



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Совершенствование метода прогнозирования тумана
на аэродроме Иркутск»

Исполнитель Ахмадеева Алина Илдаровна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Волобуева Ольга Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 11 » февраля 2024 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Сокращения.....	4
Введение.....	5
1. Классификация туманов и условия их образования.....	7
1.1 Классификация туманов.....	7
1.2 Физические условия образования туманов различных видов.....	9
1.3 Метеорологические и синоптические условия образования туманов	12
1.4 Методы прогноза тумана.....	16
1.5 Методы прогноза тумана, используемые специалистами на аэродроме Иркутск.....	24
2. Физико-географические особенности аэродрома Иркутск.....	26
2.1 Физико-географическое описание аэродрома Иркутск.....	26
2.2 Климатическое описание аэродрома Иркутск	29
2.3 Влияние тумана на авиацию	33
3. Особенности образования туманов на аэродроме Иркутск	34
3.1 Анализ повторяемости туманов на аэродроме Иркутск	34
3.2 Классификация туманов на аэродроме Иркутск	41
3.3 Типизация синоптических условий образования туманов на аэродроме Иркутск.....	43
3.4 Условия образования туманов на аэродроме Иркутск	45
3.5 Анализ синоптических и метеорологических условий образования туманов на аэродроме Иркутск.....	50
4. Рекомендации по прогнозированию тумана специалистам АМЦ Иркутск	70
4.1 Оправдываемость расчетного метода прогноза тумана	70

4.2 Методы улучшения прогноза тумана на аэродроме Иркутск	74
Заключение.....	78
Список литературы	81

Сокращения

АМЦ – авиационный метеорологический центр;

АТ – абсолютная топография;

ВПП – взлетно-посадочная полоса;

ВС – воздушное судно;

ВСВ – всемирное скоординированное время;

ВФЗ – высотно фронтальная зона;

КВС – командир воздушного судна;

МДВ – метеорологическая дальность видимости;

ОЯ – опасное явление.

Введение

Туман представляет собой концентрацию конденсированных водных частиц, находящихся во взвешенном состоянии в приземных слоях атмосферы [1]. Кроме того, туман характеризуется снижением прозрачности воздуха до такой степени, что горизонтальная видимость сокращается до менее чем одного километра.

Туман представляет собой опасное метеорологическое явление (ОЯ). Для обеспечения безопасности полётов на аэродроме важно отслеживать время формирования и рассеивания тумана, а также оценивать его интенсивность. Именно поэтому данная тема является актуальной. Одной из наиболее серьёзных угроз для безопасности полетов считается туман. Это опасное явление снижает метеорологическую дальность видимости, затрудняя взлёт и посадку воздушных судов, вызывая задержки и отмены рейсов. В некоторых случаях сильный туман может приводить к закрытию аэропорта. Всё вышесказанное подчёркивает значимость этого метеорологического явления, требующего детального анализа факторов, способствующих его возникновению, и разработки методов прогнозирования. Прогнозирование времени рассеивания тумана позволяет заранее информировать диспетчеров, пилотов и других участников авиасообщения, тем самым содействуя корректировке расписаний и предотвращению задержек вылетов либо своевременному уведомлению о завершении неблагоприятных погодных условий.

Туманы являются частыми и крайне нежелательными явлениями, оказывающими негативное влияние на работу авиации, морских и наземных транспортных систем. Поэтому изучение условий их образования имеет большое практическое значение.

Объект исследования – туманы, возникающие на территории аэродрома Иркутска.

Предмет исследования – условия формирования туманов в районе аэродрома города Иркутск.

Цель работы – провести анализ условий образования туманов на аэродроме Иркутск и предложить решение для улучшения прогнозирования тумана.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить физико-географические и климатические характеристики района расположения аэродрома Иркутск.
2. Проанализировать метеорологические, синоптические и физические факторы, влияющие на формирование туманов на данном аэродроме.
3. Выявить основные синоптические процессы, способствующие образованию туманов в пределах аэродрома.
4. Рассмотреть примеры продолжительных туманов на основе выявленной типизации условий их формирования.
5. Провести апробацию метода прогноза для типа тумана с наибольшей повторяемостью.

Для изучения условий образования туманов на аэродроме Иркутск использовались данные наблюдений за погодой с 2019 по 2023 год, предоставленные АМЦ Иркутск, а также синоптические карты. В работе использовались данные радиозондирования атмосферы с метеорологической станции Ангарск.

1. Классификация туманов и условия их образования

1.1 Классификация туманов

Туман — это опасное природное явление, возникающее вследствие образования мелких капель воды или ледяных кристаллов близко к земле, что приводит к значительному снижению видимости [2]. В условиях тумана полеты авиации становятся особенно рискованными [3].

С точки зрения физики, туман возникает тогда, когда воздух насыщается влагой до состояния, близкого к точке росы, и мелкие водяные капли конденсируются вокруг ядер конденсации, таких как пыль, соль или дымовые частицы [2].

Образование тумана зависит от множества факторов, среди которых ключевыми являются:

- Температура и влажность воздуха: чем ближе температура воздуха к точке росы, тем вероятнее образование тумана;
- Скорость ветра: низкая скорость ветра способствует удержанию охлаждающегося воздуха вблизи поверхности, увеличивая шансы на возникновение тумана;
- Наличие ядер конденсации: пыль, соли и другие примеси в воздухе служат центрами конденсации для водяных паров;
- Синоптическая ситуация: определённые типы синоптических процессов, такие как циклоны и антициклоны, влияют на распределение температур и влажности, создавая благоприятные условия для образования тумана.

Прогнозирование туманов является сложной задачей, учитывая множество переменных, участвующих в процессе их формирования [4]. Однако современные методы включают использование численных моделей атмосферы, которые учитывают различные параметры, такие как температура, влажность,

ветер и наличие ядер конденсации. Эти модели позволяют предсказывать вероятность возникновения тумана с определённой степенью точности.

Кроме того, применяются эмпирические подходы, основанные на анализе фактических данных и выявлении закономерностей между метеорологическими параметрами и возникновением туманов.

Туманы возникают тогда, когда парциальное давление водяного пара в нижних слоях атмосферы превышает уровень давления насыщения, а относительная влажность воздуха приближается к 100%. В зависимости от агрегатного состояния влаги, туманы классифицируются на три основные категории [2]:

- 1) Капельножидкие туманы;
- 2) Кристаллические или ледяные туманы;
- 3) Смешанные туманы.

По условиям своего образования туманы можно классифицировать следующим образом:

Существует несколько видов туманов, классифицируемых по механизму их образования (рис. 1.1):

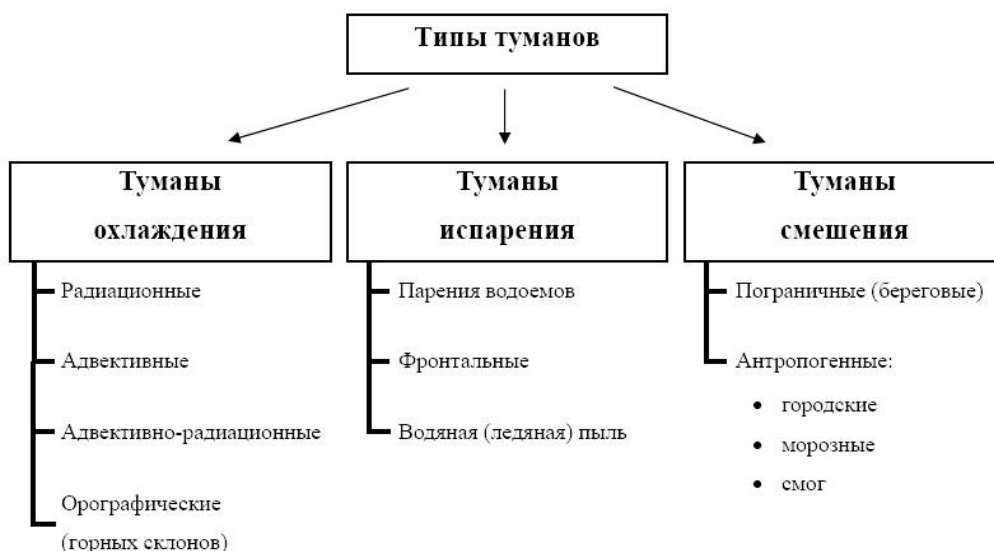


Рис. 1.1 – Классификация туманов

Туманы могут формироваться не только внутри однородных воздушных масс (так называемые внутримассовые туманы), но и вдоль атмосферных фронтов (фронтальные туманы). Среди внутримассовых туманов выделяют туманы охлаждения и туманы испарения [2].

В зависимости от высоты верхней границы тумана можно выделить следующие типы: приземные туманы, высота которых составляет до двух метров; низкие туманы, достигающие от двух до десяти метров; средние туманы, простирающиеся от десяти до ста метров; и высокие туманы, верхние пределы которых превышают сто метров [2].

Когда видимость остается относительно стабильной на протяжении определенного периода времени, такой туман называют устойчивым. В некоторых случаях, особенно в горах, на островах и побережьях, туман может проходить мимо наблюдателя отдельными облаками или волнами. В этих ситуациях видимость резко меняется — от значений менее 1 км до более 1 км в разных направлениях. Такой туман принято называть неустойчивым. Если же периодически, когда отдельные облака тумана уходят, видимость во всех направлениях становится лучше 1 км, то этот туман считается прерывистым [2].

1.2 Физические условия образования туманов различных видов

Формирование тумана является результатом сложного взаимодействия множества климатических и метеорологических факторов. Чтобы понять механизмы, лежащие в основе образования туманов, необходимо рассмотреть физические условия, при которых они возникают [5]. Различные виды туманов отличаются друг от друга условиями, необходимыми для их появления, и эта глава посвящена подробному анализу этих условий.

В атмосфере вода способна пребывать в одном из трёх своих фазовых состояний: твёрдой, жидкой или газообразной формах. Водяной пар неизменно содержится в атмосфере, в то время как капли жидкости или её твёрдые формы

(льдинки, снежинки, крупа) обнаруживаются исключительно при конкретных условиях. В ряде случаев капли и кристаллы сохраняются значительное время, формируя постоянные туманы или облака; в иных обстоятельствах наблюдаются существенные отклонения от устойчивого состояния — туманы или облака формируются, сгущаются или, наоборот, разрежаются и пропадают [6].

В приземном слое атмосферы нередко происходит преобразование водяного пара в жидкость или твёрдые частицы, что приводит к образованию тумана или дымки.

Однако в абсолютно чистом воздухе, свободном от посторонних примесей и заряженных частиц (ионов), процесс конденсации не запускается, даже если степень насыщения пара значительно превосходит норму по отношению к плоской водной поверхности [6].

Когда в атмосфере присутствуют несмачиваемые пылевые частицы, они практически не влияют на процесс конденсации водяного пара. Однако, если в воздухе содержатся смачиваемые или, особенно, гигроскопичные аэрозольные частицы, такие как те, что образуются в результате сгорания топлива, наличия морской соли и других подобных факторов, конденсация пара на них начинается почти моментально после достижения относительной влажности 100%. Это происходит без необходимости создания условий перенасыщения относительно гладкой водной поверхности. На сильно гигроскопичных частицах конденсация может начинаться даже при влажности около 80-90%. Эти мельчайшие частицы, плавающие в воздухе, играют роль центров притяжения молекул и называются ядрами конденсации [6].

Многообразие типов туманов обусловлено сложным сочетанием одновременно действующих факторов, ведущих к их формированию. Образование тумана обусловлено несколькими ключевыми процессами. Радиационное охлаждение земной поверхности и прилегающего воздушного слоя способствует возникновению радиационных туманов. А адвективные

туманы появляются при перемещении теплого воздушного потока над холодным основанием. Еще один механизм связан с адиабатическим охлаждением воздуха при его подъёме вдоль горных склонов, что вызывает образование туманов склонов. Следующий тип туманов возникает благодаря конвекционному перемешиванию воздуха, когда холодный воздушный слой находится над теплым водоемом, создавая эффект парения. Наконец, береговые туманы формируются при встрече воздушных масс различной температуры, особенно часто встречаясь в прибрежных районах. Приток водяного пара в приземный слой воздуха вместе с продуктами сгорания большого количества топлива в печах промышленных объектов, двигателях внутреннего сгорания и отопительных системах в населённых пунктах и на крупных аэродромах (городские туманы) [7].

Турбулентные потоки воздуха играют важную роль во всех этих процессах, способствуя распространению холода от поверхности земли на более верхние слои атмосферы.

На образование и рассеяние туманов могут воздействовать различные дополнительные факторы. Например, увлажнение и охлаждение воздуха происходят за счёт испарения выпавших осадков и испарения с поверхности земли. Конденсация водяного пара или его переход в твёрдое состояние (сублимация) также может происходить прямо на земной поверхности. Важную роль играют состав и состояние почвы, а также характер рельефа местности. Кроме того, понижение давления в движущихся воздушных потоках и некоторые другие факторы тоже оказывают своё влияние на эти процессы [7].

Важно отметить, что взаимодействие этих факторов создает сложную картину условий, необходимых для формирования и поддержания тумана. Каждый из упомянутых факторов может вносить свой вклад в конечный результат, делая процесс образования тумана многогранным и зависящим от множества переменных. Туман может образовываться также благодаря опусканию облаков [6].

Иногда возникновение тумана связано с влиянием человека на атмосферу. Такие туманы называют антропогенными.

Антропогенные туманы чаще всего связаны с выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, которые способствуют конденсации водяного пара и образованию тумана. Примером таких выбросов могут служить выхлопные газы автомобилей, промышленные выбросы и дым от пожаров. Эти факторы создают условия, при которых туман может формироваться даже при относительно невысоких уровнях влажности [7].

Кроме того, деятельность человека может изменять микроклиматические условия, что также способствует образованию тумана. Например, строительство крупных городов и промышленных зон может приводить к локальному повышению температуры и изменению режима циркуляции воздуха, что создаёт предпосылки для формирования тумана [8].

1.3 Метеорологические и синоптические условия образования туманов

Рассмотрим подробнее метеорологические условия, способствующие образованию туманов.

Наиболее подходящие условия для образования радиационного тумана включают в себя: ночное снижение температуры в нижних слоях атмосферы до уровня точки росы происходит вследствие радиационного охлаждения земной поверхности и слабой турбулентности, которая затрудняет перемешивание воздушных масс между нижними и верхними слоями атмосферы [9]. Такие условия создают благоприятные предпосылки для конденсации водяного пара и дальнейшего появления тумана.

При отсутствии ветра воздух охлаждается довольно сильно, что ведет к образованию росы или инея; в этом случае туман либо вообще не возникает, либо появляется только в форме поземного тумана, распространяющегося слоем толщиной менее двух метров. Рассеивание радиационного тумана

происходит вследствие нагрева земной поверхности и разрушения слоя инверсии температуры воздуха после восхода Солнца [7].

Адвективный туман образуется при движении относительно теплой и влажной воздушной массы над холодной подстилающей поверхностью. Одним из признаков адвективного тумана являются слоистые облака, которые образуются незадолго до появления тумана. А туман в свою очередь может быть результатом опускания слоистого облака на поверхность земли благодаря постепенному охлаждению воздуха. Наиболее подходящие условия для образования адвективного тумана возникают при наличии значительного горизонтального температурного градиента подстилающей поверхности в направлении перемещения теплого воздуха и при умеренной скорости ветра. Рассеяние адвективного тумана преимущественно обусловлено изменениями в барическом поле [7].

Адвективно-радиационный туман формируется в холодный период года при медленном движении теплого воздуха и дополнительном ночном радиационном охлаждении нижнего слоя атмосферы. Такое явление возникает при относительно тонкой облачности или кратковременных прояснениях. После чего облака постепенно опускаются и переходят в туман [7].

Когда холодный воздух соприкасается с более тёплой водой, в условиях температурной инверсии на высоте нескольких сотен метров возникает туман испарения. Для образования тумана испарения требуется разница температур между водой и воздухом около 10–15 °С перед тем, как он переместится над водной поверхностью; при этом относительная влажность окружающего воздуха должна составлять 70–80%, а скорость ветра на высоте 10 метров – не превышать 1–3 м/с [7].

Основные причины образования орографических туманов заключены в адиабатическом охлаждении воздуха на 1 градус на каждые 100 метров при его подъёме на наветренные склоны гор и возвышенностей. К числу факторов, которые способствуют возникновению туманов на склонах, относятся также

радиационное охлаждение, турбулентный обмен с подветренными склонами или дном долины, присутствие ледников и другие местные особенности рельефа. Однако на подветренных склонах из-за фена, поднимающего сухой и тёплый воздух, часто отмечается хорошая горизонтальная видимость [7].

Туманы смещения (береговые) могут возникать в тех редких случаях, когда разница температур между двумя смешиваемыми воздушными массами велика, а оба потока воздуха находятся близко к насыщению. Когда два воздушных потока с различными температурами смешиваются, относительная влажность получившейся смеси оказывается выше среднего значения для исходных масс воздуха. В некоторых ситуациях это может спровоцировать конденсацию водяного пара, что, в свою очередь, способно привести к формированию тумана.

Фронтальный туман образуется, когда дождевые капли проникают в холодный и сухой воздух, увеличивая его влажность и повышая точку росы, что приводит к насыщению воздуха водяным паром и дальнейшему образованию тумана через процесс испарения. Туман также может формироваться из-за замедления движения холодного фронта. Кроме того, его возникновению могут способствовать адвективное и ночное радиационное охлаждение воздуха перед фронтом, а также адиабатическое охлаждение, происходящее при резком падении давления или подъеме по пологим склонам в предгорьях [10].

Ледяной или переохлажденный туман формируется в воздухе, когда температура поверхности опускается ниже точки замерзания (0°C). Капли в ледяном тумане остаются переохлажденными, то есть они сохраняют жидкое состояние, несмотря на температуру ниже точки замерзания. Они не замерзают в воздухе, потому что им не хватает ядра для образования кристаллов льда. Ледяной туман чаще встречается в местах с холодными зимами, особенно в районах, где господствуют холодные воздушные массы [10].

Переохлаждённые капли воды замерзают при соприкосновении с поверхностью, что приводит к образованию инея на земле или других объектах.

Этот процесс является опасным для авиации из-за обледенения ВС и техники [9].

Важно различать ледяной туман и морозный туман. В отличие от морозного тумана, ледяной туман состоит из капель жидкости и формируется при температурах вблизи или ниже точки замерзания. Хотя внешне морозный туман напоминает ледяной, его структура состоит из микроскопических льдинок, которые образуются в условиях сильного мороза [10].

Морозные туманы образуются, когда температура воздуха сильно понижается. Особенно сильно ухудшается МДВ, если появляется дополнительный источник водяного пара и взвешенных частиц (топка печей, работа двигателя самолета, паровоза и т.д.) [9]. Если сильный ветер отсутствует, а присутствует температурная инверсия, выбросы от сгорания топлива не распространяются на большие расстояния, а остаются сосредоточенными вблизи источника. Когда относительная влажность окружающей среды достигает определенного уровня при данной температуре, это приводит к переохлаждению относительно льда, в результате чего капельки воды замерзают, стремительно увеличиваясь в объеме, что способствует образованию морозного тумана. Так, например, при давлении 1013 гПа и относительной влажности 100% критической температурой является -29°C ; при 90% — -33°C ; при 60% — -36°C , а при 0% — -39°C [10].

Туманы в разных географических регионах формируются под влиянием сходных синоптических условий, однако специфические физико-географические характеристики вносят свои отличия [5].

Адвективные туманы образуются при адвекции тёплого влажного воздуха. Чаще всего то происходит у побережий морей или больших озёр. Благоприятными условиями для их образования является влияние западной периферии антициклона и передней части циклона.

Радиационные туманы образуются благодаря радиационному охлаждению земной поверхности и прилегающих слоёв атмосферы во время

антициклональной погоды. Такие туманы обычно возникают в центре антициклонов. Так же высока вероятность их образования вдоль осей барических гребней, а также в седловинах и размытых барических полях.

Адвективно-радиационные туманы появляются при юго-западных ветрах, например при влиянии теплого сектора циклона, а также северо-западной периферии антициклона.

Туманы могут образовываться вследствие смещения атмосферных фронтов. Такие туманы образуются обычно в ночное время суток перед или после прохождения фронта. Туманы могут формироваться при теплом фронте, фронте окклюзии и холодном фронте первого рода [10].

1.4 Методы прогноза тумана

Источником данных для прогноза туманов сегодня выступают такие предикторы, как температура воздуха, температура точки росы, дефицит точки росы, вертикальные градиенты температуры и влажности в приземном слое, относительная влажность воздуха на поверхности земли и другие характеристики [9].

Учитывая изменчивость метеорологических параметров в пространстве и времени, а также ограничения, связанные с точностью определения некоторых метеорологических показателей (например, приземного ветра и погодных явлений), точное значение любого из этих параметров, используемых в прогнозе, рассматривается как наиболее вероятно достижимая величина, которую этот параметр может принимать в течение времени действия прогноза [9].

Прогнозы погоды составляются на нескольких принципах:

- 1) Инерционный прогноз предполагает, что текущая погода останется такой же, как сейчас. Эффективность таких прогнозов достаточно низка и составляет около 67%.

2) Климатический прогноз ориентирован на долгосрочные тенденции климата и включает анализ прошлых сезонов. Он обеспечивает лучшее понимание долгосрочных тенденций погоды, но его точность может варьироваться в зависимости от текущего состояния климата.

3) Экстраполяционный прогноз основан на экстраполяции текущих погодных условий в будущем. Его точность зависит от правильного понимания динамики природных процессов. Прогноз основывается на линейных или других физических функциях.

4) Методический прогноз основывается на применении определенной методики, эффективность которой напрямую связана с качеством используемых инструментов и подходов.

