе отмечались минимальные значения высот основных изобарических поверхностей, а также минимальные значения температур на них. Направление ветра менялось от 180 до 250°.

Максимальное значение градиента температуры наблюдалось в слое 850-700 гПа и равно 6,9 °С/км. Минимальное значение равно 0,0 °С/км в слое 0-850 гПа.

Максимальный градиент скорости ветра равен 5,0 м/с/км в слое 0-850 гПа. Минимальное значение равно 0,9 м/с/км в слое 700-500 гПа.

Максимальный градиент направления ветра равен $28 \text{ }^\circ/\text{км}$ в слое 0-850 гПа. Минимальный градиент равен $7 \text{ }^\circ/\text{км}$ в слое 700-500 гПа.

По полученным данным сделаем вывод, что градиенты скорости и направления ветра максимальны в слое 0-850 гПа, а градиент температуры максимален в слое 850-700 гПа.

В апреле значения высот стандартных изобарических поверхностей больше, чем в зимние месяцы. Средние температуры -выше январских, значения средних скоростей ветра ниже, чем в январе, за исключением уровня земли, там, средняя скорость ветра чуть выше. Направление ветра менялось от 172 до 219° .

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 0-850 гПа и равны $6,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$. Минимальные значения были в слое 700-500 гПа и равны $5,9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен $2,7 \text{ м/с/км}$, а минимальные значения градиента составили $0,7 \text{ м/с/км}$ в слое 700-500 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен $17 \text{ }^\circ/\text{км}$, а минимальный градиент наблюдался в слое 850-700 гПа и был равен $3,5 \text{ }^\circ/\text{км}$.

В апреле, максимальные значения градиентов всех метеопараметров наблюдались в слое 0-850 гПа.

В июле высоты основных изобарических поверхностей максимальны, а также максимальны значения температуры на них. Значения скоростей ветра минимальны, направление ветра по высоте изменялось от 128 до 221° .

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 0-850 гПа и равны 7,9 °С/км. Минимальные значения были в слое 850-700 гПа и равны 5,4 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 2,7 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 0,7 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен 31 °/км, а минимальный градиент наблюдался в слое 850-700 гПа и был равен 7,1 °/км.

Максимальные градиенты температур, скорости и направления ветра наблюдались в слое от земли до высоты 1,5 км.

В октябре значения высот основных изобарических поверхностей значительно отличаются от значений июля. Значения средних температур изменились также достаточно сильно. Значения скоростей ветра незначительно отличаются от значений скоростей ветра в июле. Направление ветра по высоте изменялось в диапазоне от 180 до 240 °.

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 700-500 гПа и равны 6,3 °С/км. Минимальные значения были в слое 850-700 гПа и равны 4,2 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 2,7 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 0,7 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен 19 °/км, а минимальный градиент наблюдался в слое 850-700 гПа и был равен 7,5 °/км.

Максимальные значения градиентов скорости и направления ветра наблюдались в слое от земли до 1,5 км, максимальный градиент температуры наблюдался в слое от 3 км до 5,5 км.

В общем, можно сказать, что для Нарьян-Мара характерны максимальные градиенты скорости и направления ветра в слое 0-850 гПа. Максимальный градиент температуры преобладает также в слое 0-850 гПа в апреле и июне. В январе он максимален в слое от 1,5 до 3,0 км, а в октябре в слое от 3,0 км до 5,5 км. Следовательно, в районе Нарьян-Мара наиболее интенсивная турбулентность может развиваться на высотах от земли до 1,5 км.

3.4. Аэропорт Воркута

В январе были минимальные значения высот основных изобарических поверхностей, а также минимальные значения температур на них. Направление ветра менялось от 180 до 244°.

Максимальное значение градиента температуры наблюдалось в слое 700-500 гПа и равно 6,5 °С/км. Минимальное значение равно 0,4 °С/км в слое 0-850 гПа.

Максимальный градиент скорости ветра равен 2,9 м/с/км в слое 0-850 гПа. Минимальное значение равно 0,0 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра равен 35 °/км в слое 0-850 гПа. Минимальный градиент равен 0,1 °/км в слое 700-500 гПа.

По полученным данным сделаем вывод, что градиенты скорости и направления ветра максимальны в слое 0-850 гПа, а градиент температуры максимален в слое 700-500 гПа.

В апреле значения высот стандартных изобарических поверхностей больше, чем в зимние месяцы. Средние температуры -выше январских, значения средних скоростей ветра на уровне земли и 850 гПа ниже, чем в январе, а на остальных уровнях значения выше. Направление ветра менялось от 148 до 212°.

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 700-500 гПа и равны 6,5 °С/км. Минимальные значения были в слое 0-850 гПа и равны 1,6 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 3,5 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 1,6 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен 35 °/км, а минимальный градиент наблюдался в слое 700-500 гПа и был равен 2,5 °/км.

В апреле, максимальные значения градиентов скорости и направления ветра были максимальны в слое 0-850 гПа. А градиент температуры был максимален в слое 700-500 гПа.

В июле высоты основных изобарических поверхностей максимальны, а также максимальны значения температуры на них. Значения скоростей ветра-минимальны, направление ветра по высоте изменялось от 129 до 225°.

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 700-500 гПа и равны 5,8 °С/км. Минимальные значения были в слое 0-850 гПа и равны 3,4 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 3,2 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 1,4 м/с/км в слое 700-500 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен $61 \text{ }^\circ/\text{км}$, а минимальный градиент наблюдался в слое 700-500 гПа и был равен $11,8 \text{ }^\circ/\text{км}$.

Максимальный градиент температуры наблюдался в слое от 3,0 км до 5,5 км, а максимальные градиенты скорости и направления ветра наблюдались в слое от земли до высоты 1,5 км.

В октябре значения высот основных изобарических поверхностей отличаются от значений июля и больше схожи со значениями апреля. Значения средних температур изменились достаточно сильно, относительно июля. Значения скоростей ветра на уровне земли и уровне 850 гПа примерно в 1,5 раза выше значений на этих же высотах в июле, но значения на уровне 700 гПа и 500 гПа почти не отличаются от летних. Направление ветра по высоте изменялось в диапазоне от 148 до 212 ° .