Результаты прогнозирования могут быть представлены в нескольких формах:

- Альтернативные прогнозы дают ответ на вопрос, произойдёт ли определённое погодное явление или нет;
- Вероятностные прогнозы оценивают вероятность наступления события, например, туманов, осадков или изменения температуры.

Такая гибкость позволяет адаптировать прогнозы под различные потребности пользователей, обеспечивая высокую степень достоверности и надёжность [11].

Методы прогнозирования туманов разделяются на синоптические, расчетные и синоптико-статистические.

Синоптический метод прогноза – один из самых популярных и простых способов прогнозирования погоды. Он базируется на тщательном анализе текущей синоптической обстановки, включая синоптические карты, барометрические карты, данные о температуре, влажности и других метеорологических показателях. Синоптик оценивает текущую ситуацию и делает вывод о вероятности возникновения какого-либо природного явления, например, тумана, дождя или ветра. Этот метод даёт быстрый и простой

результат, но его эффективность зависит от квалификации и опыта синоптиков, а также от качества используемых данных, т.е. метод является субъективным.

Расчётный метод прогноза является одним из точных методов прогнозирования погоды. Он базируется на математических расчётах, которые могут выполняться вручную или с помощью компьютера. Результаты расчёта позволяют сделать вывод о текущем состоянии погоды и оценить вероятность возникновения определённого явления, например, тумана, дождя или ветра. Расчётный метод довольно простой и быстрый, но требует хорошей базы данных и понимания основ математических формул.

Численный метод прогноза является одним из наиболее современных методов прогнозирования погоды. При численном моделировании пишутся программы с использованием вычислительной техники и гидродинамических уравнений атмосферы. Прогноз погоды численным методом стоит, рассчитывая метеорологические параметры и другие важные показатели, используя сложные математические уравнения и моделирующие поведение воздуха в реальном времени. Этот метод дает более точные результаты, чем традиционные способы прогнозирования, такие как синоптический или расчётный методы, но требует мощных вычислительных ресурсов и специальных знаний в области программирования и метеорологии.

Физико-статистический метод прогноза — один из наиболее распространенных и эффективных методов прогнозирования погоды. Он основывается на статистическом анализе взаимосвязей между различными метеорологическими показателями и физическими характеристиками атмосферы. Основная идея этого подхода заключается в установлении корреляционной зависимости между какими-либо двумя параметрами, например, температурой воздуха и относительной влажностью. Известно, что при низких температурах туман нередко появляется даже тогда, когда относительная влажность меньше 100%. Следовательно, для каждого отдельного региона можно выявить корреляцию между этими показателями и

применять её для предсказания вероятности образования тумана. Однако важно помнить, что он работает эффективно только в рамках одного региона, поскольку метеорологические условия могут меняться в зависимости от географии и климатических особенностей [12].

Синоптико-статистический метод прогноза является мощным инструментом для прогнозирования погоды, особенно для выявления закономерностей и тенденций, связанных с различными природными явлениями. Этот метод основывается на статистическом анализе взаимоотношений между погодными событиями и условиями, в которых они происходят. Например, можно выявить корреляцию между определённым типом погоды и набором характеристик атмосферы, таких как температура, влажность, давление и другие параметры. Затем эту корреляцию можно использовать для прогнозирования вероятности того или иного события, например, тумана, дождя или ветра. Хотя этот метод и полезен, он требует глубокого понимания статистики и анализа данных, собранных за длительный период времени, чтобы обеспечить точную оценку вероятности событий [9].

К авиационным прогнозам погоды есть определенные требования. Авиационные прогнозы отличаются от обычных прогнозов своей предельной точностью во времени начала, окончания и продолжительности явления погоды или показателей метеорологических величин, таких как высота нижней границы облачности (ВНГО), видимость, скорость и направление ветра, минимальное давление, а иногда и температура. Авиационный прогноз погоды записывается в виде текстовых сообщений, который закодирован определенным образом для передачи по каналам связи. Такой прогноз, ввиду особенностей, должен быть кратким, ясным и не допускать двусмысленного толкования. Точность прогнозов зависит от распределения пунктов наблюдения, частоты наблюдений, периода прогноза и других немаловажных факторов, связанных с анализом и методикой прогнозирования. Каждый компонент прогноза тщательно анализируется и обрабатывается с учётом динамических условий

погоды, чтобы обеспечить надежное управление операциями и поддержание высокого уровня безопасности. Регулярные обновления и проверка данных позволяют сохранить актуальность и точность прогнозов, а также предотвратить возможные непредсказуемые изменения погодных условий [11].

В данной работе будут рассмотрены теоретические сведения из литературных источников о прогнозе радиационных туманов. Такой выбор обосновывается тем, что радиационный туман представляет научный интерес для специалистов авиационного метеорологического центра рассматриваемого аэродрома, ввиду его наибольшей повторяемости.

Прогноз радиационного тумана учитывает синоптические и метеорологические условия. При соответствии выделенных условий, остается определить точно будет туман или нет. В таком случае определяют температуру туманообразования. Благодаря сравнению температуры образования тумана и минимальной температуры за ночь можно определить результат прогноза с помощью следующего условия (формула 1.1).

$$T_{\tau} > T_{\min} \rightarrow \equiv, \quad (1.1)$$

где T_{τ} – температура туманообразования;

$T_{\min}$ – минимальная температура воздуха;

$\equiv$ – туман.

Радиационные туманы прогнозируются с учетом многих факторов. Важно принимать во внимание длительность ночного выхолаживания, дополнительные притоки влаги, например из почвы или водоема. Немаловажную роль имеет тип облачности, а также скорость и направление ветра. Но основополагающие предикторы для прогноза тумана всегда являются начальные показатели температуры и влажности воздуха. Устойчивая стратификация атмосферы благоприятствует образованию тумана [2].

Н.В. Петренко предложил расчет температуры образования радиационного тумана проводить по формуле 1.2:

$$T_{\tau} = T_d - \Delta T_d, \quad (1.2)$$

где T_d – температура точки росы во время захода Солнца;

ΔT_d – вероятное понижение температуры точки росы за ночь [8].

Величина ΔT_d определяется по таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Средние значения ΔT_d в зависимости от температуры точки росы в исходный срок по методу Н.В.Петренко

T_d	20...11	10...0	-1...-10	-11...-20	-21...-30
ΔT_d	1,4	1,6	2,0	2,5	2,3

Также Н.В. Петренко разработал график (рисунок 1.2) для нахождения температуры туманообразования [8].

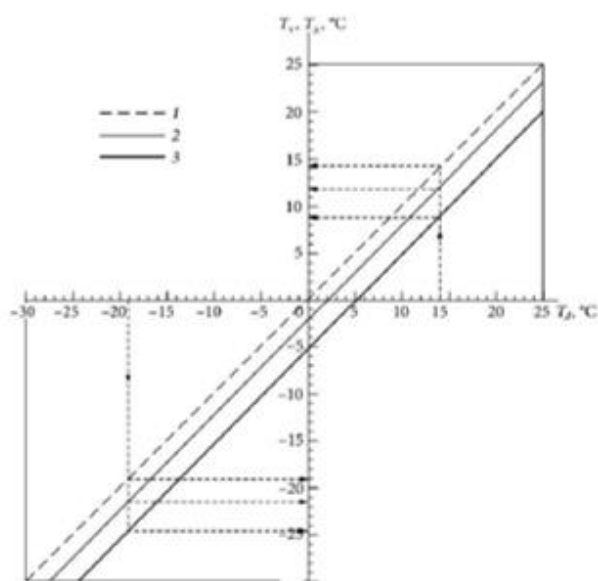


Рисунок 1.2 – График для прогноза радиационного тумана по методу Н.В.

Петренко: 1- линия дымки, 2 - линия слабого тумана,

3 - линия сильного тумана

Прогнозирование радиационного тумана по методу А.С. Зверева базируется на выявлении взаимосвязи между температурой точки росы (T_d) в

момент захода Солнца и температурой, требуемой для образования тумана (T_T). Прогноз минимального значения температуры ($T_{\min}$) выполняется путем анализа изменения ночной температуры в зависимости от температуры точки росы в момент захода солнца, учитывая прогнозируемые скорость ветра и облачность ночью [2].

Чтобы рассчитать температуру образования тумана, нужно применить уравнение, которое было приведено ранее, используя формулу 1.2. Ниже представлена таблица 1.2 для определения ΔT_d .

Таблица 1.2 – Средние значения ΔT_d определяющиеся исходя из температуры точки росы в начальный период времени по методике А.С. Зверева

T_d	20...11	10...0	-1...-10	-11...-20
ΔT_d	1,0	1,0	1,5	2,0

А.С. Зверев создал специальную номограмму (см. рисунок 2.3) [8].

Использование номограммы значительно ускоряет процесс прогноза тумана для практикующих синоптиков [2].

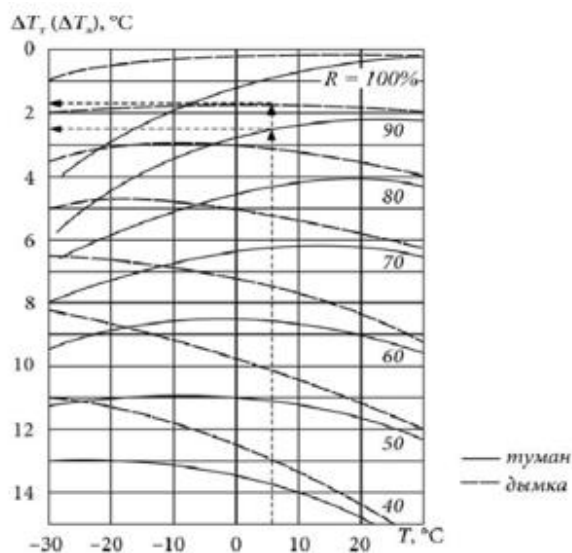


Рисунок 1.3 – Номограмма А. С. Зверева для прогноза радиационного тумана.

Б.В. Кирюхин предложил номограмму (рисунок 1.4). Также номограмма используется для определения понижения температуры точки росы ночью.

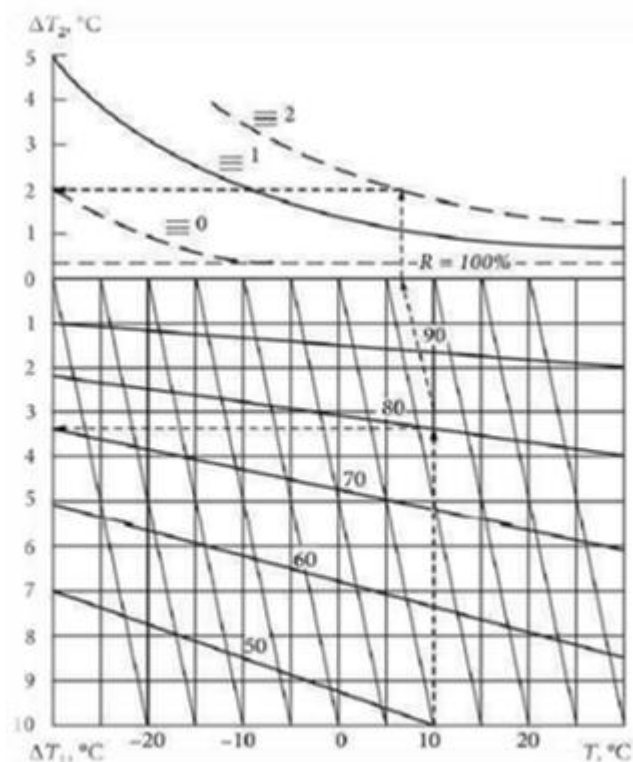


Рисунок 1.4 – Номограмма Б. В. Кирюхина для определения величины ΔT_{τ}

Определяя по номограмме дополнительное понижение температуры воздуха для образования тумана можно рассчитать суммарное понижение температуры. Именно такое понижение температуры за ночь необходимо для образования тумана заданной интенсивности. Рассчитывается по формуле 1.3:

$$\Delta T_{\tau} = \Delta T_1 - \Delta T_2, \quad (1.3)$$

Температура образования тумана по методу Б.В. Кирюхина рассчитывается по формуле 1.4:

$$T_{\tau} = T - \Delta T_{\tau}, \quad (1.4)$$

где ΔT_{τ} – общее понижение температуры;

ΔT_1 – величина, которая обозначает необходимое понижение температуры для достижения воздухом насыщения;

ΔT_2 – дополнительное понижение температуры, нужное для образования тумана выбранной интенсивности [8].

где T – температура воздуха.

Методы Зверева, Петренко и Кирюхина были применены для оценки точности прогнозирования радиационных туманов на аэродроме Иркутск за исследуемый период с 2013 по 2022 год. Эти методы продемонстрировали высокую оправдываемость, соответствующую требованиям метеорологического обеспечения. Расчеты оправдываемости прогноза радиационного тумана будут рассмотрены в последней главе данной работы. Результаты проведенного исследования были представлены в сборнике материалов II международной научно-практической конференции «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития» [13].

1.5 Методы прогноза тумана, используемые специалистами на аэродроме Иркутск

Синоптический метод прогноза тумана на аэродроме Иркутск представляет собой анализ термобарического поля, изменения температур за ночь и устойчивости воздушной массы. Специалисты АМЦ Иркутск в работе при прогнозировании тумана используют «Методические рекомендации синоптикам АМЦ Иркутск, АМСГ Иркутск-2». Согласно этому документу прогнозировать туман следует при следующих условиях:

- Выпадение осадков и увлажнение поверхности почвы;
- Малоградиентное барическое поле или усиливающийся антициклон, значительное ночное выхолаживание;
- Адвекция антициклонального вихря скорости на уровне земли и на уровне АТ-850 гПа;
- Слабая адвекция тёплого влажного воздуха;
- Туман не наблюдается при адвекции холода;

- Большая вероятность возникновения тумана на холодном с волнами фронте, на тёплом участке этого фронта при малом барическом градиенте после выпадения осадков.

В синоптической практике используют метод прогноза радиационного тумана по методу А. С. Зверева с изменениями. Значения среднего понижения температуры точки росы были перерассчитаны для местного климата и особенностей расположения. Метод был усовершенствован для аэропорта Иркутска старшим синоптиком Д.А. Ягановым. Для определения температуры туманообразования необходимо воспользоваться уравнением по формуле 2.2. Данным методом прогноза тумана пользуются синоптики на аэродроме Иркутск. Таблица (см. таб. 1.3) для определения понижения температуры точки росы будет следующей:

Таблица 1.2 – Средние значения ΔT_d в зависимости от температуры точки росы в исходный срок по методу А.С. Зверева

T_d \ Месяцы	Декабрь, январь, февраль	Март, ноябрь	Апрель, май, октябрь	Июнь, июль, август, сентябрь
20...11	-	-	-	3,0
10...0	-	-	2,7	2,8
-1...-10	6,8	5,4	2,5	2,0
-11...-20	7,8	6,1	2,5	-
-21...-30	8,2	6,6	-	-
-31...-37	8,2	-	-	-

Метод прогноза тумана по методу Зверева был адаптирован для условий Иркутска путём корректировки коэффициентов. Этот подход показал высокую точность, и в дальнейшем исследовании будет проведена оценка эффективности данного метода и сравнение с другими методами прогноза радиационного тумана.

2. Физико-географические особенности аэродрома Иркутск

2.1 Физико-географическое описание аэродрома Иркутск

Аэродром Иркутск расположен в южной части обширного Среднесибирского плоскогорья (рисунок 2.1). Центральную область занимает Иркутско-Черемховская равнина с типичным холмистым рельефом, относительная высота которой составляет 120–150 метров. Северные и северо-восточные районы аэродрома занимают возвышенную равнину — Лено-Ангарское плато, высота которого уменьшается с юга на север, варьируясь в пределах от 1100 до 500 метров, причем максимальная точка достигает отметки 1464 метра. Юго-западная граница района аэродрома проходит вдоль хребтов Восточного Саяна, достигающих максимальной высоты 3491 метр (горы Мунку-Сардык), простирающихся главным образом с северо-запада на юго-восток. Южнее находятся склоны хребта Хамар-Дабан, граничащие с юго-западной стороной озера Байкал, где самые высокие вершины — Хан-Ула (2371 метр) и Утуликская подкова или Субутуй (2396 метров). К юго-востоку и востоку от аэродрома лежит озеро Байкал, окруженное с западной стороны Приморским хребтом с высшей точкой 1746 метров (гора Трёхголовый Голец) и Байкальским хребтом, вершиной которого является гора Черского с абсолютной высотой 2588 метров [14].

Ландшафт местности характеризуется пересечением реки Ангары (ее долина протягивается с юго-востока на северо-запад) и ее притоков (реки Иркут и Ушаковка), формируя рельеф с узкими водоразделами, пологими склонами и развитыми речными долинами. Вершины междуречий, имеющие плоские и округлые формы, достигают высот 480–520 метров над уровнем моря, возвышаясь на 60–100 метров над поверхностью. Летное поле размером 3865 × 300 метров размещено на пологом северном склоне невысокой водораздельной

гряды между реками Ангара и Ушаковка, представляющей собой продолжение Онотской возвышенности [14].

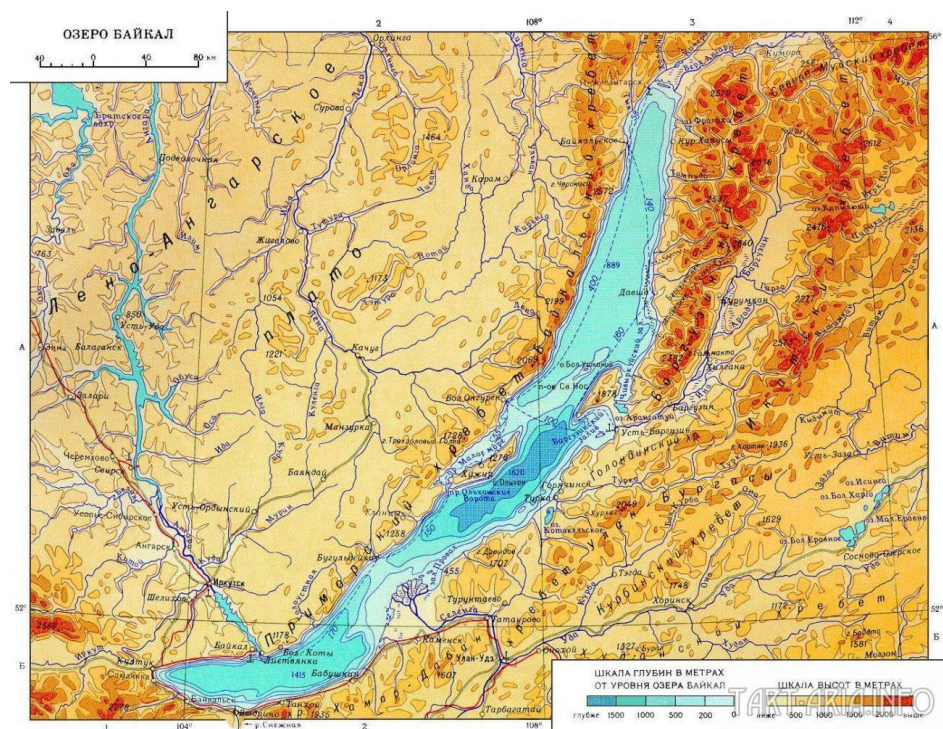


Рисунок 2.1 – Карта рельефа и расположения аэродрома Иркутск



Рисунок 2.2 – Фотография Иркутского аэродрома со спутника

Аэродром Иркутск находится на правом берегу реки Ангары, на юго-восточной окраине города Иркутска (рисунок 2.2). Абсолютная высота аэродрома составляет 514,43 метра. Магнитное склонение на аэродроме равно - 04°.

Взлётно-посадочная полоса с искусственным покрытием (ВПП) имеет уклон с юго-востока на северо-запад. Разница между местным временем и всемирным скоординированным временем (UTC или ВСВ) составляет восемь часов [14].

Метеонаблюдения на аэродроме Иркутск проводятся двумя способами:

- 1) Автоматически фиксируются такие параметры, как направление и скорость ветра, видимость, высота нижней границы облаков, температура и влажность воздуха, а также атмосферное давление.
- 2) Визуально отслеживаются погодные условия, количество и форма облачности.

Синоптики на аэродроме Иркутск выпускают следующие виды авиационных прогнозов:

- TAF (Terminal Aerodrome Forecast) — прогноз погоды для аэропорта, действительный на протяжении 24 часов. Включает информацию о ветре, видимости, облачности, температуре и других погодных условиях, важных для взлета и посадки самолетов.
- TREND (Trend Forecast) — краткосрочный прогноз изменений погоды на ближайшие два часа после выпуска основного прогноза TAF. Обычно используется для уточнения текущих метеоусловий перед взлетом или посадкой.
- GAMET (G-AirMet) — прогноз погоды для воздушных судов низких эшелонов полета (до FL150), включающий информацию о возможных опасностях, таких как турбулентность, обледенение, грозы и другие неблагоприятные явления.

- SIGMET (Significant Meteorological Information) — предупреждение о значительных метеорологических условиях, которые могут представлять опасность для авиации. Выпускается, если наблюдаются или прогнозируются опасные явления, такие как сильные турбулентности, вулканическая активность, сильная грозовая деятельность и т.п.
- AIRMET (Airmen's Meteorological Information) — информация о значимых метеорологических условиях, которые могут повлиять на безопасность полетов, например, умеренная турбулентность, низкая облачность или плохая видимость.

Такие прогнозы позволяют пилотам и диспетчерам принимать обоснованные решения, касающиеся безопасности полётов, и предоставляют им актуальные данные о текущем и ожидаемом состоянии погоды [11].

2.2 Климатическое описание аэродрома Иркутск

Климат аэродрома Иркутска отличается резкой континентальностью.

Годовой диапазон среднемесячных температур воздуха за период с 2005 по 2019 год составил 38,8 °С. Средние месячные температуры колебались от -20,2 °С в январе до 18,6 °С в июле (рисунок 2.3) [14].

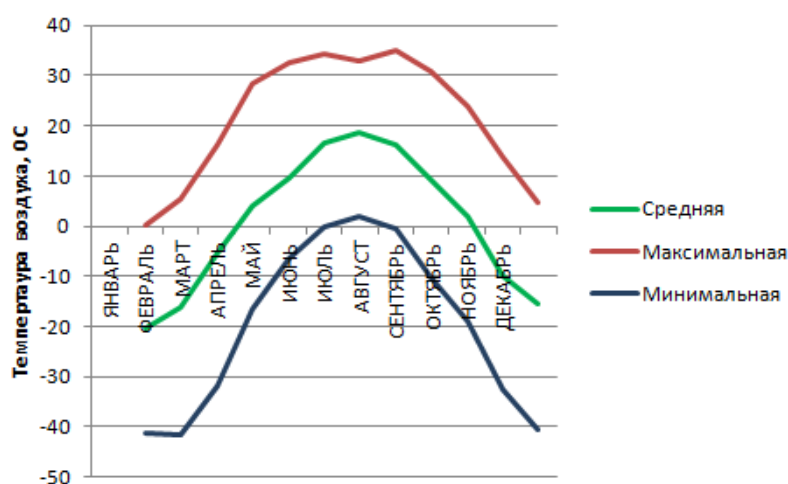


Рисунок 2.3 – Средняя месячная, максимальная и минимальная температура воздуха на аэродроме Иркутск

Особенности суточных изменений температуры (см. рисунок 2.4) заключаются в следующем: наименьшие среднемесячные показатели температуры воздуха фиксировались в 00 ВСВ времени в период с ноября до марта, тогда как с апреля по октябрь и в декабре они достигали минимума к 09 ВСВ. Максимум температуры приходился на 06 ВСВ с октября по январь и на 09 ВСВ с февраля по сентябрь.

Наиболее значительные суточные температурные колебания происходили в мае и июне, в то время как наименьшая амплитуда колебаний была характерна для декабря [14].

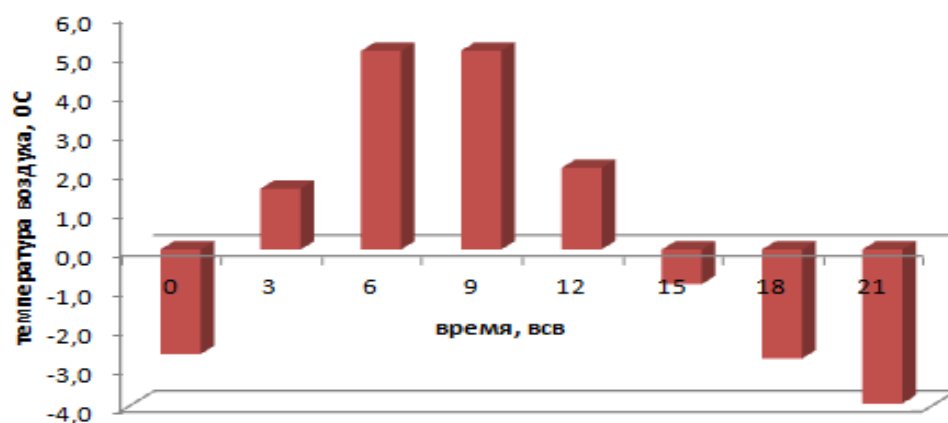


Рисунок 2.4 – Суточный ход температуры воздуха на аэродроме Иркутск

На рисунке 2.5 изображён годовой график среднегодовой скорости ветра на аэродроме Иркутск за период с 2005 по 2019 год. За указанный период средняя скорость ветра составляла 3,1 м/с. Пик средней скорости ветра был достигнут весной, в мае, когда она достигла 3,9 м/с. Наименьшее значение, равное 2,5 м/с, наблюдалось зимой, в декабре и январе.

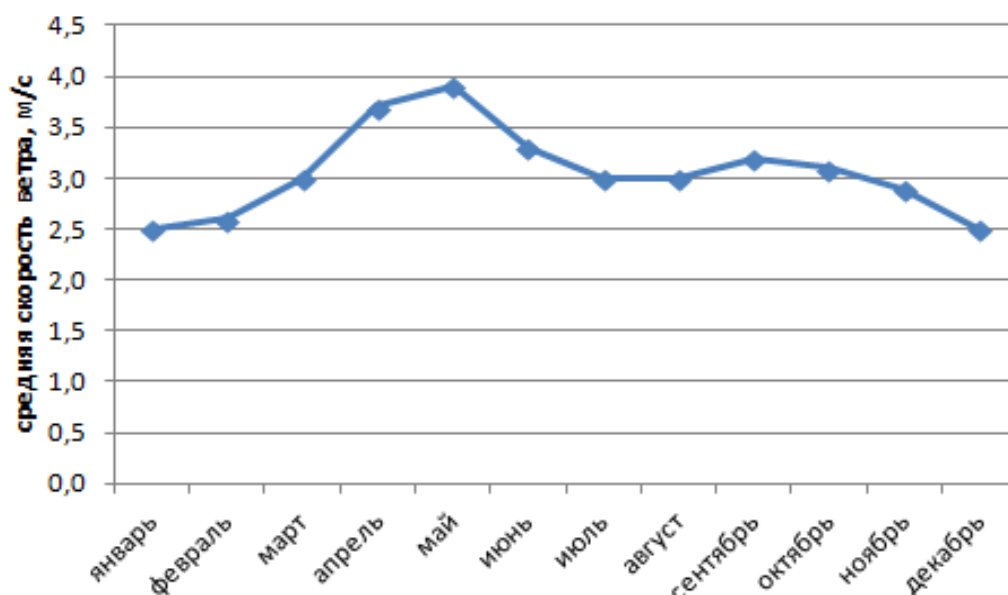


Рисунок 2.5 – Средняя месячная скорость ветра на аэродроме Иркутск

Как видно из рисунка 2.6, наиболее частыми направлениями ветра на аэродроме Иркутск были северо-западные ветры (290-310°) со средней скоростью 5,9 м/с, восточные ветры (80-100°) со средней скоростью 2,2 м/с и юго-восточные ветры (140-160°) со средней скоростью 3,8 м/с. Реже всего отмечались ветры юго-западного направления (230-250°) со средней скоростью 2,5 м/с.

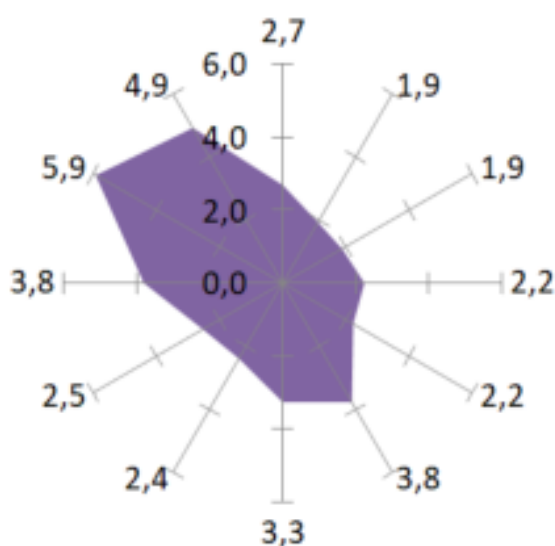


Рисунок 2.6 – Средняя годовая повторяемость различных градаций направления ветра на аэродроме Иркутск

Опасными для авиации явлениями являются туман и дымка, поскольку они ухудшают не только горизонтальную, но зачастую и вертикальную видимость. За период с 2005 по 2019 год на аэродроме Иркутск в среднем ежегодно отмечалось 32,7 дня с туманом и 71,9 дня с дымкой [14].

Наибольшее число туманных дней пришлось на август — в среднем 6,5 дней в году. В то же время максимальная частота появления дымки наблюдалась в декабре, составляя 11,3 дня в году (рисунок 2.7). Средняя общая продолжительность тумана за год составляла 3,2 часа, а дымки — 3,6 часа. Самые длительные периоды непрерывного тумана были зафиксированы в октябре (22 часа) и августе (21 час).

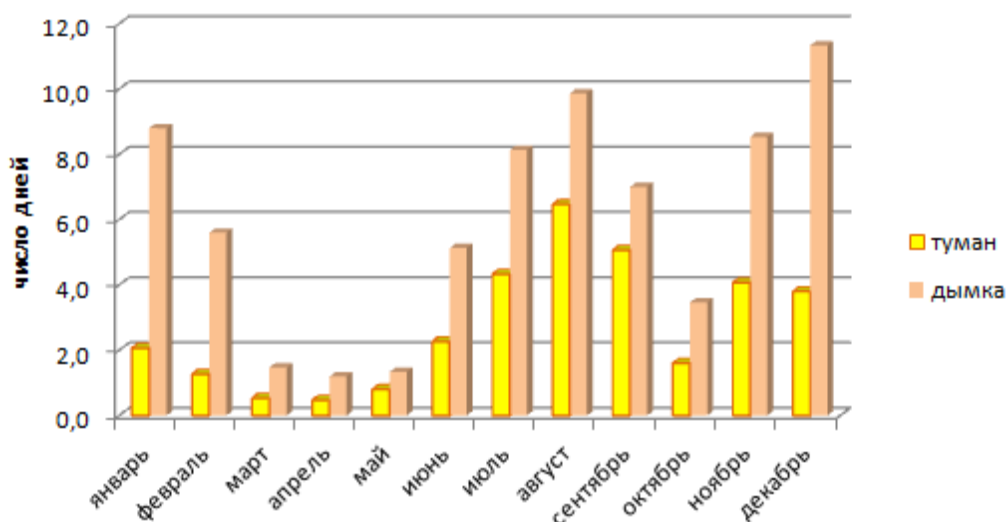


Рисунок 2.7 – Годовой ход повторяемости случаев с туманом и дымкой на аэродроме Иркутск

На аэродроме Иркутск туманы чаще всего осложняют деятельность авиации в августе, октябре и ноябре, когда имеют наибольшую повторяемость и максимальную продолжительность.

2.3 Влияние тумана на авиацию

Туман становится причиной ограничения не только горизонтальной, но и вертикальной видимости. МДВ в тумане часто снижается до уровня ниже установленного минимума аэродрома или ВС. В некоторых случаях туман делает невозможными взлёты и посадки [9].

Кроме ухудшения видимости, ледяной туман вызывает образование тонкого слоя льда на необработанных рулёжных дорожках и взлётно-посадочных полосах [9].

Во время посадки самолетов большое значение имеет соотношение наклонной и горизонтальной видимости. Эти факторы учитываются в минимальных погодных условиях [11].

Видимость взлетно-посадочной полосы (ВПП) определяется расстоянием, с которого пилот, находясь на осевой линии ВПП, может заметить разметку полосы или огни, обозначающие ее контуры и центр [11].

Горизонтальная видимость определяется пилотом в условиях полета. Данная видимость характеризует условия наблюдения различных объектов на высоте полета [10].

Вертикальная видимость характеризуется определением максимального расстояния по вертикали до видимого неосвещенного объекта днем и освещенного ночью с борта ВС [10].

Наклонная видимость является расстоянием, в пределах которого экипаж самолета, совершающего заход на посадку, может видеть наземные объекты или огни [10].

Минимумы погоды представляют собой предельные метеорологические условия, при которых допускается выполнение полетов командиром экипажа, эксплуатация самолета и использование аэродрома для взлета и посадки. Минимумы погоды определяются только высотой нижней границы облаков и видимостью [11].

3. Особенности образования туманов на аэродроме Иркутск

3.1 Анализ повторяемости туманов на аэродроме Иркутск

На основании представленных данных в таблице 3.1 был проведен анализ годового хода количества туманов за период исследования 2019-2023.

Наибольшее количество туманов наблюдалось в летние месяцы. Август демонстрирует наибольшее количество туманов (44), что может свидетельствовать о высокой относительной влажности и определённых климатических условиях в это время года. В июле также показывает значительное количество, что подтверждает тенденцию к увеличению туманов в летние месяцы, возможно, из-за конденсации влаги в тёплом воздухе.

Осенью в сентябре и ноябре наблюдалось умеренное количество туманов. В сентябре ещё сохраняется высокая влажность от летнего периода, а в ноябре туманы могут быть связаны с переходом к более холодной погоде. Октябрь демонстрирует заметное снижение по сравнению с сентябрём.

В январе и декабре количество туманов значительно ниже, чем в летние и осенние месяцы. Это может быть объяснено холодными температурами, которые не способствуют образованию туманов так эффективно, как в тёплое время года. В феврале туманов наблюдается еще меньше, что поддерживает эту тенденцию уменьшения количества туманов к весне.

Весной наблюдалось наименьшее число туманов за исследуемый период. В апреле наблюдается наименьшее количество туманов (1) во всем году. Несмотря на то, что влажность воздуха увеличивается, в атмосфере происходят процессы перестройки на летний режим. Воздушная масса в то время неустойчива, что не способствует образованию туманов.

Основное количество туманов наблюдается в летние месяцы, особенно в августе. Осень является переходным сезоном с относительно высоким количеством туманов, с постепенным снижением в холодное время года. Зимние и весенние месяцы имеют значительно меньшее количество туманов.

Таблица 3.1 – количество туманов в каждом месяце за период исследования 2019-2023

Месяц	Количество туманов
Январь	10
Февраль	6
Март	3
Апрель	1
Май	5
Июнь	18
Июль	25
Август	44
Сентябрь	28
Октябрь	14
Ноябрь	19
Декабрь	17

Общее количество проанализированных случаев образования тумана составило 186, что в среднем соответствует 37 случаям в год. Наибольшее количество туманов зафиксировано в августе (44), тогда как наименьшее в апреле (1).

Наибольшая повторяемость возникновения туманов отмечается в августе (23,1%), в то время как минимальное значение наблюдается в апреле (0,5%). Можно заметить, что повторяемость туманов постепенно увеличивается с апреля до августа, а затем снижается до октября, когда завершается теплый сезон. С началом холодов количество туманов начинает увеличиваться в ноябре, что можно объяснить влиянием незамерзающего водохранилища и повышенной влажностью в атмосфере.

На рисунке 3.1 представлен годовой ход повторяемости туманов.

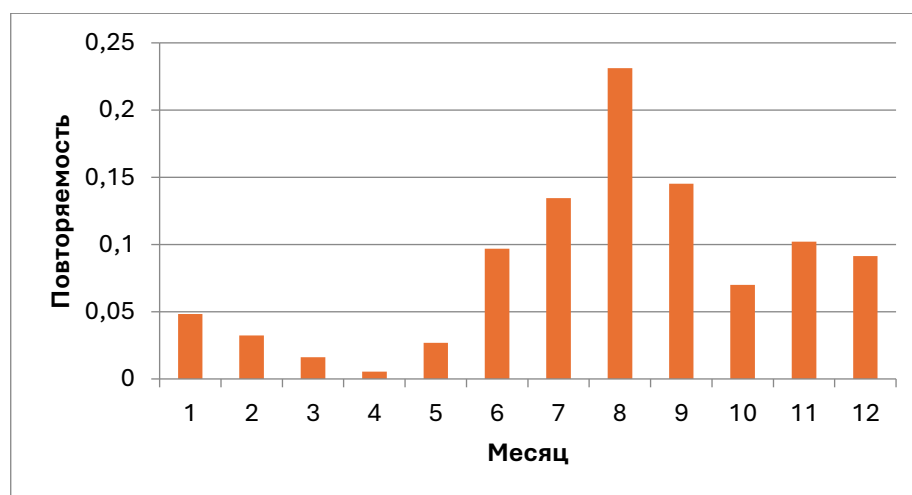


Рис.3.1 – Повторяемость тумана в течение года на аэродроме Иркутск

Наибольшая повторяемость возникновения тумана наблюдается летом, когда он появляется в 46% случаев (см. на рис.3.2). Этот показатель свидетельствует о том, что летние условия способствуют формированию туманов наиболее активно. С наступлением осени повторяемость возникновения тумана снижается до 32%. Зимний период характеризуется еще более низкой повторяемостью, составляющей лишь 17%. Весной наблюдается минимальная повторяемость возникновения тумана, всего 5%, что указывает на редкие случаи его образования в это время года.

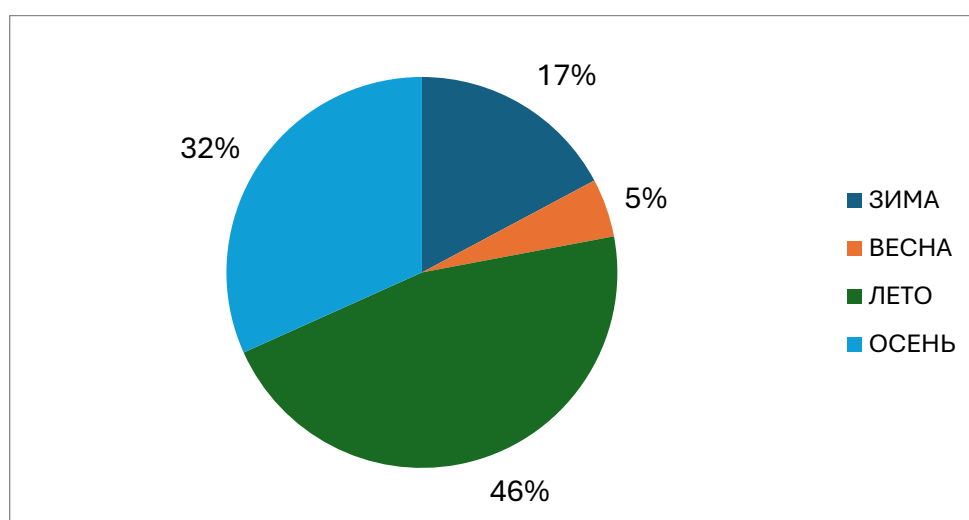


Рис.3.2 – Диаграмма распределения повторяемости тумана по сезонам года на аэродроме Иркутск

Суточный цикл формирования туманов изменяется в зависимости от сезона года. Туманы летом обычно возникают ночью и исчезают спустя 1-2 часа после рассвета; наиболее часто они встречаются в 5-6 часов утра. Осенью туманы формируются ближе к утру, порой уже после восхода солнца, и могут держаться до обеда, достигая пиковой частоты появления в 6-7 часов утра. Зимой туманы чаще всего возникают вечером, что связано с увеличением концентрации продуктов сгорания, а также утром после восхода солнца. В этот сезон наблюдаются два максимума повторяемости: в 2-3 часа ночи и 9-10 часов утра. Весной преобладают фронтальные туманы, возникающие в ночные часы, с пиком повторяемости в 8-9 часов утра. График суточного хода изменения туманов представлен на рисунке 3.3, где указано местное время, когда наблюдался туман.

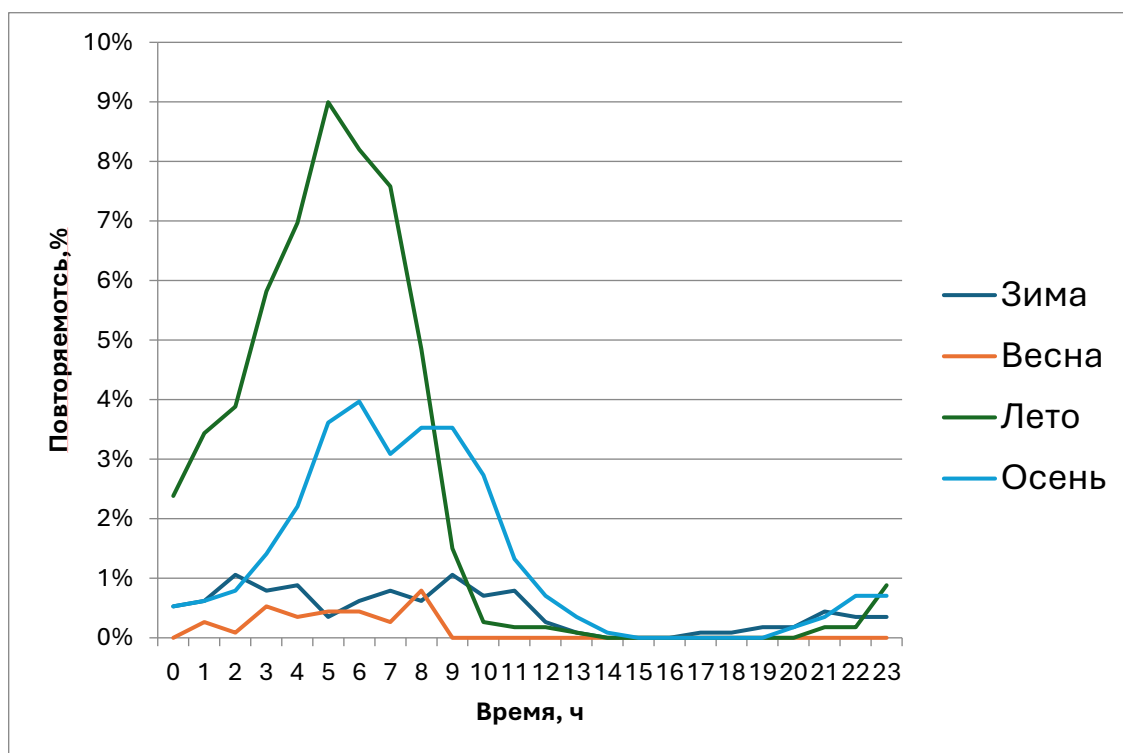


Рис.3.3 – Суточный ход туманов на аэродроме Иркутск

Непрерывная продолжительность туманов варьируется от менее часа до 13 часов за период с 2019 по 2023 год. Гистограмма, иллюстрирующая

распределение повторяемости продолжительности туманов на аэродроме, показана на рисунке 3.4. Самые непродолжительные туманы чаще всего возникают зимой, тогда как наиболее длинные туманы регистрируются летом и осенью. Наибольшая частота приходится на туманы продолжительностью менее одного часа — она составляет 34%. Наименьшей частотой отличаются туманы, длящиеся более 10 часов, — их доля всего 1%. Помимо этого, повторяемость тумана как опасного для авиации явления, то есть при его продолжительности свыше пяти часов, равна 18%. Эти цифры подчеркивают значительное разнообразие в характеристиках туманов в зависимости от времени года и их продолжительности. Продолжительные туманы могут создавать серьезные препятствия для видимости, что ставит под угрозу безопасность и приводит к увеличению количества инцидентов.