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 700-500 гПа и равны $5,9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$. Минимальные значения были в слое 850-700 гПа и равны $4,1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен $4,1 \text{ м/с/км}$, а минимальные значения градиента составили $0,1 \text{ м/с/км}$ в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 850-700 гПа и был равен $38 \text{ }^\circ/\text{км}$, а минимальный градиент наблюдался в слое 700-500 гПа и был равен $1,1 \text{ }^\circ/\text{км}$.

Максимальные значения градиентов температуры, скорости и направления ветра наблюдались в слоях от 3,0 км до 5,5 км, от земли до 1,5 км и от 1,5 до 3,0 км соответственно.

Подводя итоги, можно сказать, что для Воркуты характерны максимальные градиенты температуры в слое от 3,0 км до 5,5 км. Максимальные

градиенты скорости ветра и направления ветра в основном в слое от земли до 1,5 км, за исключением октября. Следовательно, в районе Воркуты наиболее интенсивная турбулентность может развиваться в слое от земли до 1,5 км, а также в слое от 3,0 км до 5,5 км.

3.5. Аэропорт Сыктывкар имени П.А. Истомина

В январе были минимальные значения высот основных изобарических поверхностей, а также минимальные значения температур на них. Значения направления ветра с высотой менялись от 210 до 278°.

Максимальное значение градиента температуры наблюдалось в слое 700-500 гПа и равно 6,2 °С/км. Минимальное значение равно 2,9 °С/км в слое 0-850 гПа.

Максимальный градиент скорости ветра равен 5,5 м/с/км в слое 0-850 гПа. Минимальное значение равно 0,6 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра равен 33 °/км в слое 0-850 гПа. Минимальный градиент равен 5,8 °/км в слое 850-700 гПа.

По полученным данным сделаем вывод, что градиенты скорости и направления ветра максимальны в слое 0-850 гПа, а градиент температуры максимален в слое 700-500 гПа.

В апреле значения высот стандартных изобарических поверхностей больше, чем в зимние месяцы. Средние температуры -выше январских, значения средних скоростей ветра примерно такие же, как в январе. Направление ветра менялось от 150 до 224°.

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 700-500 гПа и равны 6,4 °С/км. Минимальные значения были в слое 0-850 гПа и равны 3,2 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 4,7 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 1,0 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен 39 °/км, а минимальный градиент наблюдался в слое 700-500 гПа и был равен 3,8 °/км.

В апреле, максимальные значения градиентов скорости и направления ветра были максимальны в слое 0-850 гПа. А градиент температуры был максимален в слое 700-500 гПа.

В июле высоты основных изобарических поверхностей максимальны, а также максимальны значения температуры на них. Значения скоростей ветра минимальны, направление ветра по высоте изменялось от 126 до 240°.

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 850-700 гПа и равны 6,4 °С/км. Минимальные значения были в слое 0-850 гПа и равны 2,0 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 3,1 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 1,1 м/с/км в слое 850-700 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен 46°/км, а минимальный градиент наблюдался в слое 700-500 гПа и был равен 10,1 °/км.

Максимальный градиент температуры наблюдался в слое от 1,5 км до 3,0 км, а максимальные градиенты скорости и направления ветра наблюдались в слое от земли до высоты 1,5 км.

В октябре значения высот основных изобарических поверхностей почти не отличаются от значений июля и апреля. Значения средних температур изменились достаточно сильно, относительно июля. Значения скоростей ветра. Значения скоростей ветра достаточно сильно отличаются от значений июля. Направление ветра по высоте изменялось в диапазоне от 208 до 253°.

Максимальные значения градиента температуры наблюдались в слое 700-500 гПа и равны 6,2 °С/км. Минимальные значения были в слое 0-850 гПа и равны 2,5 °С/км.

Максимальный градиент скорости ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и равен 5,2 м/с/км, а минимальные значения градиента составили 1,7 м/с/км в слое 700-500 гПа.

Максимальный градиент направления ветра наблюдался в слое 0-850 гПа и был равен 32 °/км, а минимальный градиент наблюдался в слое 700-500 гПа и был равен 3,2 °/км.

Максимальные значения градиентов скорости и направления ветра наблюдались в слое от 0 до 850 гПа. Максимальный градиент температуры наблюдался в слое от 700 гПа до 500 гПа.

В основном, для Сыктывкара характерны максимальные градиенты температуры в слое от 3,0 км до 5,5 км. А максимальные градиенты скорости и направления ветра в слое от уровня земли до высоты 1,5 км. Следовательно, можно сделать вывод, что наиболее интенсивная турбулентность может развиваться на высотах от земли до 1,5 км, а также от 3,0 км до 5,5 км.

На основании вышеизложенного были сделаны следующие выводы:

1. Градиент скорости ветра:

В течение всех сезонов, по всем выбранным городам Северо-Западного Федерального округа, средние значения градиентов скорости ветра наблюдались в слое от уровня земли до 1,5 км (в пограничном слое). Это связано с влиянием подстилающей поверхности, она прогревается неравномерно. Важно отметить, что ни в одном городе средние значения градиентов не превышали критическое значение, равное 10 м/с/км, значит, можно сказать, что нет тенденции на прогноз турбулентности по этому критерию. Минимальные градиенты находятся в разных слоях, но преобладают в слое от 1,5 до 3,0 км.

2. Градиент направления ветра:

На протяжении всех сезонов, во всех городах средние максимальные градиенты находятся, так же, в слое от земли до 1,5 км (в пограничном слое), кроме Мурманска. Здесь, в зимнем сезоне, средние максимальные значения градиентов направления ветра наблюдаются в слое от 1,5 до 3,0 км, но при этом, в пограничном слое, также наблюдается превышение критических значений. Все максимальные значения превышают критическую отметку, равную 15°/км. Значит, можно сказать, что есть основание для прогноза турбулентности на основании превышения данного градиента. Это есть динамическая турбулентность. Средние минимальные значения градиентов направления ветра в Мурманске, Воркуте и Нарьян-Маре наблюдаются в слое от 3,0 до 5,5 км. В Сыктывкаре все минимальные градиенты находятся в слое от 3,0 до 5,5 км, а в Архангельске, в слое от 1,5 до 3,0 км, кроме зимнего сезона.

3. Градиент температуры:

Максимальные средние значения градиентов температуры, в преобладающем большинстве, наблюдались в слое от 3,0 до 5,5 км на протяжении всего года, за исключением летнего сезона, где максимальные значения были в слое от 1,5 до 3,0 км. Средние градиенты температуры не превышают критическое значение, равное 7°С/км. За исключением Нарьян-Мара, где максимальные средние градиенты наблюдаются в слое от уровня земли до 1,5 км в весенний и летний сезоны. Отметим, что в летом в Нарьян-Маре в погра-

ничном слое наблюдались превышения критических значений как градиента температуры, так и градиента направления ветра, значит, можно сказать, что существует вероятность образования болтанки. Минимальные значения распределены неравномерно, но, преобладают в пограничном слое. Также, нужно выделить город Мурманск, где наблюдались сильные превышения критических значений градиента температуры в слое от 1,5 до 3,0 км в зимний, весенний и летний сезоны. Но только в зимний период наблюдались превышения как градиента температуры, так и градиента направления ветра, значит, в этом слое также можно говорить о большой вероятности образования болтанки.

3.6 Статистические характеристики метеовеличин

Рассмотрим г. Мурманск и попытаемся объяснить такое превышение критических значений градиента температуры в зимний, весенний и летний период. Данные: Мурманск, рассматриваемый слой 850-700 гПа (1,5-3,0 км), значения температуры на двух уровнях 850 гПа и 700 гПа, рассчитанные градиенты на этих же уровнях по формулам 2.1 и 2.3, а также данные собранные за этот месяц, а именно: тип барического образования на уровне земли, 850 гПа и 500 гПа, его высота (высокое/низкое, обозначение- в- пустая клетка; низкое Б.О.), информация о наличии инверсии и её мощности, а также значения температуры на уровне 850 и 700 гПа. Данные о слоях инверсии и изомермии были взяты с сайта Atmospheric soundings. Рассмотрим данные за январь, приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Метеорологические параметры для г. Мурманска (январь 2020 г.)

Дата	Температура, °С		dt/dz, °С/км	Барические образования			Низкое Б.О.	Инверсии
	850	700		850-700	Земля	850,0		
								850
1	-13,0	-25,0	-13,3	Л	Л	Ц		
2	-8,00	-16,0	-8,9	Л	Л	Ц		
3	-2,0	-13,0	-12,2	Л	Л	Г	Н	
4	-8,0	-16,0	-8,9	Ц	Ц	Ц		0,2
5	-15,0	-25,0	-11,1	Ц	Ц	Ц		
6	-12,0	-18,0	-6,7	Г	Г	Г		
7	-5,0	-15,0	-11,1	Г	Г	Г		
8	-2,0	-10,0	-8,9	Ц	Ц	Г	Н	0,2
9	-4,0	-14,0	-11,1	Ц	Ц	Л		1,6
10	-7,0	-14,0	-7,8	Ц	Ц	Ц		
11	-6,0	-17,0	-12,2	Г	Г	Г		
12	-6,0	-14,0	-8,9	Ц	Ц	Ц		
13	-7,0	-18,0	-12,2	Л	Л	Ц		
14	-5,0	-17,0	-13,3	Л	Л	Ц		
15	-8,0	-16,0	-8,9	Л	Г	Г	Н	0,4
16	-7,0	-16,0	-10,0	Л	Л	Ц		
17	-11,0	-19,0	-8,9	Л	Л	Г	Н	
18	-12,0	-19,0	-7,8	Г	Г	Г		2,4
19	-9,0	-15,0	-6,7	Г	Г	Г		0,8
20	-5,0	-13,0	-8,9	Г	Г	Г		0,2
21	-3,0	-13,0	-11,1	Ц	Ц	Г	Н	
22	-10,0	-20,0	-11,1	Ц	Ц	Ц		0,6
23	-13,0	-23,0	-11,1	Ц	Ц	Ц		
24	-12,0	-19,0	-7,8	Л	Л	Г	Н	1,4
25	-13,0	-22,0	-10,0	Ц	Ц	Ц		
26	-17,0	-29,0	-13,3	Г	Ц	Ц		
27	-17,0	-28,0	-12,2	Ц	Ц	Ц		

28	-17,0	-24,0	-7,8	Л	Г	Г	Н	
29	-17,0	-24,0	-7,8	Ц	Ц	Г	Н	0,6
30	-15,0	-20,0	-5,6	Г	Г	Г		0,4
31	-11,0	-19,0	-8,9	Ц	Г	Г	Н	0,8

В течение 28 дней из 31, в январе 2020 года в районе АМСГ Мурманск наблюдались такие значения градиентов температуры, которые превышали критические значения, равные $7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Рисунок 3.1 наглядно это иллюстрирует.