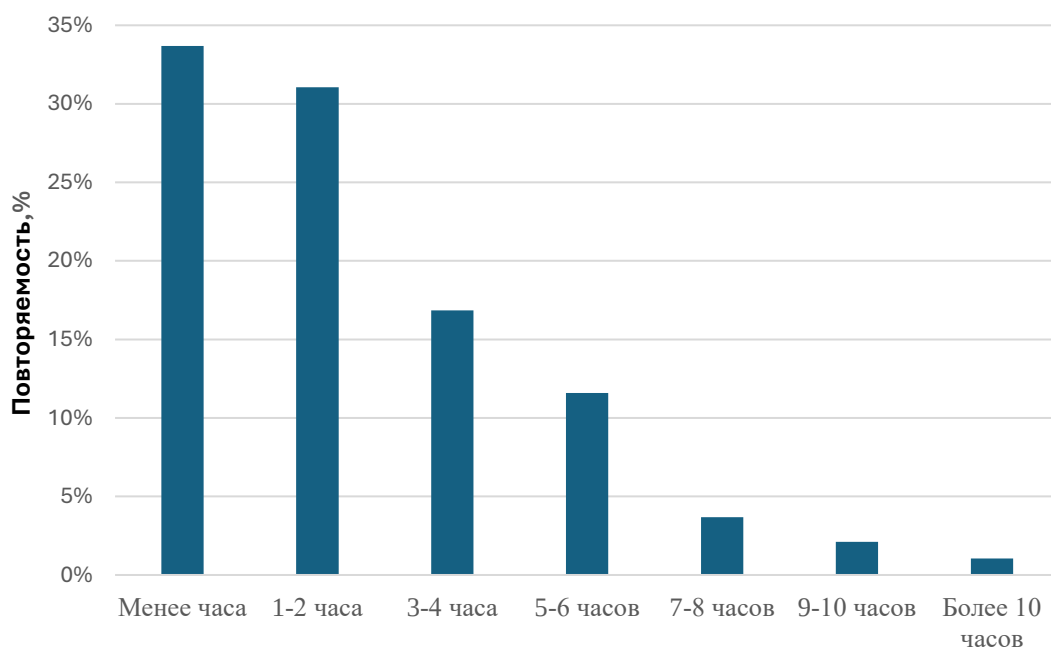


Рис. 3.4 – Продолжительность туманов на аэродроме Иркутск

На аэродроме Иркутск наибольшая повторяемость туманов наблюдается при видимости 200 метров, составляя 28% от общего числа случаев. Примечательно, что такие наиболее характерные условия для аэродрома

являются причиной закрытия аэродрома. По эксплуатационным минимумам большинства ВС видимость 200 м не подходит для полетов. Минимумов аэродрома в Иркутске не устанавливали. Гистограмма распределения МДВ изображена на рисунке 3.5.



Рис. 3.5 – Повторяемость метеорологической дальности видимости на аэродроме Иркутск

В то же время, туманы с видимостью менее 50 метров фиксируются крайне редко, всего в 0,2% случаев. Эта значительная разница указывает на то, что серьезные ограничения видимости – это скорее исключение, чем правило. Таким образом, аэродром Иркутск подвержен частым, но умеренно тяжелым условиям тумана, что важно учитывать при организации воздушного движения.

Для анализа метеорологических факторов, способствующих образованию тумана, были собраны данные по температуре и ветру. Роза ветров при туманах изображена на рисунке 3.6.

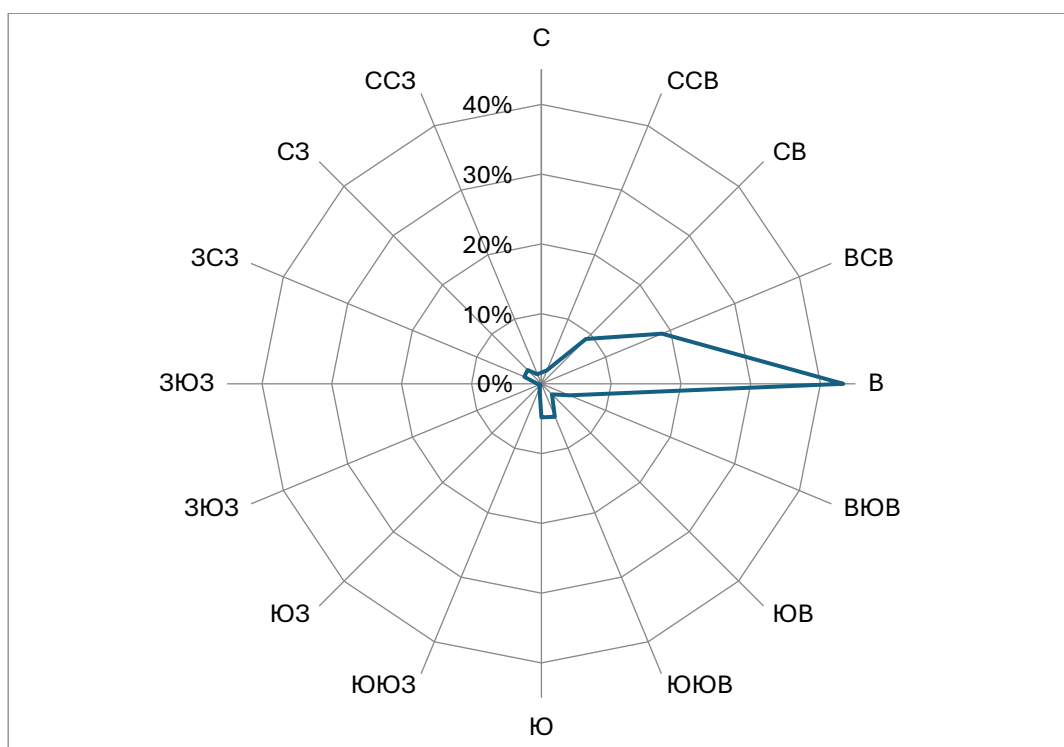


Рис. 3.6 – Направления ветра при туманах на аэродроме Иркутск

На аэродроме туманы чаще всего наблюдались при восточном ветре, что может быть связано с особенностями местного рельефа, влияющего на распределение влаги. Ветер северо-восточного направления также способствовал образованию туманов, хотя и в меньшей степени. Южный и юго-восточный ветры создавали условия для формирования туманов еще реже, благодаря особенностям местности. При северо-западном ветре туманы возникали ещё менее активно. Наконец, юго-западный ветер практически не наблюдался во время туманов, так как данное направление ветра по многолетним данным достаточно редкое.

В условиях аэродрома Иркутск наблюдается значительная зависимость образования туманов от температурного режима. При отрицательных температурах было зарегистрировано 25,7% случаев образования тумана, тогда как при положительных температурах этот показатель заметно выше – 74,2%. На рисунке 3.7 представлена гистограмма повторяемости тумана при разных градациях температур воздуха.

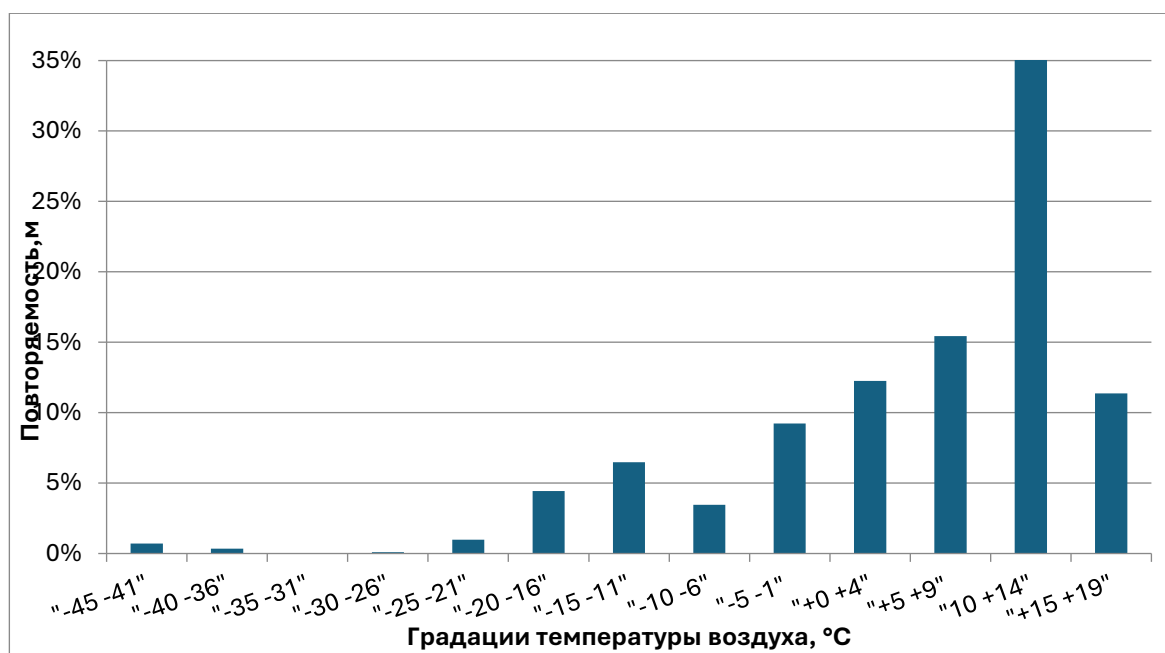


Рис. 3.7 – Повторяемость туманов на аэродроме Иркутск при разных градациях температуры воздуха

Анализируя температурные условия, сопутствующие возникновению туманов на аэродроме Иркутска, выяснилось, что наиболее часты случаи туманообразования при температуре в диапазоне от 10 °С до 14 °С, что соответствует повторяемости в 34,6%. Это указывает на то, что умеренно теплые температуры способствуют образованию туманов более чем в трети случаев. Остальные температурные диапазоны демонстрируют значительно меньшие проценты повторяемости.

3.2 Классификация туманов на аэродроме Иркутск

В ходе работы было выявлено, что преобладающая повторяемость случаев тумана на аэродроме по классификации имеет радиационный характер, составляя 45,2%. Это свидетельствует о том, что радиационные туманы являются наиболее частым явлением в данной местности. Менее распространены адвективно-радиационные туманы, которые составляют 36%.

Помимо этих типов, за пять лет также наблюдались и другие виды туманов. Повторяемость различных типов тумана за исследуемый период представлена на рисунке 3.8.

Например, адвективные туманы составили всего 1,6%, а фронтальные туманы — 4,8% на холодном фронте и 3,8% на теплом фронте.

Антропогенные туманы, которые возникают в результате человеческой деятельности, составили 5,2%. Из них были зафиксированы морозные туманы (1,6%), городские (печные) туманы — 2,7%, туманы, связанные с пожарами, — 3,8%. Туманы испарения, которые составили 0,5%, наблюдались реже всего из-за того, что чаще всего фактор парения водоемов в Иркутске является дополнительным к другим типам тумана.

Таким образом, анализ данных о туманах на аэродроме показывает разнообразие их типов и причин возникновения.

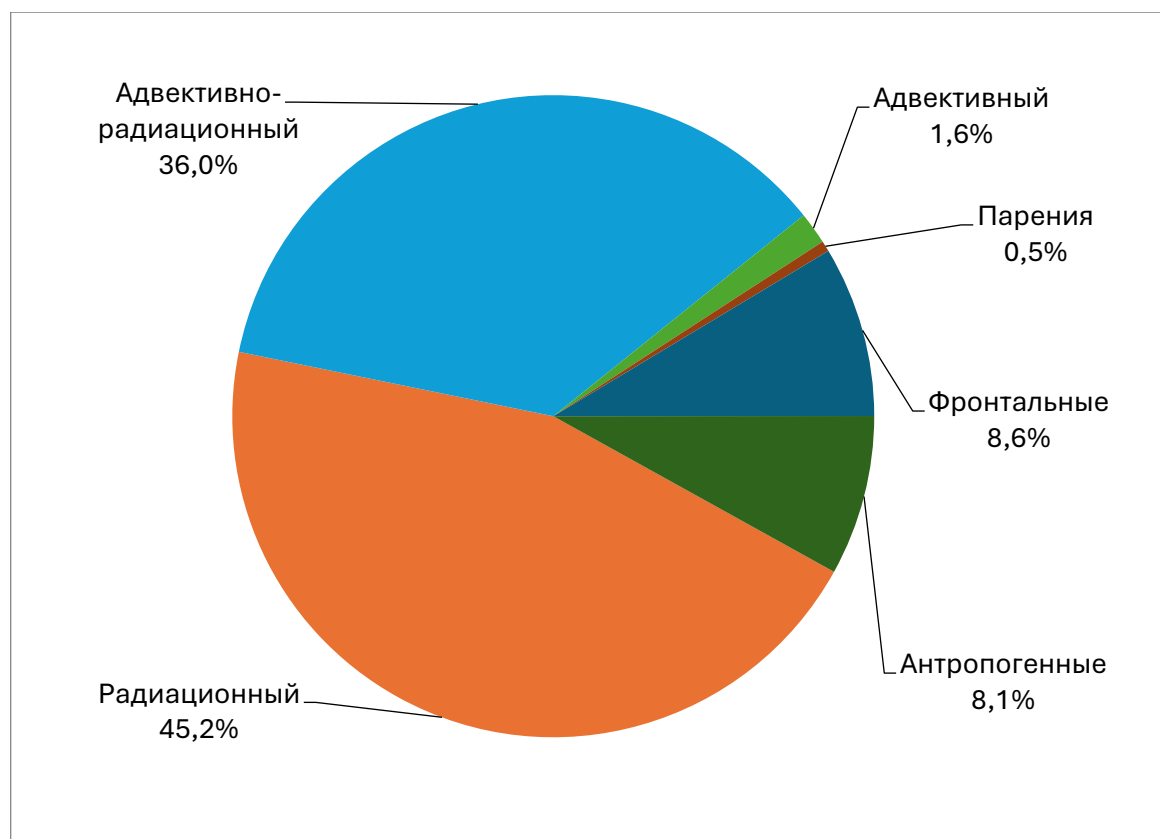


Рис. 3.8 – Классификация туманов на аэродроме Иркутск

3.3 Типизация синоптических условий образования туманов на аэродроме Иркутск

Туманы, наблюдаемые с 2019 по 2023 год, формировались при различных типах барических полей. Наиболее распространенными были малоградиентные барические поля пониженного (20,4%) и повышенного (14,0%) давления. Передняя и задняя части гребня (10,7%). Повторяемость оси гребня антициклона составила 7,0%, в то время как антициклон и его периферия — 12,9%. Передняя и задняя части ложбины составили 10,8%, а ось ложбины — 8,1%. Барическая седловина зафиксирована на уровне 5,4%, в то время как центр циклона составил 1,1%, а задняя часть циклона — 4,8%. Теплый сектор циклона составил 3,2%, а северная периферия южного циклона — 1,6%.

Повторяемость синоптических условий при образовании тумана представлена в таблице 1.

Если объединить данные по синоптическим положениям, оставив суть барического образования, которое оказывает влияние, то преобладают малоградиентные барические поля. Таким образом, можно выделить основные типы барических образований, влияющих на формирование туманов (см. рис. 3.8.).

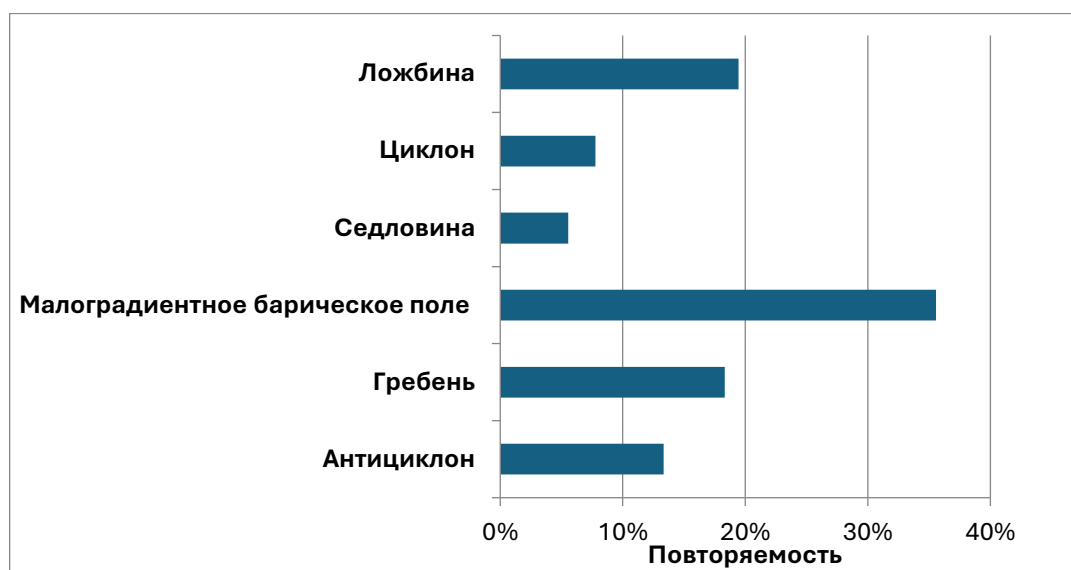


Рис. 3.9 – Основные типы барических полей при туманах на аэродроме Иркутск

Таблица 1. Синоптические условия образования тумана на аэродроме Иркутск

Барическое поле	Количество	Повторяемость
Антициклон	11	6%
Восточная периферия антициклона	9	5%
Западная периферия антициклона	1	1%
Северная периферия антициклона	3	2%
Передняя часть гребня	18	10%
Тыловая часть гребня	2	1%
Ось гребня	13	7%
Малоградиентное барическое поле повышенного давления	26	14%
Малоградиентное барическое поле пониженного давления	38	20%
Седловина	10	5%
Циклон	2	1%
Северная периферия циклона	3	2%
Тыловая часть циклона	9	5%
Теплый сектор циклона	6	3%
Ось ложбины	15	8%
Передняя часть ложбины	5	3%
Тыловая часть ложбины	15	8%
Всего	186	100%

Менее часто наблюдались туманы в ложбинах. Примечательно, но в гребнях туманов наблюдалось меньше, чем при оказывании влияния ложбин. Еще меньше повторяемость туманов происходила при влиянии антициклонов, а также циклонов и седловин.

3.4 Условия образования туманов на аэродроме Иркутск

Условия образования различных типов тумана уникальны. В Иркутске существует множество местных особенностей, способствующих формированию туманов. Эти факторы включают в себя климатические условия, рельеф местности и влияние водоемов, что делает каждый случай образования тумана неповторимым. Туманы на аэродроме Иркутск носят в основном радиационный характер и наблюдаются в утренние часы при скорости ветра не более 3 м/сек, быстро рассеиваются с восходом солнца при средней продолжительности 1-2 часа - весной, 3-5 часов - в середине лета и 6-7 часов - в конце лета. Весной туманы образуются, если днем выпадали осадки и ожидается прохождение атмосферного фронта. Фронтальные туманы наблюдаются редко. В летний период ухудшение видимости ниже минимумов аэродрома может наблюдаться и за счет мглы от лесных пожаров, когда на большей части Иркутской области стоит сухая жаркая погода [12].

Для формирования радиационных туманов необходимы условия стабильной атмосферы в малоградиентных барических полях, антициклональных системах и седловинах. На карте абсолютной барической топографии на уровне 850 гПа должны наблюдаться гребни, размытые барические поля и гребни тепла. Туман образуется при слабом ветре, без значительных изменений приземного давления и охлаждения воздуха до состояния насыщения. Важным фактором для возникновения тумана является приземная инверсия температуры. Причем, чем больше величина инверсии, тем продолжительнее и устойчивее наблюдаются туманы. Радиационные туманы

чаще всего наблюдаются летом и осенью, когда метеорологические условия, рассмотренные в данной работе, способствуют их образованию.

При прогнозировании адвективно-радиационного тумана следует оценивать влияние адвекции влажной воздушной массы в приземном слое и радиационного охлаждения воздуха, а также турбулентного перемешивания. Туман появляется в осях ложбин, а также в передней и тыловой частях ложбины, в тылу циклонов, в теплых секторах циклонов, на восточных перифериях антициклонов, в седловинах и малоградиентных полях. По полю АТ-850 гПа могут наблюдаться барические гребни и ложбины, в термическом поле также более вероятен туман при гребне, но были случаи с ложбинами и адвекцией холода. Ветер наблюдается слабый, не больше 4 м/с, давление и температура могут изменяться значительно. Туманы чаще всего наблюдаются в осенний период, когда ночные температуры значительно снижаются, что создает идеальные условия для конденсации влаги в воздухе. Важно учитывать, что в осенний период, особенно в условиях ясной ночи, вероятность образования тумана значительно возрастает.

Туманы испарения образуются в результате парения водных объектов, таких как реки и водохранилища, и часто наблюдаются в осенний период. В частности, туманы могут возникать над рекой Ангара и Иркутским водохранилищем, когда потоки ветра переносят водяные пары в район аэродрома. Эти туманы чаще всего появляются в утренние часы, когда температура воздуха достигает минимальных значений. Количество случаев таких туманов было зафиксировано мало, ввиду редкого смещения на аэродром туманов с водохранилища, и довольно частого влияния в процесс туманообразования не только парения, но и других факторов. Потому туманов других типов (радиационных, адвективно-радиационных, фронтальных) наблюдается намного больше, чем туманов испарения, хотя является для них дополнительным фактором туманообразования. Для образования туманов испарения необходима разница температур между водой и воздухом более 8 °С,

а также воздушная масса с устойчивой стратификацией и слабый ветер. Важно, чтобы ветер был стабильно юго-западным, западным или северо-западным со скоростью до 3 м/с, чтобы туман мог переместиться на аэродром.

Условия образования туманов антропогенного характера (городские, морозные и туманы от дымов лесных пожаров) схожи с условиями для радиационных и адвективно-радиационных туманов. Основное различие заключается в том, что в качестве ядер для конденсации выступают мелкие частицы, такие как пепел, дым или продукты сгорания топлива самолетов.

Городские туманы зимой образуются вечером на аэродроме Иркутск при западном и северо-западном направлениях ветра со скоростью до 3 м/с, высокой влажности воздуха и пониженных температурах от -17 °С до -25 °С. Причиной выделения городских туманов от морозных является разница в метеорологических условиях образования. Городские и морозные туманы образуются из-за увеличенной концентрации взвешенных частиц в воздухе, но при разных температурах. Так же отличительной чертой городских туманов выступает направление ветра. Если по потоку северо-западного ветра с города смещаются на аэродром частицы выхлопных газов машин, загрязняющих веществ заводов, дым с печных труб частных домов, то в условиях устойчиво стратифицированной атмосферы продукты сгорания скапливаются в приземном слое и увеличивают вероятность возникновения тумана. Над городом в зимнее время формируется остров тепла, который усиливает инверсию и препятствует рассеиванию загрязняющих частиц в воздухе.

Морозные туманы обычно формируются при температуре воздуха ниже -39 °С и относительной влажности свыше 56%. Их появление связано с безветренными условиями, способствующими дополнительному охлаждению воздуха из-за отсутствия турбулентного перемешивания. На аэродроме возникновение морозного тумана обусловлено устойчивым азиатским антициклоном, господствующим над Восточной Сибирью, и сильным выхолаживанием воздуха. Учитывая постоянное наличие продуктов сгорания

топлива на территории аэродрома, при низких температурах дополнительные ядра конденсации с большой вероятностью приводят к образованию тумана.

Туман, вызванный повышенной концентрацией пепла и смога от лесных пожаров, представляет собой наиболее опасное явление для авиации, так как увеличивает продолжительность тумана и уменьшает метеорологическую дальность видимости до очень низких значений (менее 50 м). Для образования такого тумана необходимо, чтобы по ведущему потоку ветра находились очаги пожаров. В результате город покрывается густым смогом, и ядер конденсации становятся значительно больше, чем при обычных условиях. Чем больше концентрация взвешенных частиц в воздухе, тем продолжительнее и опаснее может быть туман. За период исследования туманы, возникшие из-за близко расположенных к городу очагов пожаров, наблюдались не редко. Их образование приводило к полному отсутствию воздушного сообщения на долгое время (наибольшее 13 часов).

Наиболее интересные и сложные случаи образования тумана связаны с влиянием циклонов и их ложбин, а также с прохождением атмосферных фронтов. Не на каждом атмосферном фронте появляется туман, чаще ухудшение видимости в зоне фронта вызвано осадками. Особенностью Иркутска считается географическое положение в долине реки Ангара и высоких гор Восточного Саяна западнее от города. В таком случае все синоптические процессы, происходящие над регионом, претерпевают изменения.

Орография вносит свой вклад в деформацию барических образований, динамику атмосферных фронтов. При смещении теплого фронта потоками 260° - 300° над горами происходит феновый эффект и воздушная масса, некогда влажная на наветренной стороне, становится сухой на подветренной стороне гор. При остальных северо-северо-западных направлениях ведущего потока теплые фронты смещаются на Иркутск с влажной воздушной массой и значительным ухудшением погодных условий. А когда процессы в атмосфере происходят при смещении воздушной массы юго-западными и южными

потоками, горы не препятствуют протеканию процесса и озеро Байкал увеличивает количество влаги в воздушной массе.

Адвективные туманы в Иркутске возникали исключительно с выходом южных циклонов на территорию Забайкалья. Влажный теплый воздух перемещается южными и юго-восточными потоками на север. Обычно такие туманы имеют продолжительный характер и сопровождаются осадками в зоне неустойчивости на северной периферии циклона. Для формирования тумана необходимы определенные метеорологические условия: слабый южный или юго-восточный ветер со скоростью 1-4 м/с; наличие приземной или приподнятой температурной инверсии; адвекция теплого влажного воздуха; а также разница температур между прогнозируемым пунктом и приходящей воздушной массой должна составлять не менее 3 °С.

Фронтальные туманы в Иркутске за последние 5 лет наблюдались только при прохождении теплых фронтов волнами в параллельных потоках с северо-запада и холодных фронтов 1-го рода. Теплый фронт волнами смещается с северо-запада на юго-восток при определенном расположении барических образований. Над территорией юга Красноярского края должен располагаться крупный высотный антициклон или барический гребень, а над территорией Якутии циклон или крупномасштабная ложбина, между ними сформировывается высотно фронтальная зона (ВФЗ). В этой ВФЗ и будет располагаться зона теплого фронта волнами.

Чаще всего данная описанная синоптическая ситуация сопровождается серией ныряющих циклонов. Холодный фронт 1 рода определяется низкими скоростями смещения и слабым ветром. Примечательно, что туманы наблюдались чаще на холодном фронте, чем на теплом. Фронтальные туманы чаще наблюдаются в осенние и зимние месяцы, однако могут возникать и летом, и весной. Их формирование связано с определенными синоптическими условиями, такими как циклоны, оси ложбин и барические седловины. Метеорологические условия для образования фронтального тумана схожи как

при прохождении теплого, так и холодного фронта. К ним относятся: слабый ветер северо-западного или юго-восточного направления со скоростью 1-4 м/с; адвекция теплого влажного воздуха над холодной земной поверхностью в случае теплого фронта или адвекция холодного влажного воздуха над теплой влажной поверхностью; наличие приземной инверсии также играет роль в продолжительности фронтального тумана.

3.5 Анализ синоптических и метеорологических условий образования туманов на аэродроме Иркутск

Туман часто бывает сложно предсказать из-за множества факторов, таких как температура, влажность воздуха, скорость ветра и рельеф местности. Туманы формируются при различных синоптических и метеорологических условиях.

В том разделе подробнее будут рассмотрены случаи сложно прогнозируемых туманов. Так же будут представлены примеры условия образования радиационных, адвективно-радиационных и антропогенных туманов на аэродроме Иркутск. Для разбора синоптических и метеорологических ситуаций были выбраны примеры туманов разного типа с наибольшей продолжительностью, а также наиболее характерными для них условиями образования.

Радиационный туман наблюдался 15:32 - 23:42 ВСВ 24.06.2023 (с 23:32 24.06.2023 по 07:42 25.06.2023 по местному времени), продолжительностью 8 часов 10 минут. В это время на уровне земли преобладало малоградиентное поле повышенного давления, прохождение фронтальных разделов не прогнозировалось. Районы аэродрома находились под влиянием тыловой части циклона с низкими барическими градиентами и гребня тепла. Карта приземных фронтов АТ-850 гПа представлена на рис. 3.10, а термобарические

характеристики на геопотенциальной поверхности АТ-850 гПа – на рис. 3.11.

Туман образовался в условиях влажной воздушной массы (дефицит влажности составлял 0 °С), при незначительном снижении атмосферного давления на 0,5 гПа за три часа, при восточных и северо-восточных ветрах скоростью 1–2 м/с и ясном небе.

На высотах от 720 до 850 метров над уровнем моря была отмечена приподнятая инверсия температуры с амплитудой 2,2 °С. Такие инверсии способствуют условиям устойчивости воздушных масс. Аэрологическая диаграмма, составленная для станции Ангарск (находящейся на расстоянии 50 км от Иркутска, высота станции 437 м) на 00:00 ВСВ 25 июня 2023 года, приведена на рис. 3.12.

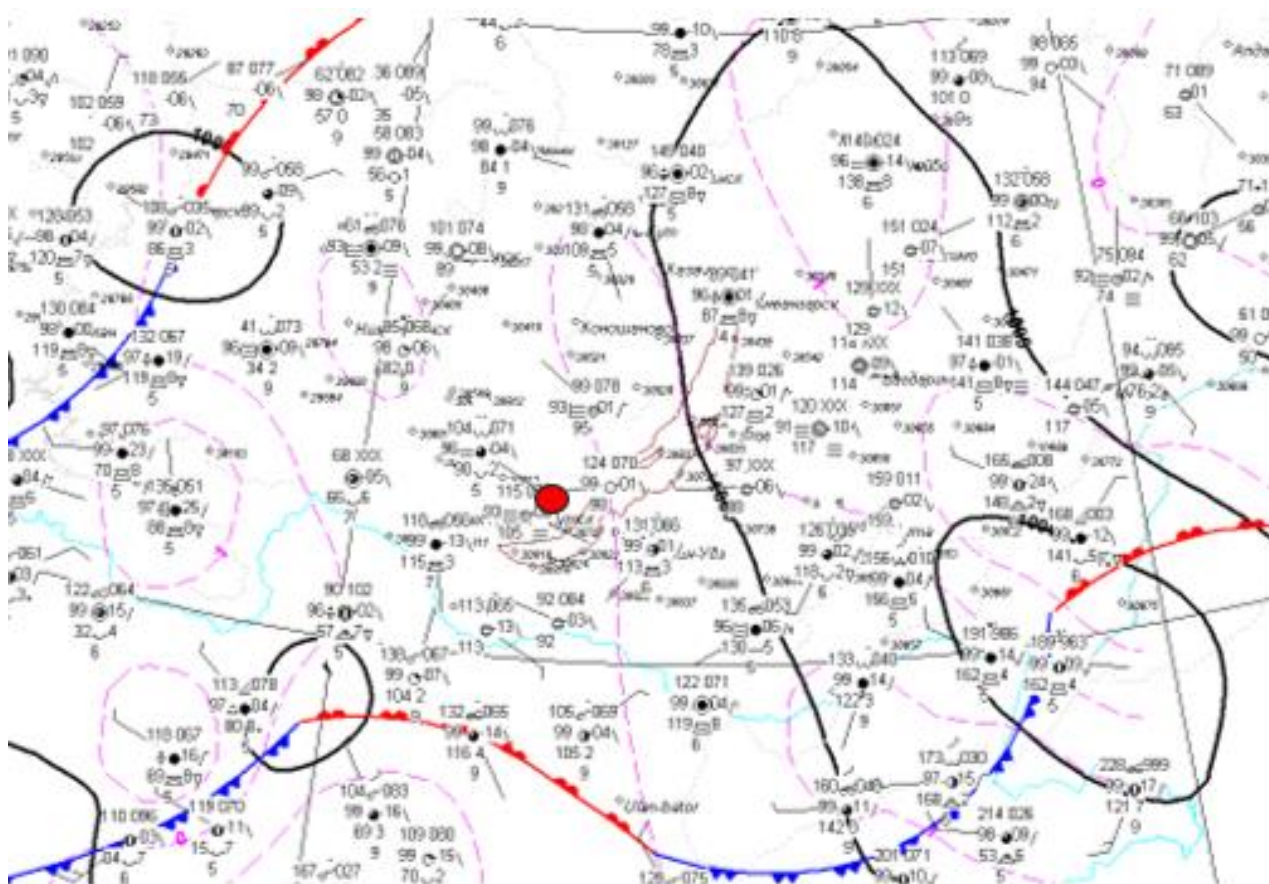


Рис. 3.10 – Кольцевая карта за 24.06.2023 21 ВСВ

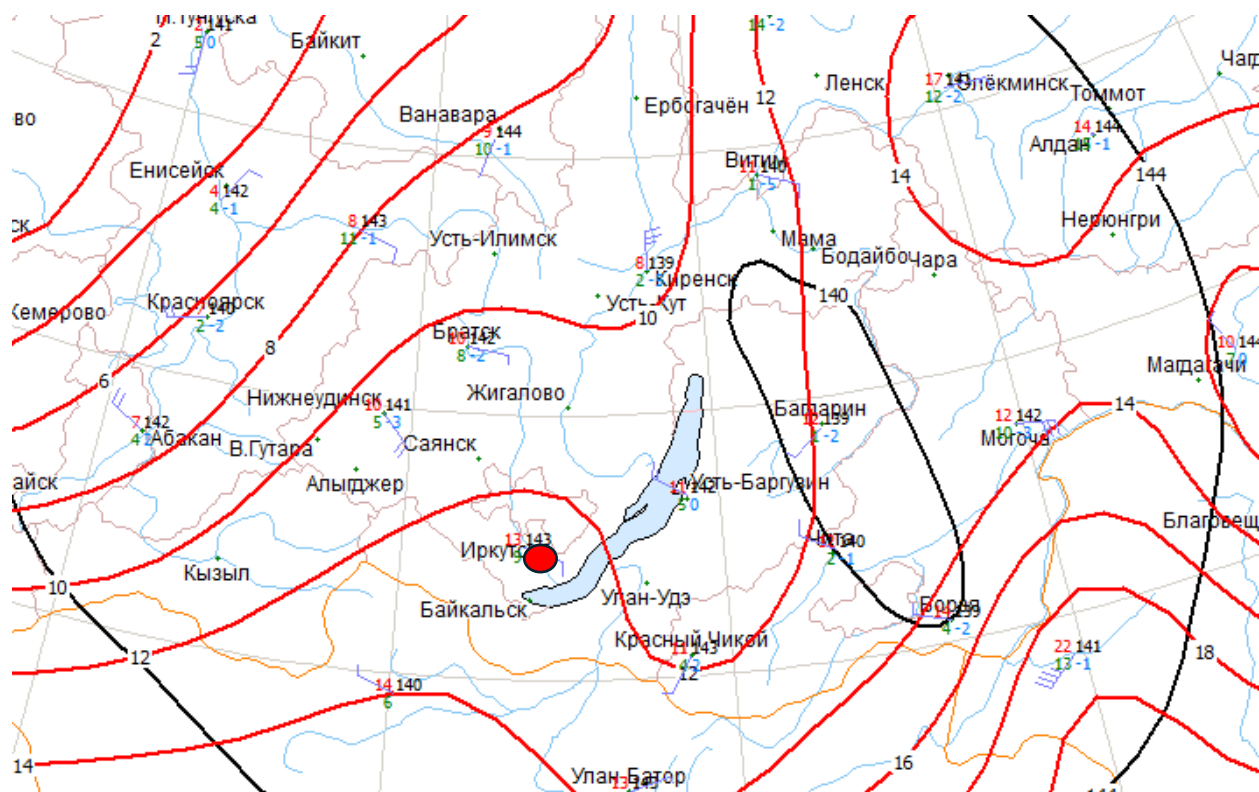


Рис. 3.11 - Карта АТ-850 гПа 25.06.2023 00 ВСВ

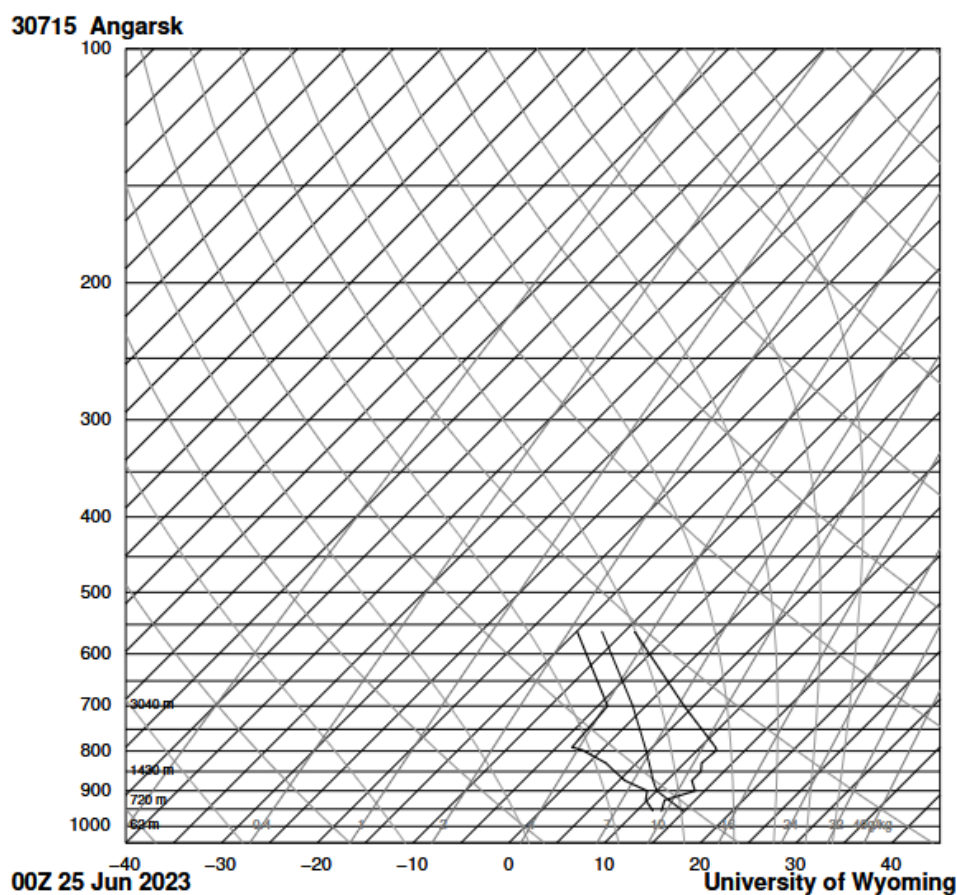


Рис. 3.12 – аэрологическая диаграмма 25.06.2023 00BCB станции Ангарск

Адвективно-радиационный туман был зафиксирован с 01:39 до 04:21 ВСВ 09 ноября 2019 года (по местному времени с 09:39 до 12:21), общей продолжительностью 2 часа 42 минуты. Влияние на районы аэродрома на уровне земли оказывал тёплый сектор циклона, о чём свидетельствуют данные кольцевой карты. Согласно картам АТ-850 гПа, район находился под воздействием тыловой части ложбины и гребня тепла. Кольцевая приземная карта с фронтальным анализом представлена на рисунке 3.13, а термобарическое поле на геопотенциальной поверхности АТ-850 гПа на рисунке 3.14.

Ночью перед образованием тумана наблюдался юго-восточный ветер со скоростью до 3 м/с. Во время тумана ветер стал неустойчивым со скоростью 1 м/с, а затем повернул на северо-восточное направление, что способствовало началу рассеивания тумана. Атмосферное давление снижалось на 1,5 гПа за каждые три часа. Наблюдалась значительная слоистая облачность на высоте ниже 150 метров.

Приземная инверсия температуры воздуха простиралась до высоты 1384 метра, её величина составляла 11,7 °С. Достаточно большое значение увеличения температуры с высотой привело к образованию слоистой облачности во влажной воздушной массе и постепенному опусканию ее до уровня земли. Аэрологическая диаграмма, составленная для ближайшей станции метеонаблюдений, показана на рисунке 3.15.

Данная синоптическая ситуация отличается от остальных туманов адвективно-радиационного характера своей редкостью. Если остальные случаи тумана происходят при малоградиентных барических полях или в полях повешенного давления, то в Иркутске туман образуется после восхода Солнца в ноябре при определенном расположении основных барических образований. В условиях устойчивого приземного слоя атмосферы, определяемого инверсией температуры и гребня тепла на АТ850 гПа, и влияния барической ложбины с севера от циклона, располагающегося над северной частью Восточной Сибири.