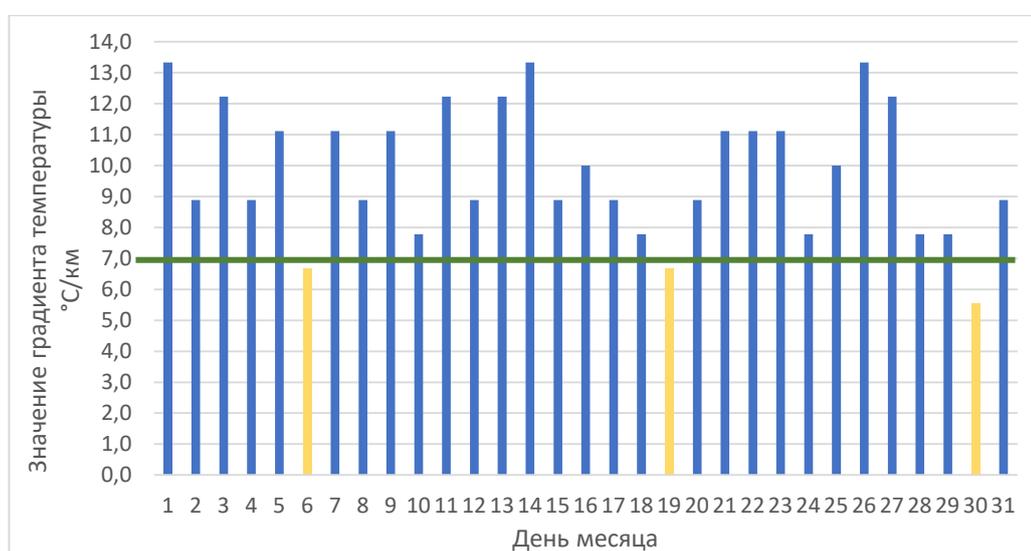


Рисунок 3.1 – График распределения градиентов температуры в течение января в слое 850-700 гПа.

В преобладающем большинстве, градиенты температуры, превышающие критические значения появляются в местах с низким давлением, в 82%.

Жирным шрифтом в таблице 3.1, в столбце градиента температуры выделены дни, когда наблюдались минимальные значения, а именно 6, 19 и 30 числа. Во всех этих трех днях наблюдалось высокое барическое образование с высоким давлением, температуры на высоте 850 гПа отличаются примерно на 5 градусов: -10, -14 и -20 соответственно. 19 и 30 числа наблюдалась инверсия. Сравнив 18, 19 и 20 января можно сделать вывод: в высоких бариче-

ских образованиях с высоким давлением градиент температуры больше либо, если температура повышается, а мощность инверсии уменьшается, либо, если понижается температура и растёт мощность инверсии.

Если принять 28 дней за 100%, тогда низкие барические образования были наблюдались в 32% случаев, а в половине из них наблюдались инверсии, то есть в 18% из 100%. Можно сделать вывод, что низкая высота барического образования с низким значением атмосферного давления у земли и более высоким на высотах в совокупности с инверсиями оказывает небольшое влияние на формирование высоких градиентов.

Жирным шрифтом в таблице 3.1 в столбце «Дата» выделены дни, когда наблюдались самые большие значения градиентов температуры за месяц. Эти дни объединяет то, что они находятся в высоком барическом образовании (до уровня 500 гПа), в поле низкого атмосферного давления. Причины, по которым именно в эти дни были максимальные градиенты по исследуемым характеристикам выявить не удалось.

Далее, проанализируем апрель. Рассмотрим такие же параметры, а также еще один- изотермию. Данные приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Метеорологические параметры для г. Мурманска (апрель 2020 г.)

Дата	Температура, °С		dt/dz, °С/км	Барические образования			Низкие Б.О.	Инверсии, °С	Изотермия, м
	850	700	850-700	Земля	850	500		850-700	850-700
1	-10,0	-17,0	-5,8	Ц	Ц	Л			31,0
2	-10,0	-21,0	-9,2	Ц	Ц	Л			
3	-12,0	-20,0	-6,7	Ц	Ц	Г	Н		
4	-16,0	-20,0	-3,3	Ц	Ц	Л			
5	-13,0	-22,0	-7,5	Л	Л	Л			122,0
6	-12,0	-24,0	-10,0	Г	Г	Г			

7	-11,0	-13,0	-1,7	Г	Г	Г		2,0	
8	-5,0	-15,0	-8,3	Л	Л	Г	Н		11,0
9	-3,0	-16,0	-10,8	Ц	Л	Л			
10	-16,0	-21,0	-4,2	Г	Л	Ц	Н	0,8	
11	-13,0	-24,0	-9,2	Л	Л	Л			
12	-13,0	-23,0	-8,3	Г	Г	Л	Н		
13	-8,0	-16,0	-6,7	ц	Ц	Г	Н		
14	-4,0	-13,0	-7,5	Л	Ц	Ц			
15	-1,0	-11,0	-8,3	Л	Л	Г			
16	-8,0	-16,0	-6,7	Г	Г	Г			
17	-8,0	-14,0	-5,0	Ц	Ц	Ц			330,0
18	-7,0	-17,0	-8,3	Ц	Ц	Ц			
19	-5,0	-14,0	-7,5	Г	Г	Г		0,6	
20	-4,0	-7,0	-2,5	Л	Л	Г	Н	0,4	
21	-9,0	-14,0	-4,2	Л	Ц	Л		0,8	
22	-6,0	-20,0	-11,7	Г	Г	Г		0,8	
23	-10,0	-20,0	-8,3	Ц	Ц	Ц		1,4	
24	-12,0	-21,0	-7,5	л	Ц	Ц			
25	-11,0	-18,0	-5,8	Ц	Ц	Ц			
26	-9,0	-20,0	-9,2	Ц	Ц	Ц			
27	-8,0	-19,0	-9,2	Ц	Л	Л			
28	-11,0	-21,0	-8,3	Г	Г	Л	Н		
29	-11,0	-20,0	-7,5	АЦ	АЦ	Ц	Н		
30	-12,0	-19,0	-5,8	АЦ	АЦ	Ц	Н	0,9	

В преобладающем большинстве, градиенты температуры, превышающие критические значения появляются в местах с низким давлением в 67% случаев.

В течение 18 дней из 30, в апреле 2020 года в районе АМСГ Мурманск наблюдались такие значения градиентов температуры, которые превышали критические, равные 7,0 °С/км. Рисунок 3.3 наглядно это иллюстрирует.