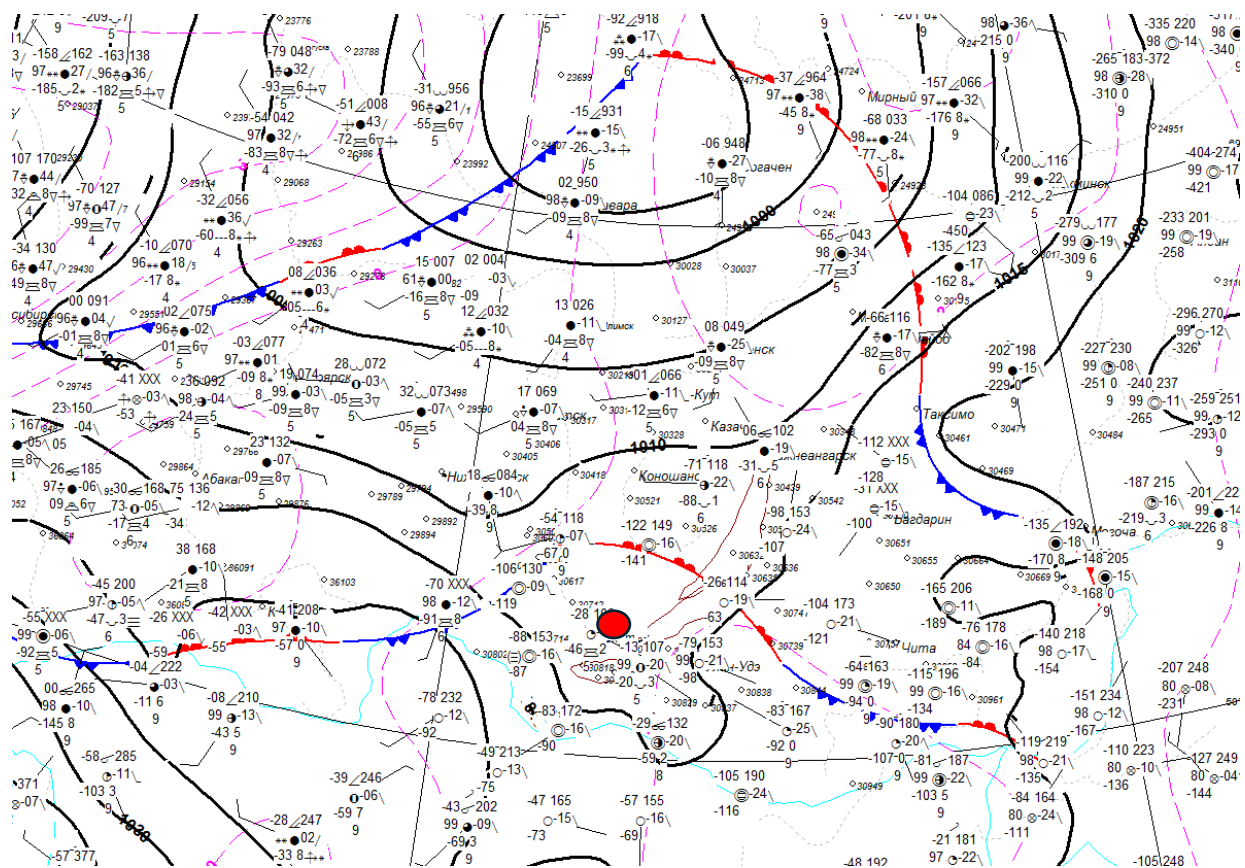


Рис. 3.13 – Кольцевая карта за 08.11.2019 21 ВСВ

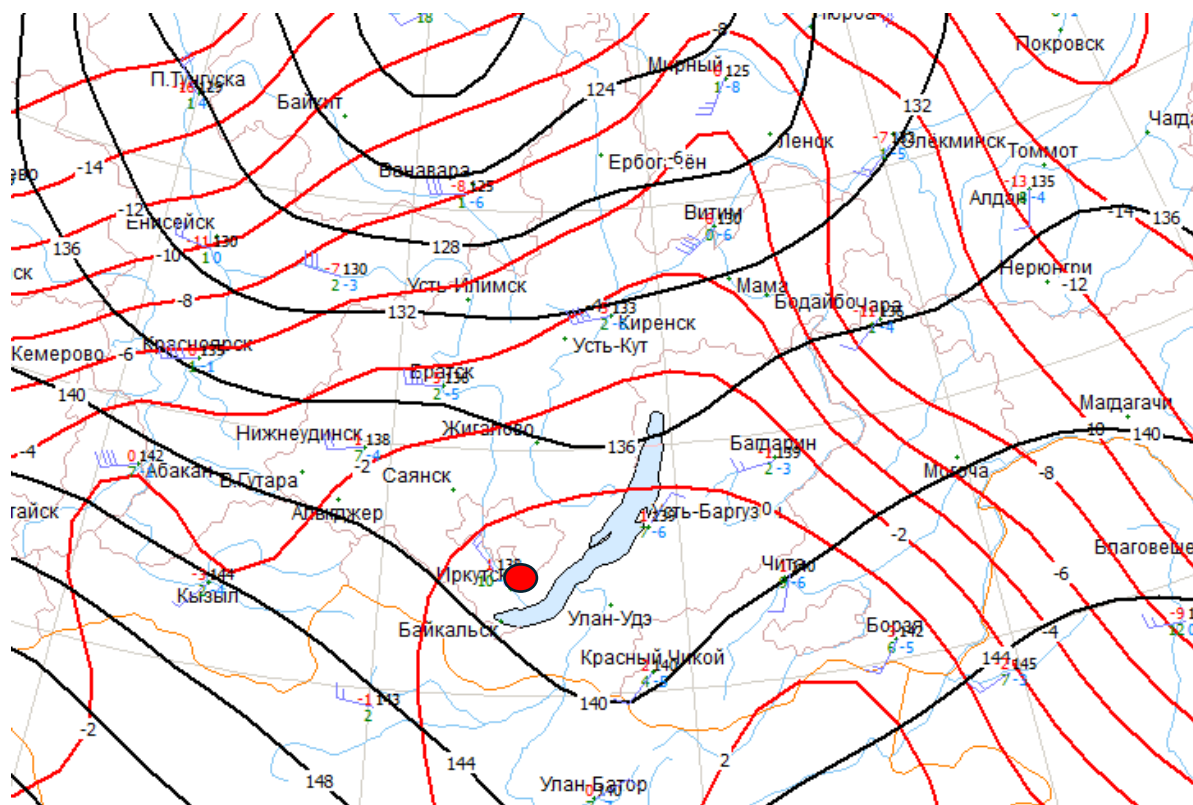


Рис. 3.14 - Карта АТ-850 гПа 09.11.2019 00 ВСВ

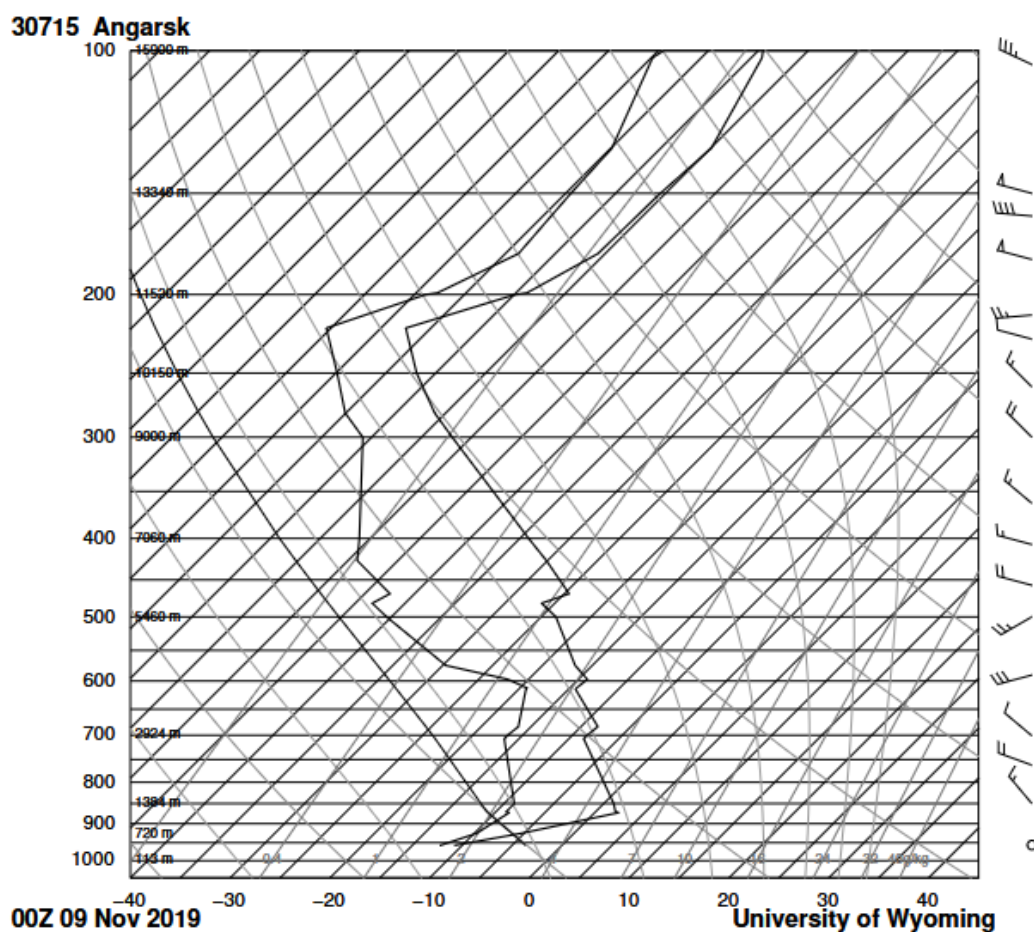


Рис. 3.15 – аэрологическая диаграмма 09.11.2019 00BCB станции Ангарск

Пример продолжительного адвективного тумана наблюдался 08.10.2020 с 04:06 до 13:18 местного времени. Непрерывная продолжительность явления составила 09 ч. 12 мин., что привело к нарушению регулярности полетов (уход AFL1442 а/к «Аэрофлот» на запасной аэродром Улан-Удэ в 01.23 ВСВ). Образование переохлажденного тумана наблюдалось во влажной воздушной массе (дефициты влаги 0 °С); при слабом падении атмосферного давления на 1,2 гПа/3 часа; неустойчивом ветре преимущественно северо-восточного направления 1-3 м/с; на фоне сплошной облачности верхнего яруса.

Адвекция теплого влажного воздуха была спровоцирована выходом южного циклона на районы Забайкалья. Кольцевая приземная карта с

фронтальным анализом представлена на рисунке 3.16, а термобарическое поле на геопотенциальной поверхности АТ-850 гПа на рисунке 3.17.

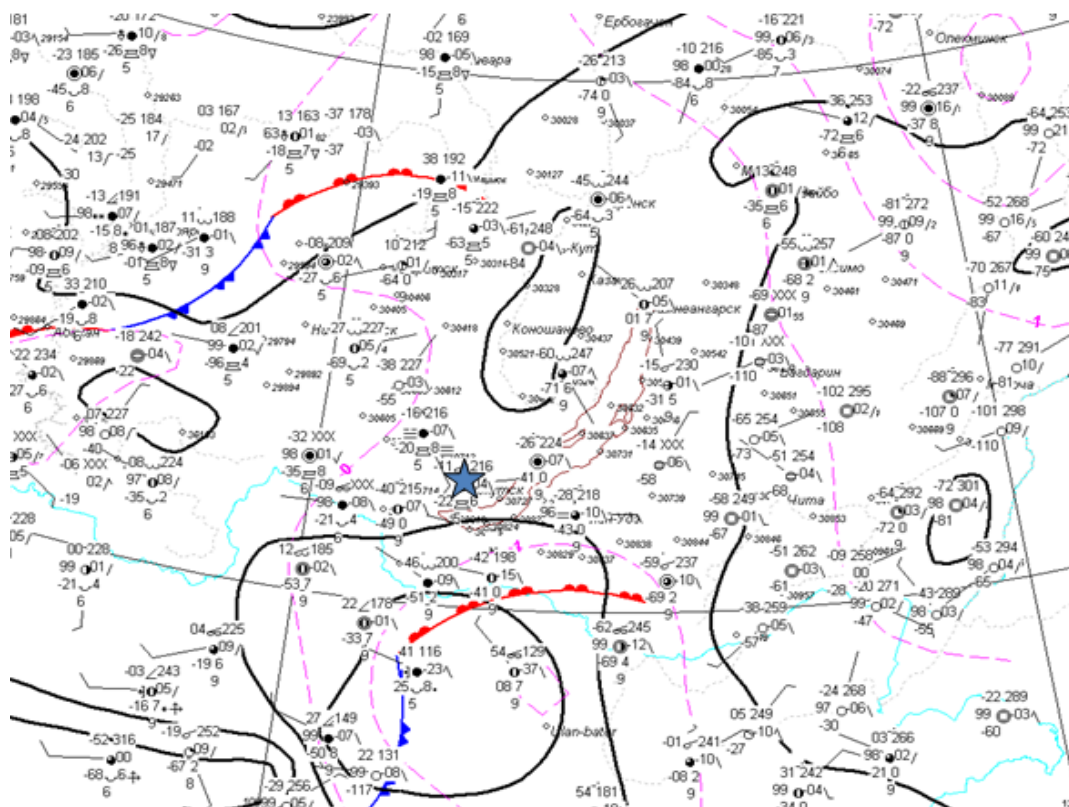


Рис. 3.16 – Кольцевая карта за 07.10.2020 21 ВСВ

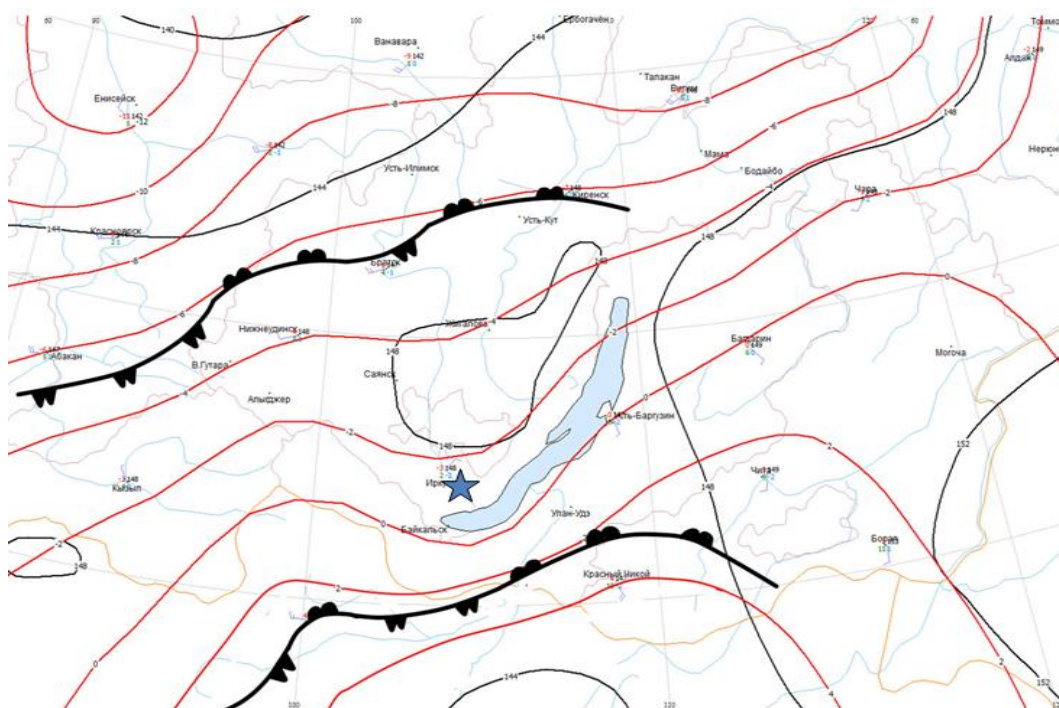


Рис. 3.17 - Карта АТ-850 гПа 08.10.2020 00 ВСВ

По картам приземного анализа видно, что на Иркутск оказывает влияние северная периферия южного циклона. Так же на районы аэродрома по карте АТ-850 гПа оказывали влияние размытое барическое поле и ложбина холода, но с постепенной адвекцией теплого воздуха и смещением высотного циклона на северо-восток. Южные циклоны сопровождаются приходом теплой и влажной воздушной массы с обильными и продолжительными осадками. Если по траектории приходящей частицы воздуха на районы Иркутска с юго-востока адвекция тепла составляет около 3 °С или больше, то перед осадками наблюдаются туманы.

Приподнятая инверсия наблюдалась на высоте от 340 до 531 метров, с величиной инверсии составляющей 2 °С. В диапазоне высот от 998 до 1281 метра инверсия равна 0,8 °С. Эти приподнятые инверсии создают условия устойчивости воздушной массы, способствующих образованию облаков и туманов. На рисунке 3.18 изображена аэрологическая диаграмма 08.10.2020 00BCB станции Ангарск.

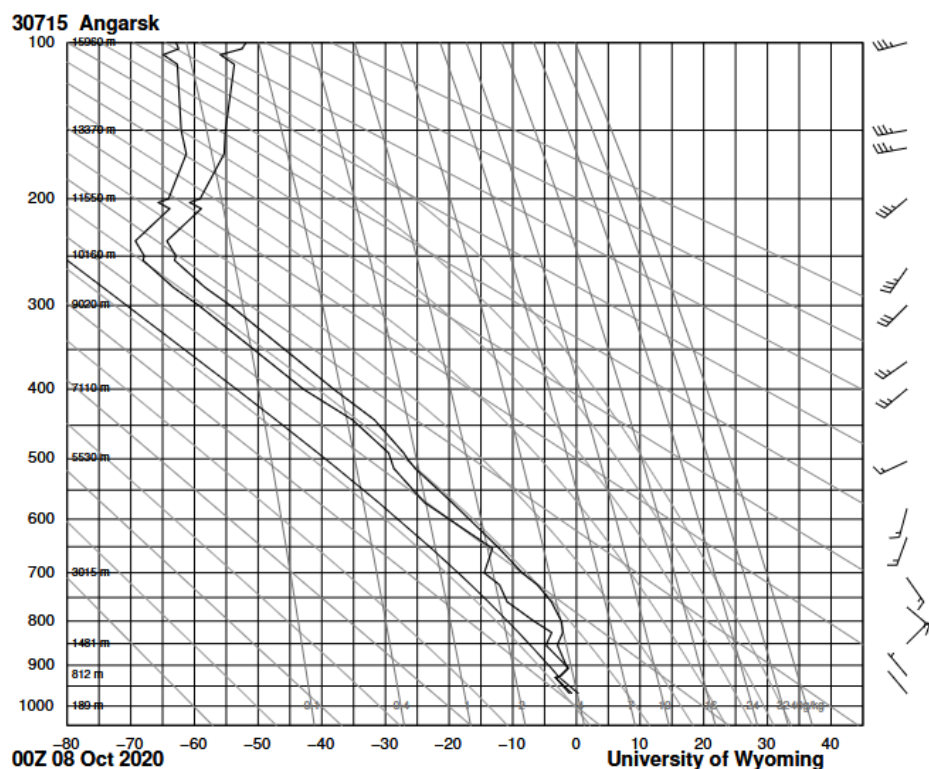


Рис. 3.18 – аэрологическая диаграмма 08.10.2020 00BCB станции Ангарск

Фронтальный туман, возникающий перед теплым фронтом волнами в параллельных потоках, начал образовываться 22:56 15 марта и продлился до 05:51 16 марта 2019 года, что составило в общей сложности 3 часа 20 минут. Между периодами тумана наблюдалась дымка с МДВ 1-3 километра, а непрерывная продолжительность тумана составила 1 час 3 минуты.

Образование переохлажденного тумана наблюдалось в условиях влажной воздушной массы с дефицитом влаги всего 1°C , а также при падении атмосферного давления на 1,3 гПа за 3 часа. Наблюдался неустойчивый ветер, дующий преимущественно с восточного и юго-восточного направлений со скоростью 1-3 м/с. В это время высота приподнятой инверсии была от 61 до 726 метров, при значении мощности 665 метров и величине инверсии в $2,9^{\circ}\text{C}$. Кольцевая приземная карта с фронтальным анализом представлена на рисунке 3.19, а термобарическое поле на геопотенциальной поверхности АТ-850 гПа на рисунке 3.20.

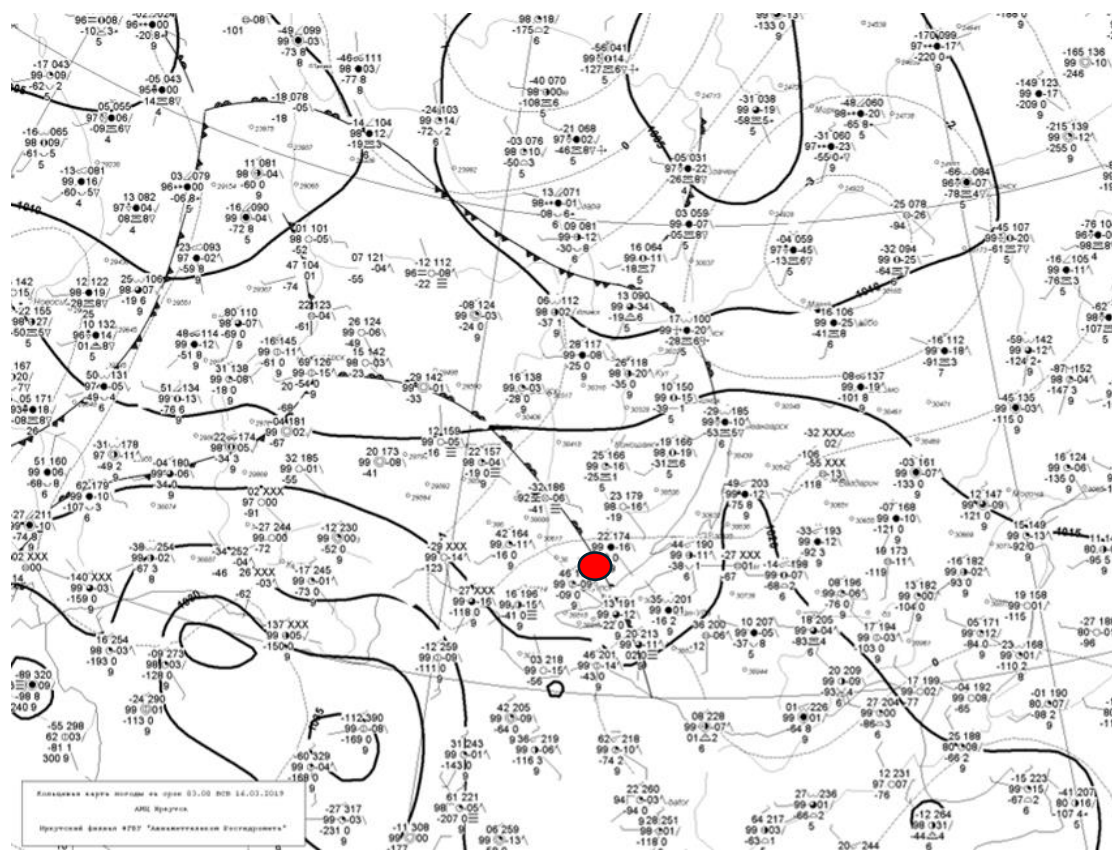


Рис. 3.19 – Кольцевая карта за 15.03.2019 21 ВСВ

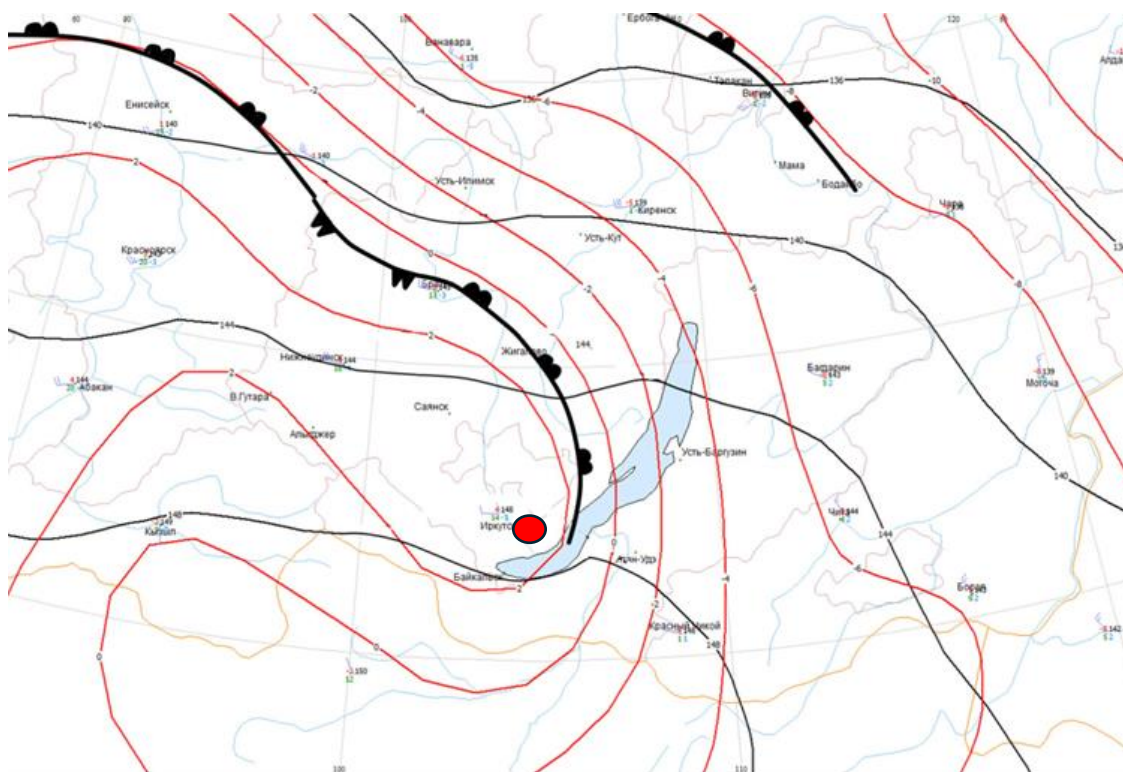


Рис. 3.20 – Карта АТ-850 гПа 16.03.2019 00 ВСВ

На рисунке 3.21 изображена аэрологическая диаграмма 16.03.2019 00 ВСВ станции Ангарск.