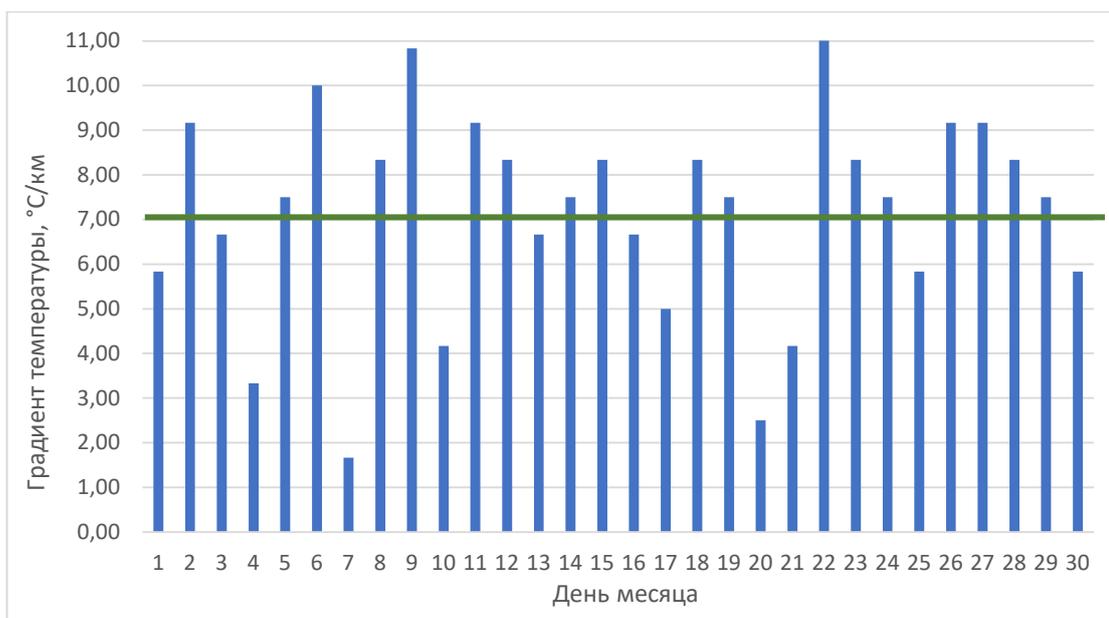


Рисунок 3.3- График распределения градиентов температуры в течение апреля в слое 850-700 гПа.

В столбце с градиентами жирным шрифтом выделены дни, когда наблюдались минимальные значения градиентов, которые не превышают критические значения. Их можно разделить на две группы: первая, где минимальные значения градиентов находятся в области пониженного давления, а вторая- в области повышенного. Таким образом, в первой группе будет 8 дней, а во второй 4, 67% и 33% соответственно. В свою очередь, каждую из групп можно разделить еще на две. Группу, с повышенным давлением (7, 10, 16 и 30 числа) делим на высокие барические образования (до 500 гПа)- 2 случая (10 и 30 числа) и низкие барические образования (до 850 гПа)- 2 случая (7 и 16 числа). Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что минимальные градиенты температур в области повышенного давления наблюдаются в одинаковом количестве, как в высоких, так и в низких, а значит дать однозначный ответ о зависимости не представляется возможным. Но, если взять во внимание, что в один из рассматриваемых дней (16 числа) градиент равен 6,7 °/км, что очень близко к значению 7,0 °/км, то можно вы-

явить некоторую зависимость. Тогда, обратим внимание на инверсии и скажем, что при высоких барических образованиях с повышенным давлением минимальные градиенты будут в тех случаях, когда присутствуют большие значения инверсии. Группу с пониженным давлением также поделим на две, с низкими и высокими барическими образованиями. В первой группе оказалось три дня (3, 13 и 20 числа), а во второй 5 дней (1,4,17,21 и 25 числа). Группу с низкими барическими образованиями составляют три дня, в двух из которых градиенты равны $6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, что очень близко к критическому значению $7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если предположим, что эти значения являются критическими, а также обратим внимание на инверсию и изотермию, то можем выявить закономерность: градиенты температуры будут минимальные в низких барических образованиях в тех случаях, когда в слое присутствует инверсия. В группе с высокими барическими образованиями закономерности выявить не удалось.

Также, в таблице в столбце «Дата» жирным шрифтом выделены дни, в которых наблюдались самые большие градиенты температуры, а именно 9 и 22 апреля. 9 апреля градиент составил $10,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, в момент измерений АМСГ Мурманск находился в поле высокого барического образования с низким давлением (у земли циклон). Данных о наличии инверсии и изотермии обнаружено не было. 22 апреля градиент составил $11,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, на момент измерений город был в поле высокого барического образования с высоким давлением (гребень на всех высотах от земли до $5,5\text{ км}$). В слое от $1,5$ до $3,0\text{ км}$ была зафиксирована инверсия $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Далее, проанализируем июль. Рассмотрим такие же параметры, как и в случае с апрелем. Данные приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Метеорологические параметры для г. Мурманска (июль 2020 г.)

Дата	Температура, °С		dt/dz, °С/км	Барические образо- вания			Низкие Б.О.	Инверсии, °С	Изотермия, м
	850	700	850- 700	Земля	850	500		850-700	850-700
1	14,0	1,0	-10,8	Ц	Ц	Г	Н		369,0
2	4,0	-2,0	-5,0	Ц	Ц	Л		0,6	
3	3,0	-4,0	-5,8	Ц	Ц	Л		0,4	
4	4,0	-3,0	-5,8	Ц	Л	Л			
5	4,0	-5,0	-7,5	Ц	Л	Л			
6	4,0	-3,0	-5,8	Л	Л	Л			
7	4,0	-5,0	-7,5	Ц	Ц	Ц		1,4	
8	8,0	-3,0	-9,2	Ц	Ц	Г	Н		
9									
10	5,0	-3,0	-6,7	Ц	Ц	Г	Н		
11	2,0	-6,0	-6,7	Ц	Ц	Л			
12	4,0	-5,0	-7,5	Ц	Ц	Ц			
13	3,0	-7	-8,3	Л	Г	Г	Н		
14	3,0	-5,0	-6,7	Г	Г	Г	Н		163,0
15	3,0	-5,0	-6,7	Г	Л	Л	Н	0,4	
16	6,0	-6,0	-10,0	АЦ	Г	Г			
17	6,0	-5,0	-9,2	Г	Г	Л	Н		
18	10,0	-2,0	-10,0	Л	Г	Л	Н		
19	9,0	0,0	-7,5	Г	Г	Г			
20	9,0	3,0	-5,0	Г	АЦ	Г	Н	2,2	
21	11,0	1,0	-8,3	Г	АЦ	АЦ			
22	13,0	3,0	-8,3	Л	Л	Г	Н		33,0
23									
24	13,0	4,0	-7,5	Ц	Ц	Ц		0,4	
25	8,0	1,0	-5,8	Л	Ц	Ц		0,8	
26	8,0	-1,0	-7,5	Г	АЦ	АЦ			
27	8,0	-3,0	-9,2	Г	АЦ	АЦ			11,0

28	8,0	-3,0	-9,2	Г	Г	Г			
29	8,0	-2,0	-8,3	АЦ	Г	Г			
30	7,0	-1,0	-6,7	Г	Г	Г			
31	4,0	-4,0	-6,7	Ц	Ц	Ц			176,0

В течение месяца градиентов температуры, которые превышают критические значения почти столько же, сколько и значений, которые не превышают их, 17 и 12 соответственно. (два дня выпадают, так как нет данных). Рисунок 3.5 наглядно это иллюстрирует.

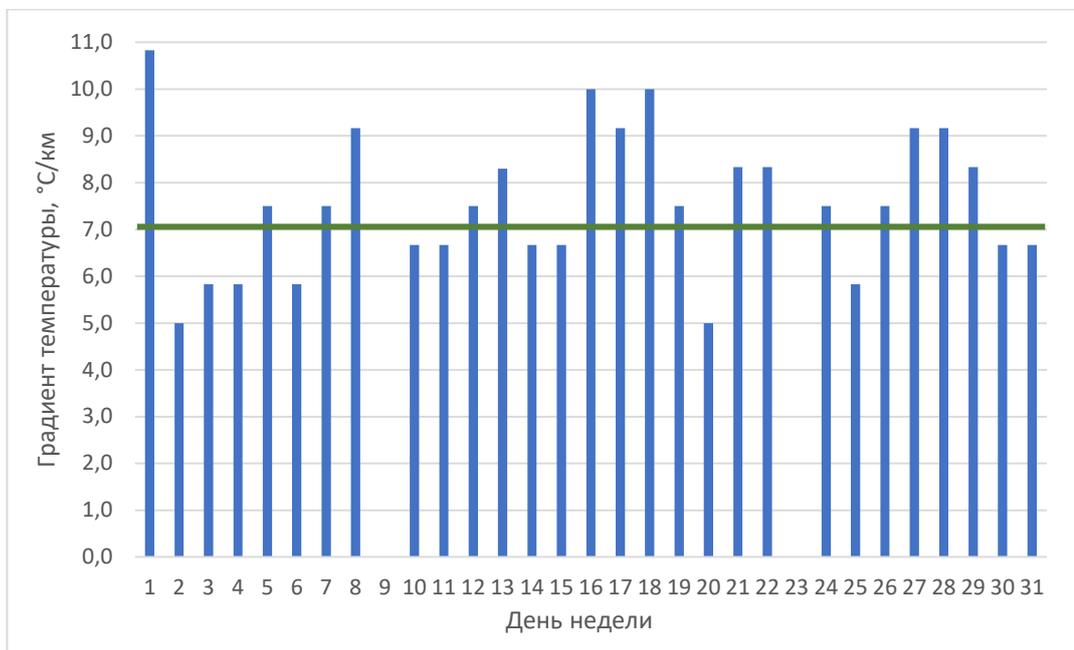


Рисунок 3.5 - График распределения градиентов температуры в течение июля в слое 850-700 гПа.

Градиенты температуры, превышающие критические значения, появляются в полях низкого давления почти так же часто, как и в полях высокого давления, в 59% и 41% соответственно.

Рассмотрим данные из таблицы 3.3. В столбце градиентов температуры жирным шрифтом выделены значения минимальных температурных градиентов. Из 12 лишь 2 на находятся в низком барическом образовании, остальные 10- в высоком. Нужно отметить, что эти значения близки к критическим.

7 из 10 случаев низких значений градиентов температуры наблюдаются в высоких барических образованиях в поле низкого давления, и соответственно, 3 случая в высоких барических образованиях, но в поле высокого давления. В высоких барических образованиях, при больших значениях изотермии градиент температуры будет небольшой (но, нужно отметить, что по нашим значениям, он не достигает критических, но, близок к ним). Других связей между градиентами температуры, высокими барическими образованиями и слоями инверсии и изотермии выявлено не было.

Данный случай Мурманска был интересен тем, что в течение зимнего, весеннего и летнего сезонов наблюдалось превышение критических значений градиентов температуры в слое от 1,5 до 3,0 км. Для полного, правильного и точного анализа необходимо изучить гораздо большую выборку случаев, а также большее количество предикторов.

Большие градиенты температуры в этом слое в летнее время можно связать с влиянием подстилающей поверхности, она прогревает пограничный слой до высоты в 1,5 км, а далее, уже более холодный воздух. Отсюда и появляются градиенты, близкие к критическим значениям.

Физико-географическое положение Мурманска

Мурманск расположен на Кольском полуострове, в северной его части на восточном побережье, в 50 км от Баренцево моря. На востоке от города расположено множество сопок, высоты которых достигают от 100 до 250 м. Город расположен на равнине, но, слегка всхолмленной. Так как Баренцево море находится на севере от Мурманска, а сам материк на юге, то, как следствие, в теплый и холодный периоды года возникают сильные градиенты в полях большинства метеорологических величин, а значит и изменчивость погоды во времени, при смене направления адвекции воздушных масс. Кольский залив оказывает влияние непосредственно на близлежащие районы. Также, в Мурманской области расположен горный массив Хибины на расстоянии около 120 км от Мурманска. [9]

Заключение

Целью данной бакалаврской работы является исследование условий, приводящих к возникновению интенсивной турбулентности для повышения эффективности метеорологического обеспечения полетов в районе исследования. Для достижения поставленных целей были поставлены следующие задачи:

В ходе данной работе для достижения цели были решены следующие задачи. Изучены физические процессы, приводящие к формированию и развитию турбулентности, рассмотрены методы оценки влияния турбулентности на полеты ВС, описаны характеристики турбулентности и их влияние на полеты ВС при различных метеоусловиях, изучены методы прогноза турбулентности, проведен анализ данных и рассчитаны градиенты метеовеличин, выявлены районы с вертикальными градиентами, превышающими критические значения. На основании этого были сделаны следующие выводы.