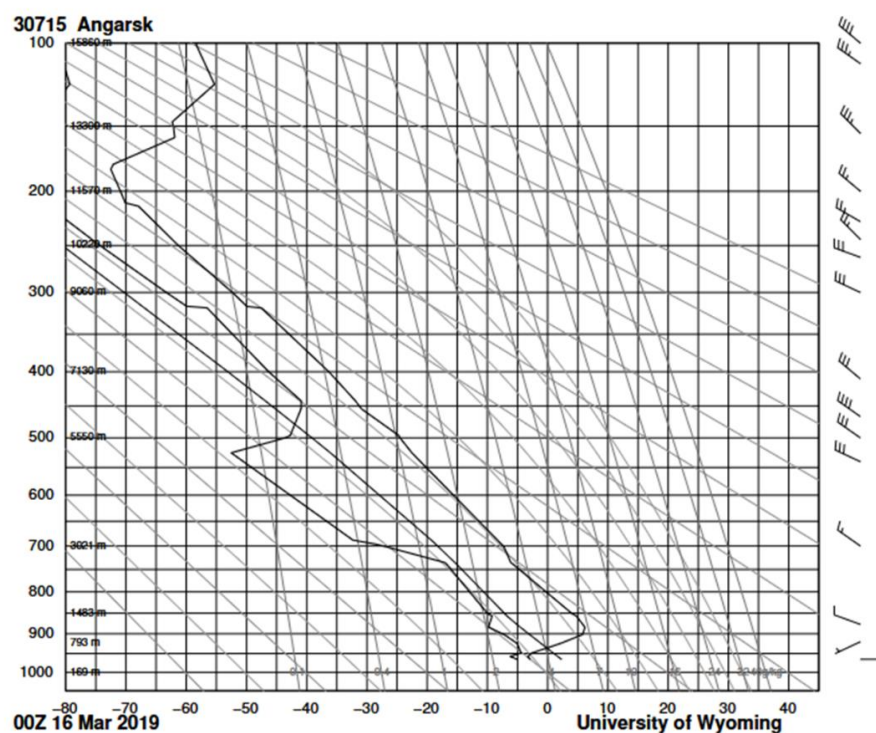


Рис. 3.21 – аэрологическая диаграмма 16.03.2019 00 ВСВ станции Ангарск

Фронтальный туман перед холодным фронтом первого рода наблюдался 24 декабря 2023 года 11:59 – 15:28 ВСВ (с 19:59 по 23:28 местного времени), что составило непрерывную продолжительность 3 часа 29 минут. Дополнительным фактором, способствовавшим образованию тумана, стали ядра конденсации, образующиеся от печного дыма с города.

Переохлажденный туман формировался в условиях влажной воздушной массы с дефицитом влаги 2 °С, при этом наблюдался рост атмосферного давления на 1,5 гПа за 3 часа. Ветер дул с северо-западного направления со скоростью 1-6 м/с.

Мощность приземной инверсии составила 559 метров, а величина инверсии достигала 10,9 градуса. Кольцевая приземная карта с фронтальным анализом представлена на рисунке 3.22, а термобарическое поле на геопотенциальной поверхности АТ-850 гПа на рисунке 3.23. На рисунке 3.24 изображена аэрологическая диаграмма 24.12.2023 12 ВСВ станции Ангарск.

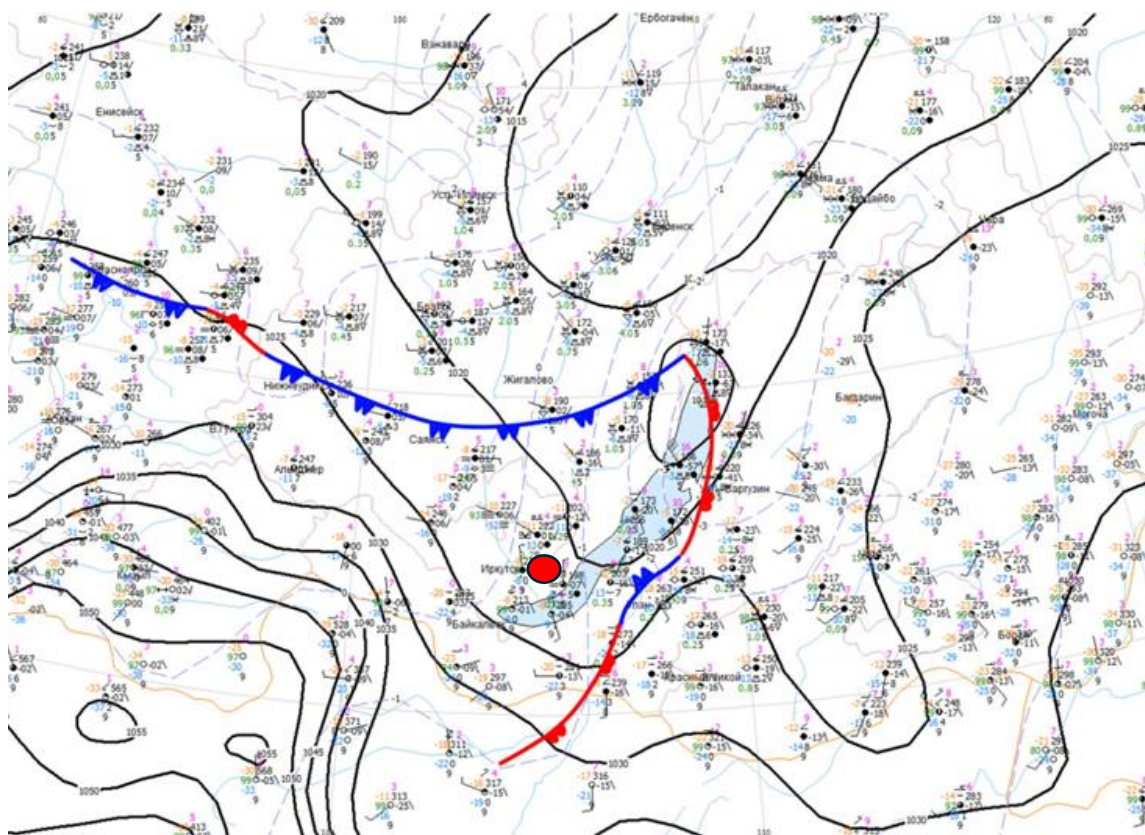


Рис.3.22 - Кольцевая карта за 24.12.2023 12 ВСВ

На аэродроме Иркутск туманы антропогенного характера встречаются довольно часто зимой и в исключительных случаях летом.

Антропогенные туманы можно рассмотреть на примере их образования в смоге от пожаров. Туман в дыму от пожаров самый продолжительный, который наблюдался в Иркутске за период исследования данной работы и ранее. С 15:12 ВСВ 08.08.2021 по 05:44 09.08.2021 наблюдался антропогенный туман с непрерывной продолжительностью 14 часов 32 минуты, после небольшого промежутка времени с видимостью в дыму менее 1500 метров туман простоял еще 12 часов 49 минут с 12:53 ВСВ 09.08.2021 по 01:42 10.08.2021. В общей сложности туман продержался около 27 часов. Туман 9 августа был вызван огромной концентрацией дыма от очагов лесных пожаров рядом с городом. Смог накрыл город плотной пеленой на несколько дней. Регулярность полетов не только в Иркутске, но и по большей части территории Восточной Сибири была нарушена. Кольцевая приземная карта с фронтальным анализом представлена на рисунке 3.25.

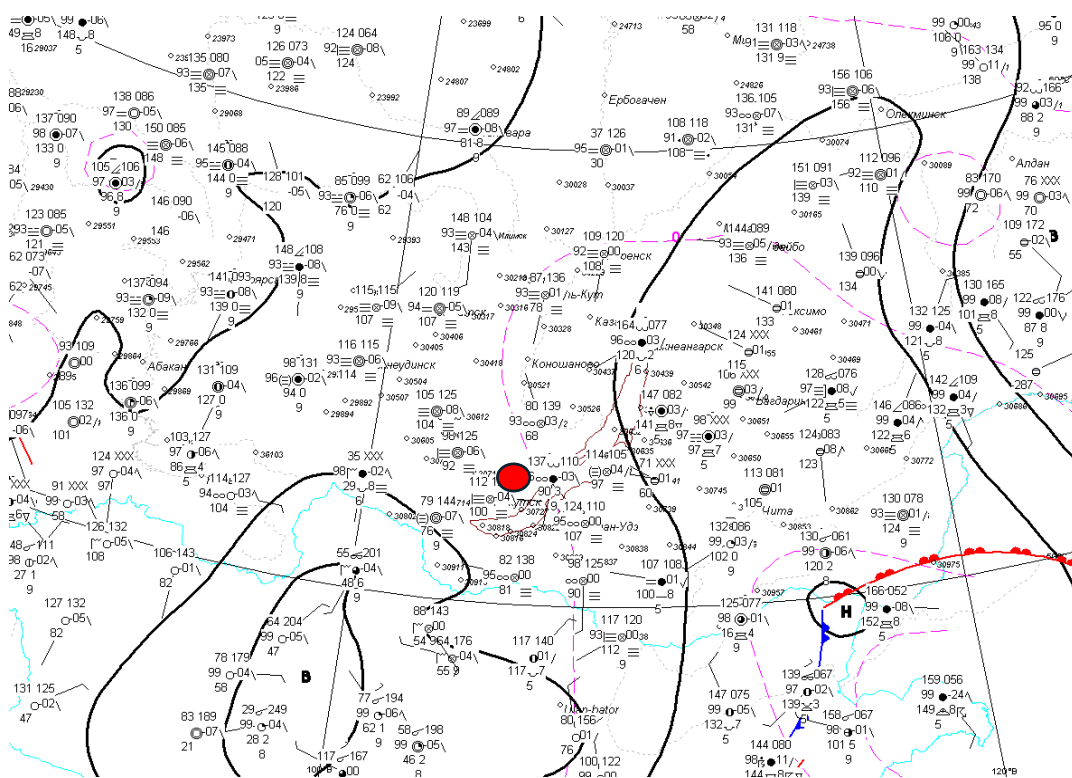


Рис.3.25 - Кольцевая карта за 08.08.2021 21ВСВ

На уровне земли на Иркутск оказывало влияние малоградиентное барическое поле повышенного давления. По картам АТ-850 гПа наблюдалось размытое барическое поле и гребень тепла в термическом поле.

Туман формировался в условиях влажной воздушной массы с дефицитом влаги 1 °С, при этом наблюдался рост атмосферного давления на 1,3 гПа за 3 часа. Ветер был неустойчивый 1 м/с.

Приземная инверсия наблюдалась до высоты 991 метра с величиной 0,6 градуса Цельсия. Приподнятая инверсия наблюдалась 1208 м по 1479 м с величиной инверсии 0,6. Термобарическое поле на геопотенциальной поверхности АТ-850 гПа на рисунке 3.26. На рисунке 3.27 изображена аэрологическая диаграмма 09.08.2021 00 ВСВ станции Ангарск.

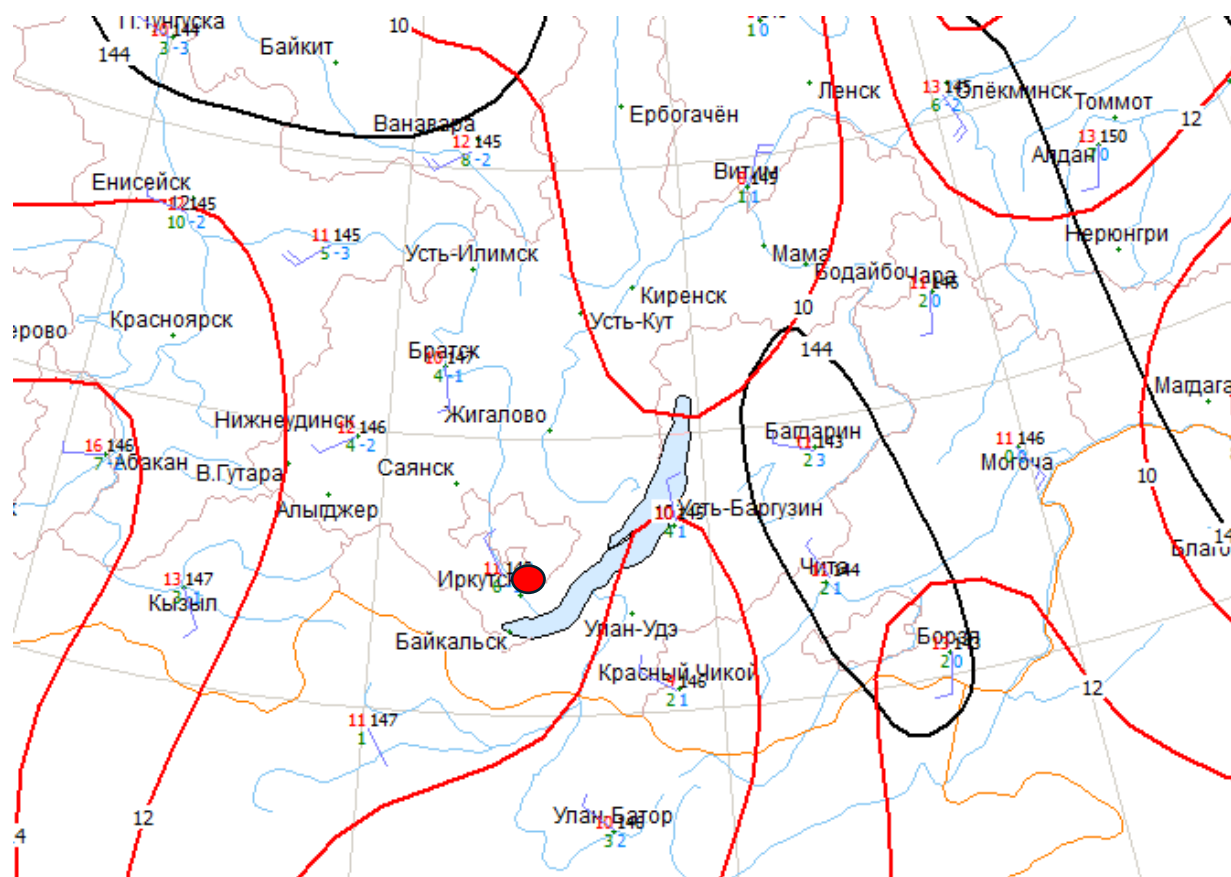


Рис. 3.26 - Карта АТ-850 гПа 09.08.2021 00 ВСВ

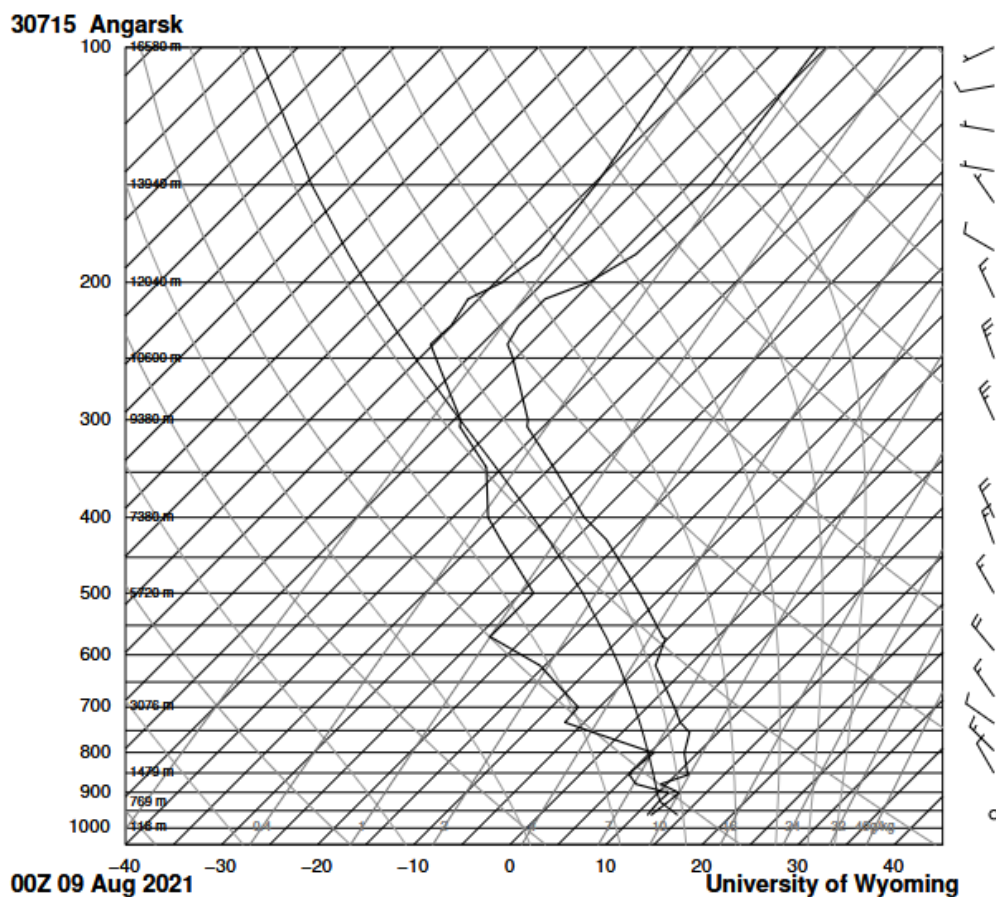


Рис. 3.27 – аэрологическая диаграмма 09.08.2021 00 ВСВ станции
Ангарск

Морозные туманы в Иркутске образуются зимой при экстремально низких температурах воздуха. Подобный туман наблюдался с 13:59 22.01.2023 по 03:30 23.01.2024. В течение ночи туман сменялся дымкой видимостью меньше 2000 метров. А непрерывная продолжительность тумана составила 4 часа 19 минут в утренние часы.

На уровне земли на Иркутск оказывала влияние ось барического гребня. По высотным картам АТ-850 гПа наблюдалась передняя часть гребня и гребень тепла. Кольцевая приземная карта с фронтальным анализом представлена на рисунке 3.28. Термобарическое поле на геопотенциальной поверхности АТ-850 гПа на рисунке 3.29.