В северной части Северо-Западного федерального округа из рассматриваемых городов наиболее подверженным турбулизации атмосферы оказался район города Мурманска, слой, в котором наблюдались превышения критических значений 850-700 гПа (1,5-3,0 км) по градиенту температуры в зимнем, весеннем и летнем сезонах. А также район города Нарьян-Мара также подвержен турбулентности в слое от земли до 1,5 км в летний сезон. На основе выявленных превышений градиентов температуры было решено рассмотреть закономерности их появления. Далее, представлены выводы, которые удалось сделать.

В зимний период(январь) за весь месяц в 74% случаев (23 дня) над территорией Мурманска преобладали ложбины и циклоны. В 28 днях из 31 наблюдались градиенты температуры, которые превышали критические значения. Из 28 случаев со значениями градиентов большими или равными критическим, 23 наблюдались в ложбинах и циклонах и 5- в гребнях. Сделаем вывод, что максимальные значения градиентов температуры в слое от 1,5 до

3,0 км в зимний период преобладают в циклонах и ложбинах. В 36% из общего количества градиентов температуры, которые превышают критические значения наблюдалась инверсия. В 55% из числа низких барических образований с высокими градиентами температуры наблюдалась инверсия.

Весной(апрель) в 67% случаев (20 дней) над территорией Мурманска преобладают циклоны и ложбины. В 18 днях из 30 наблюдались такие значения градиентов температуры, которые превышали критические значения. Из 18 случаев со значениями градиентов большими или равными критическим, в 12 случаях наблюдались ложбины и циклоны и в 6 случаях гребни и антициклоны. Можно сделать вывод, что максимальные значения градиентов температуры в слое от 1,5 до 3,0 км в весенний период преобладают в циклонах и ложбинах. В 18% от общего количества дней со значениями градиентов большими или превышающими критические значения наблюдались поля инверсии и/или изотермии.

В летний период(июль) 57% случаев (17 дней) над территорией Мурманска преобладают барические образования с низким давлением циклоны и ложбины. В 17 днях из 29 (два дня выпадают, так как не было данных) наблюдались градиенты температуры, которые превышали критические значения. Из 17 случаев со значениями градиентов большими или равными критическим, в 9 случаях наблюдались ложбины и циклоны и в 8 случаях гребни и антициклоны. Можно сделать вывод, что максимальные значения градиентов температуры в слое от 1,5 до 3,0 км в летний период распределены равномерно, в циклонах и ложбинах, а также в поле повышенного атмосферного давления антициклонах и гребнях. В 29% от общего количества дней со значениями градиентов большими или превышающими критические значения наблюдались поля инверсии и/или изотермии. В 2-х из 5-ти при ложбинах и циклонах наблюдалась инверсия.

Сравнивая три сезона друг с другом, можно сказать следующее: во все рассматриваемые сезоны преобладают циклоны и ложбины, а так как по большей части, турбулентность образуется в ложбинах и циклонах, то, мож-

но сказать, что вероятность образования турбулентности при их преобладании- возрастает. Также можно сказать, что по полученным данным не удалось выявить взаимосвязи между высотой барического образования и высокими значениями вертикальных градиентов температуры. Также не выявлена четкая зависимость между высокими значениями вертикальных градиентов температуры и наличием инверсии и изотермии в исследуемом слое. Для выявления более точной зависимости между вертикальными градиентами температуры, барическими образованиями, инверсиями и изотермиями нужно взять большую выборку данных за несколько лет.

На основании физико-географического положения города Мурманска можно сделать вывод, что именно оно в наибольшей степени влияет на формирование высоких значений вертикальных градиентов температуры, сказывается близость Баренцево моря.

Список используемых источников

1. Турбулентность в свободной атмосфере / Отв.ред Л.С. Гандин.–Л: Гидрометеорологическое издательство Ленинград, 1968.– 336 с.
2. Богаткин, О.Г. Основы авиационной метеорологии. Учебник.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2009.–339 с.
3. Богаткин, О.Г. Авиационные прогнозы погоды.– 2-е издание, стереотипное.– СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 288 с.
4. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология. Учебное пособие для летного и диспетчерского состава ГА. – Е.: Изд. Уральский УТЦ ГА, 2010 – 113 с.
5. Матвеев, Л.Т. Физика атмосферы. Учебник. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000.– 778 с.
6. JSC-ams.com: сайт. –2017. – URL: <http://jsc-ams.com/monocle/index.html> (дата обращения: 5.04.21).
7. Nplus1.ru: сайт- 2015. – URL: <https://nplus1.ru/about> (дата обращения: 5.04.21).
8. Eту.ru: сайт-1995.– URL: <https://etu.ru/ru/nauchnaya-i-innovacionnaya-deyatelnost/novosti1/mne-sverhu-vidno-vse-lazernyj-lidar-iz-leti-obespechit-bezopasnost-aviapoletov> (дата обращения: 5.04.21).
9. Яковлев Б.А. Климат Мурманска. – Гидрометеорологическое издательство Ленинград, 1972.– 108 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица исходных данных о температуре, скорости и направлении ветра для исследуемых городов

Северо-Западного федерального округа

Аэродром	№ месяца	Средняя температура, °С				Средняя скорость ветра, м/с				Среднее направление ветра, град.				Средняя высота, м			
		Земля	850	700	500	Земля	850	700	500	Земля	850	700	500	Земля	850	700	500
Сыктывкар	1	-7,9	-11,7	-18,3	-33,9	3,2	10,4	11,3	14,5	210,0	252,6	261,3	277,7	0,0	1300	2800	5300
	4	-0,3	-5,1	-14,2	-30,1	2,3	9,4	11,0	14,2	150,4	208,3	223,8	214,3	0,0	1500	3000	5500
	7	14,6	11,6	2,0	-14,3	2,2	6,8	8,5	12,7	125,6	194,6	214,1	240,4	0,0	1500	3000	5600
	10	2,2	-1,5	-8,7	-24,1	2,4	10,2	12,9	17,2	208,3	256,8	245,2	253,2	0,0	1500	3000	5500
Архангельск	1	-7,1	-9,5	-17,6	-33,6	2,5	11,1	12,4	18,0	203,2	241,6	280,3	316,8	0,0	1300	2800	5300
	4	-1,7	-8,1	-17,5	-33,0	2,1	9,3	11,7	13,1	209,3	240,3	219,0	260,0	0,0	1300	3000	5500
	7	14,0	7,8	-0,9	-15,6	1,4	7,8	9,4	13,3	120,4	173,8	190,4	184,1	0,0	1500	3000	5600
	10	4,0	-2,0	-9,2	-22,6	2,2	8,1	9,1	14,6	161,3	229,0	248,0	252,0	0,0	1500	3000	5500
Мурманск	1	-8,6	-9,7	-18,1	-33,9	3,8	11,2	10,8	16,7	215,9	235,5	265,2	298,7	0,0	1300	2200	5100
	4	-1,6	-9,3	-17,9	-32,4	5,1	11,5	11,7	15,7	150,7	171,7	199,3	194,7	0,0	1300	2500	5400
	7	13,8	6,7	-2,3	-18,8	2,9	6,6	8,8	10,6	129,7	188,6	183,6	199,0	0,0	1800	3000	5600
	10	3,1	-3,1	-10,7	-25,1	2,8	8,0	8,4	10,3	172,8	195,8	220,3	244,0	0,0	1300	2900	5300
Нарьян-Мар	1	-13,3	-13,3	-21,5	-37,2	3,4	9,9	11,1	13,4	182,3	218,1	232,9	250,0	0,0	1300	2500	5100
	4	-1,3	-9,7	-18,4	-34,0	4,2	7,7	9,1	11,0	172,8	194,5	199,3	218,7	0,0	1300	2700	5350
	7	19,7	7,1	-0,5	-16,2	2,6	6,9	7,9	10,0	128,1	177,6	187,5	221,0	0,0	1600	3000	5550
	10	0,3	-5,3	-11,9	-27,3	3,1	8,7	9,8	12,2	180,7	205,0	216,7	241,0	0,0	1300	2850	5300
Воркута	1	-15,6	-15,0	-22,5	-37,4	6,6	10,4	10,4	12,4	180,3	226,1	244,8	244,5	0,0	1300	2800	5100
	4	-5,4	-7,4	-16,1	-31,7	5,5	10,1	12,6	17,9	161,1	193,4	206,7	212,7	0,0	1300	2900	5300
	7	11,0	6,2	-1,6	-16,7	2,5	6,9	10,0	13,6	141,0	214,1	219,6	236,9	0,0	1400	3000	5600
	10	-1,9	-7,1	-13,6	-27,9	4,5	9,9	10,1	14,1	189,3	197,6	258,3	261,0	0,0	1300	2900	5300

Приложение Б

Осредненные значения градиентов температуры, скорости и направления ветра в слоях 0-850 гПа, 850-700 гПа, 700-500 гПа, за январь, апрель, июль и октябрь

на территории пяти исследуемых городов Северо-Западного федерального округа

Аэродром	№ месяца	dt/dz, °C/км			dv/dz, м/с/км			dd/dz, град./км		
		0-850	850-700	700-500	0-850	850-700	700-500	0-850	850-700	700-500
Сыктывкар	1	2,9	4,4	6,2	5,5	0,6	1,3	41,2	5,8	2,7
	4	3,2	6,0	6,4	4,7	1,0	1,3	26,1	10,8	4,0
	7	2,0	6,4	6,3	3,1	1,1	1,6	40,3	16,0	6,9
	10	2,5	4,8	6,2	5,2	1,8	1,7	38,4	7,7	5,5
Архангельск	1	1,9	5,4	6,4	6,6	0,8	2,3	47,4	15,9	11,0
	4	4,9	5,5	6,2	5,5	1,4	0,6	52,2	7,3	10,5
	7	4,1	5,8	5,6	4,2	1,1	1,5	43,5	1,0	1,4
	10	4,0	4,8	5,3	4,0	0,6	2,2	41,8	4,8	5,8
Мурманск	1	0,9	9,4	5,4	5,7	0,4	2,0	18,3	34,7	5,4
	4	5,9	7,2	5,0	4,9	0,2	1,4	25,4	11,4	2,5
	7	3,9	7,4	6,4	2,0	1,8	0,7	20,3	2,7	4,5
	10	4,7	4,8	6,0	4,0	0,2	0,8	35,3	7,3	10,8
Нарьян-Мар	1	0,0	6,9	6,0	5,0	1,0	0,9	21,7	11,3	3,6
	4	6,5	6,2	5,9	2,7	1,0	0,7	40,3	8,1	7,3
	7	7,9	5,4	6,1	2,7	0,7	0,8	23,9	3,4	5,6
	10	4,4	4,2	6,3	4,3	0,7	1,0	37,4	13,8	4,9
Воркута	1	0,4	5,0	6,5	2,9	0,0	0,9	32,4	6,9	2,5
	4	1,6	5,4	6,5	3,5	1,6	2,2	34,0	8,4	2,5
	7	3,4	4,9	5,8	3,2	1,9	1,4	28,7	2,7	8,5
	10	4,1	4,1	5,9	4,1	0,1	1,6	25,7	15,0	3,7