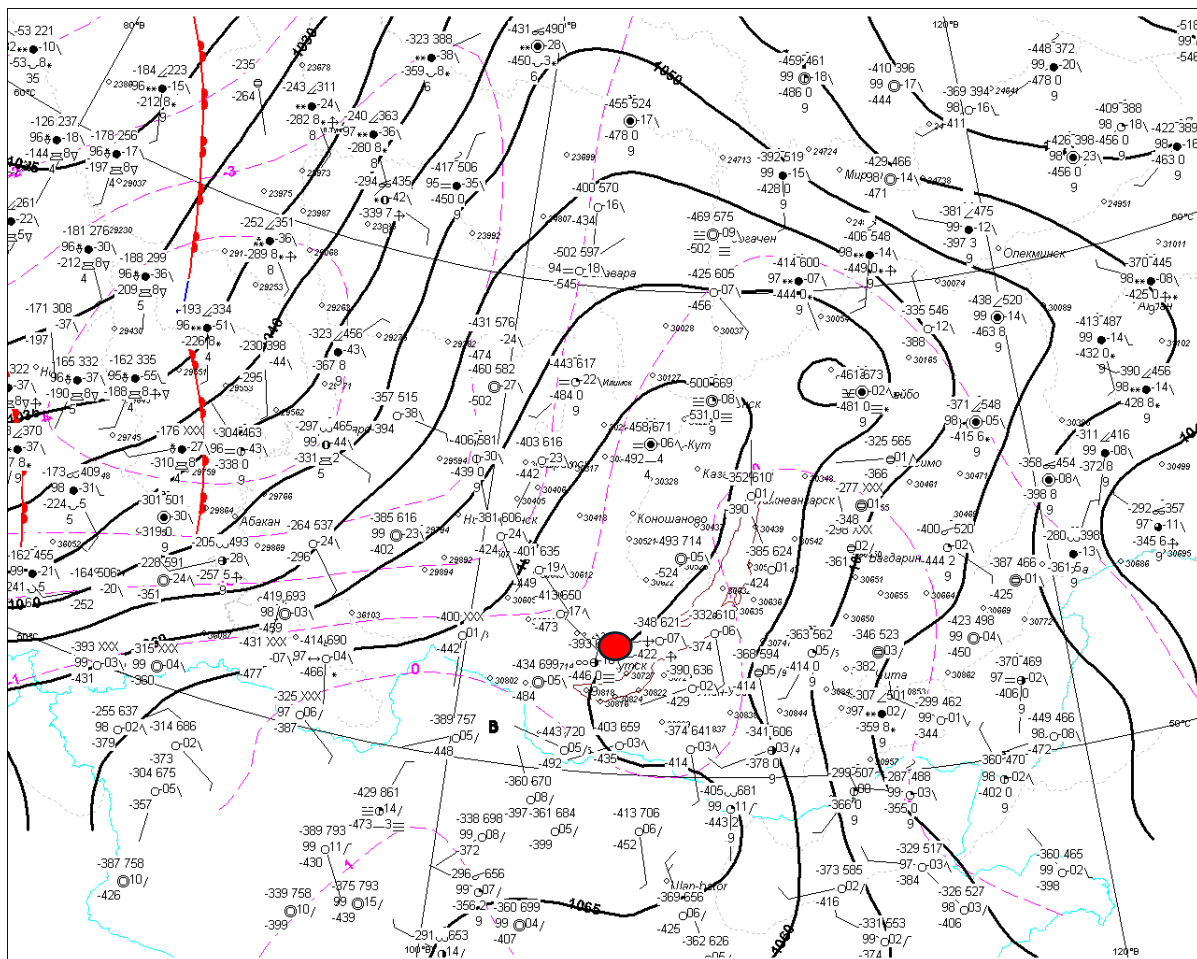


Рис.3.28 - Кольцевая карта за 22.01.2023 21 ВСВ

Туман формировался в условиях воздушной массы с дефицитом влаги 4 °С, влажность воздуха на момент образования тумана составила 56%, а максимальная влажность в течение ночи составила 84%. При этом наблюдался рост атмосферного давления на 0,7 гПа/3 ч. Ветер дул восточного направления со скоростью 1-3 м/с.

Наблюдалась мощная приземная инверсия от уровня земли до 1575м величиной 15,4 градуса Цельсия. На рисунке 3.30 изображена аэрологическая диаграмма 23.01.2023 00ВССВ станции Ангарск.

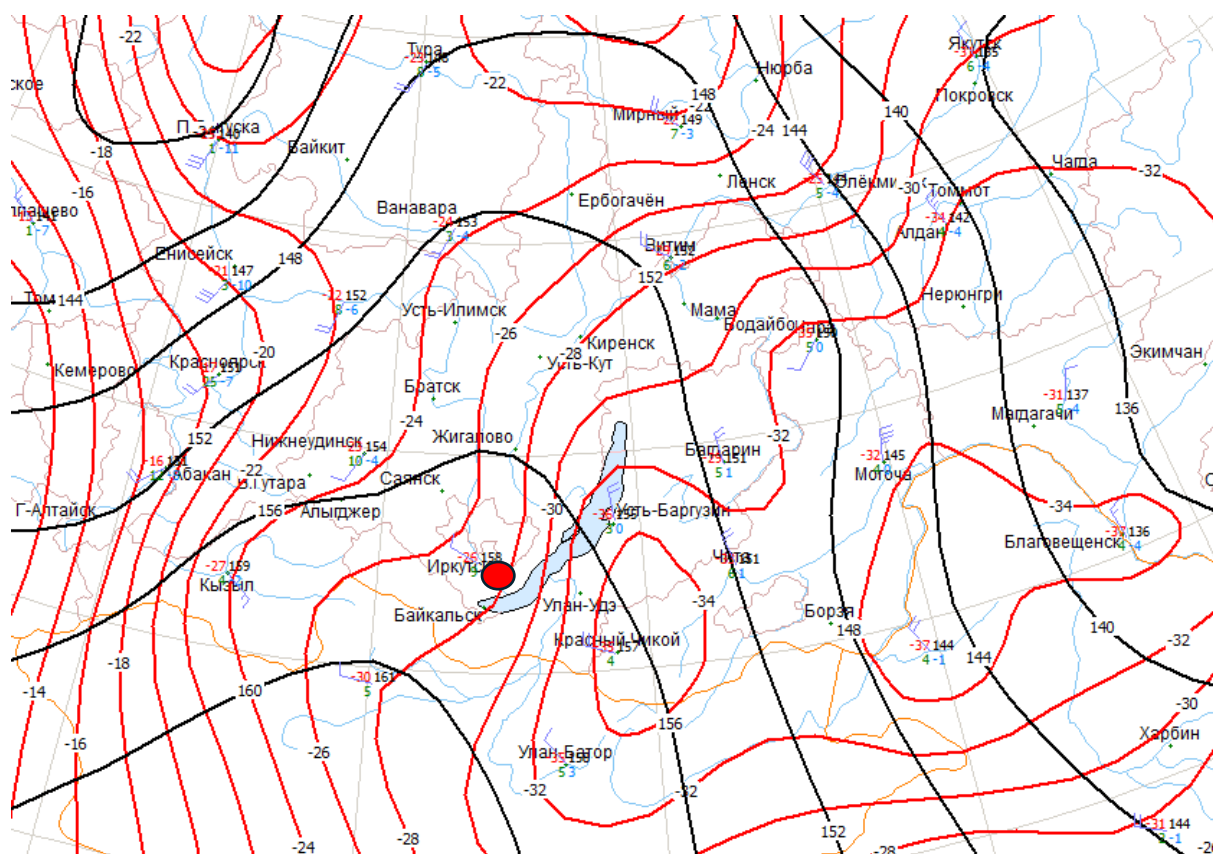


Рис. 3.29 - Карта АТ-850 гПа 23.01.2023 00 ВСВ

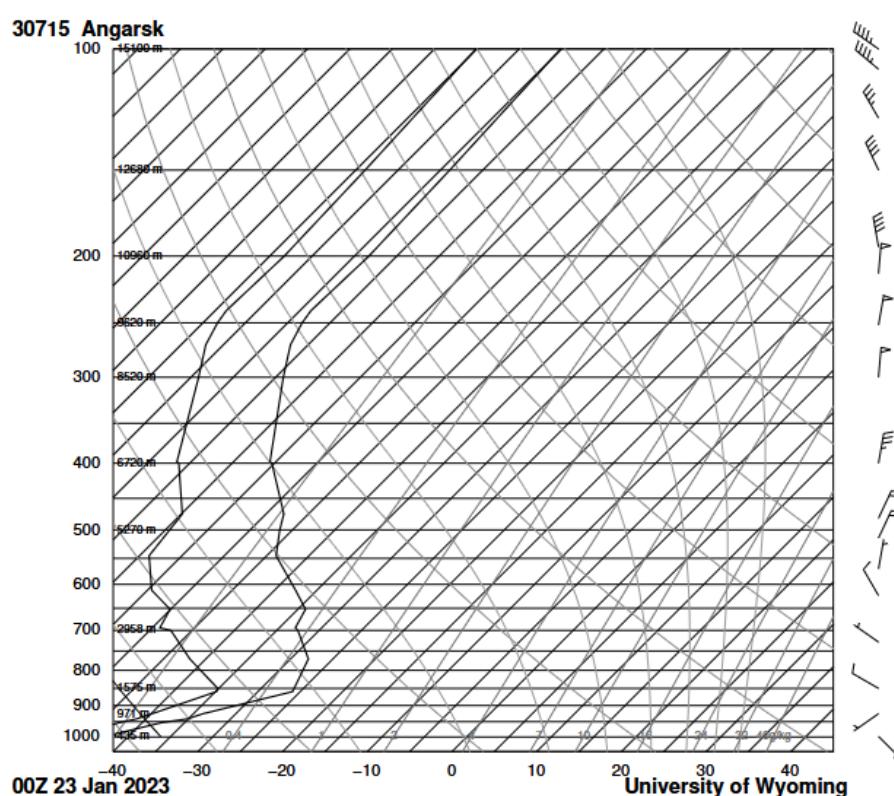


Рис. 3.30 – аэрологическая диаграмма 23.01.2023 00 ВСВ станции
Ангарск

Главное отличие городского тумана от морозного в больших значениях температуры и во времени его образования. Городской туман образуется преимущественно вечером во время интенсивной топки домашних печей. Городской туман образовался 14.01.2023 с 10:52 ВСВ по 11:42 ВСВ продержавшись всего 50 минут. Обычно такой туман не вызывает проблем с нарушением регулярности полетов, однако опасен для техники, так как есть риск обледенения. Городской туман образуется при температурах отрицательных не ниже -30°C , также он является переохлаждённым, поэтому в нем водяной пар находится в капельножидком состоянии.

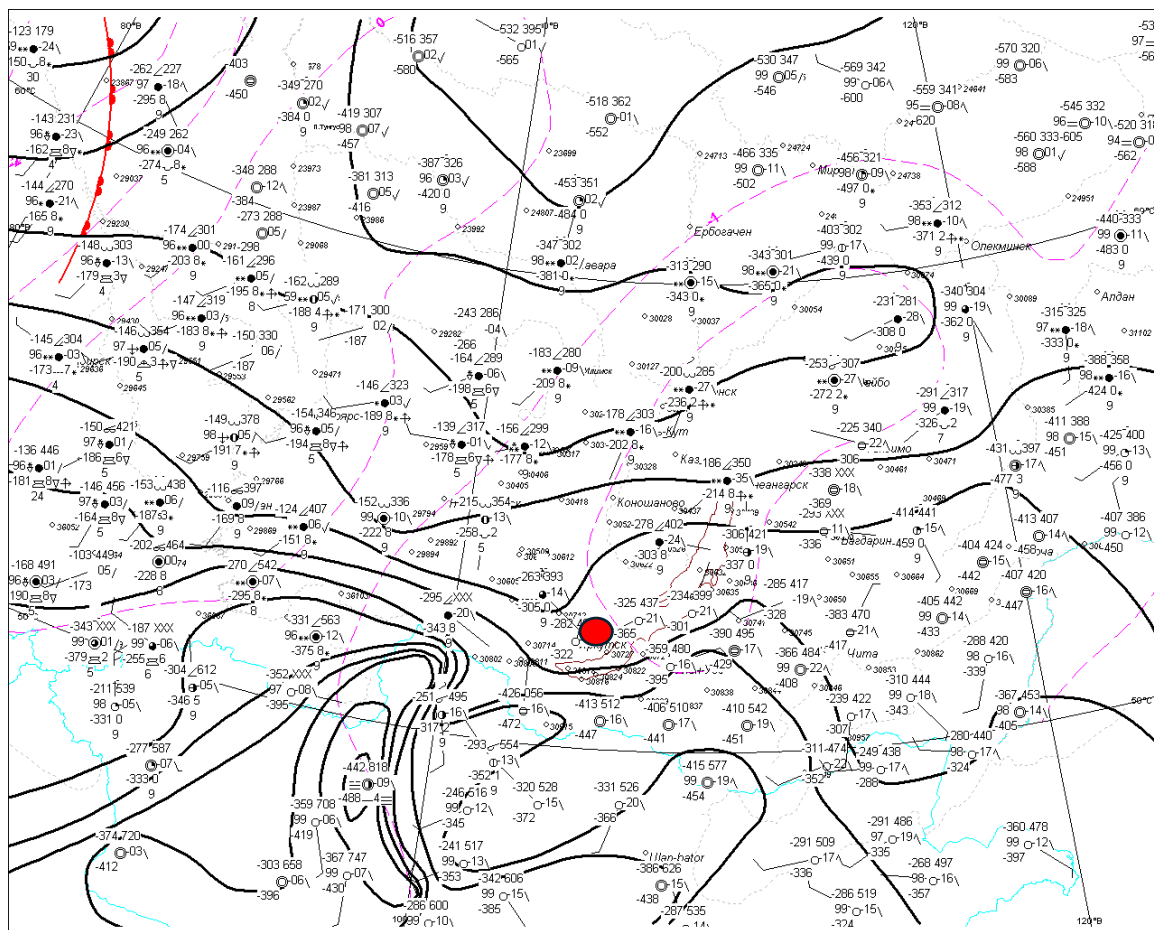


Рис.3.31 - Кольцевая карта за 14.01.2023 21ВСВ

На уровне земли на Иркутск оказывала северная периферия мощного Азиатского антициклона над западной частью Монголии. По высотным картам АТ-850 гПа наблюдалась зона взаимодействия крупномасштабного гребня с юго-запада и ложбины с северо-востока, а также гребень тепла. Кольцевая приземная карта с фронтальным анализом представлена на рисунке 3.31. Термобарическое поле на геопотенциальной поверхности АТ-850 гПа на рисунке 3.32.

Туман формировался в условиях влажной воздушной массы с дефицитом влаги 2 °С. При этом наблюдалось падение атмосферного давления на 0,4 гПа/3 ч. Ветер дул восточного направления со скоростью 1-3 м/с.

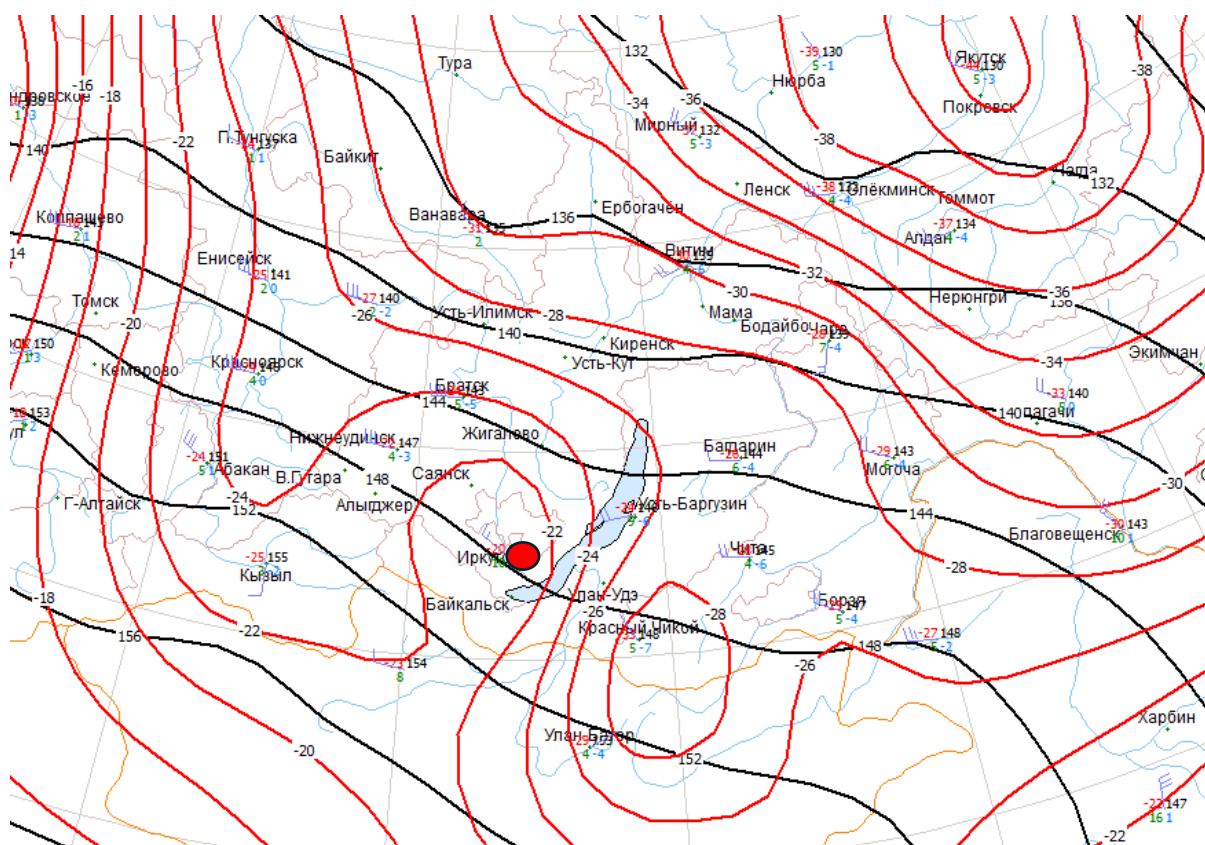


Рис. 3.32 - Карта АТ-850 гПа 14.01.2023 12 ВСВ

В вечерние часы наблюдалась приземная инверсия температуры мощностью 899 метров и величиной инверсии 8,8 градусов Цельсия.

На рисунке 3.33 изображена аэрологическая диаграмма 14.01.2023 12 ВСВ станции Ангарск.

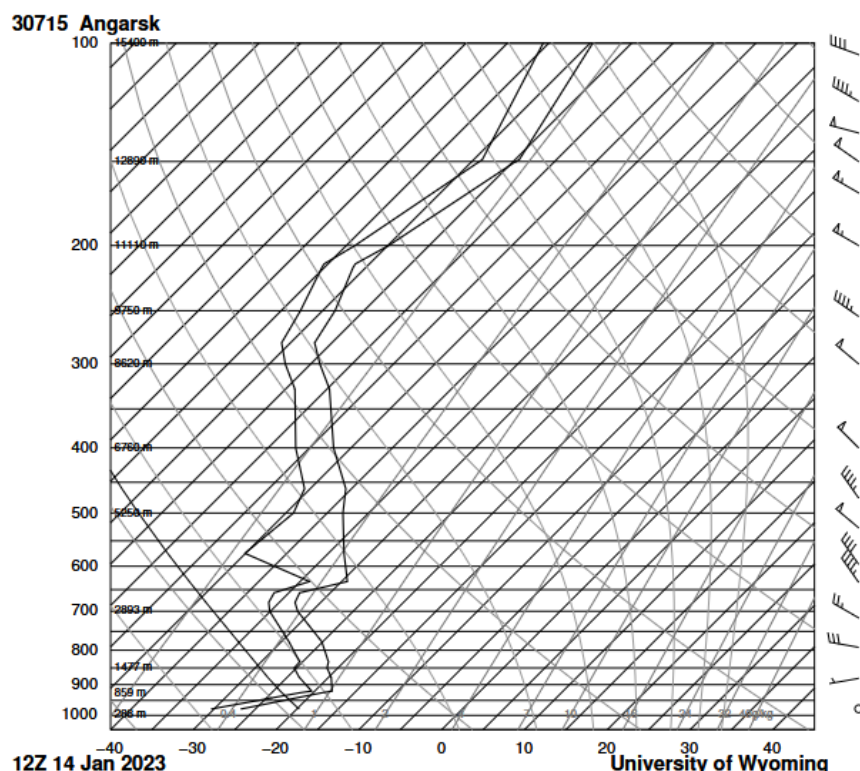


Рис. 3.33 – аэрологическая диаграмма 14.01.2023 12 ВСВ станции Ангарск

Прогнозирование туманов представляет собой сложную задачу из-за множества факторов, влияющих на их образование и развитие. Важно учитывать не только метеорологические параметры, такие как влажность, температура и давление, но и локальные особенности рельефа и микроклимата. Прогнозирование тумана так же основывается на барических и термических полях атмосферы, которые непосредственно влияют на устойчивость воздушной массы и турбулентное перемешивание. Наличие или отсутствие тумана может существенно влиять на безопасность полетов, поэтому точность прогнозов имеет критическое значение. К сожалению, туман предсказывать не всегда получается точно. Недоучет всех условий формирования тумана может обернуться ошибкой для синоптика. В той главе были рассмотрены случаи разных типов тумана, которые вызывают трудности при прогнозировании.

4. Рекомендации по прогнозированию тумана специалистам АМЦ Иркутск

4.1 Оправдываемость расчетного метода прогноза тумана

Применение метеорологической информации в хозяйственных целях направлено на сокращение убытков, связанных с опасными и неблагоприятными погодными условиями. Один из самых распространённых в нашей стране методов оценки экономической пользы метеорологических прогнозов был предложен Л.А. Хандожко. Для использования этого метода применяется обобщённая прогностическая и экономическая информация, представленная в форме матриц (универсальных таблиц для дискретного представления данных). Соответственно, для реализации прогнозов создаётся математическая модель, состоящая из двух ключевых компонентов [15].

Первый блок. Разработка матрицы сопряженности прогнозов, которая представляет собой обобщенный результат «прогноза (П) – факта (Ф)» за определенный период (месяц, сезон и т.п.), а также проведение оценки качества метеорологических прогнозов. Второй блок. Разработка матрицы потерь потребителя, которая является дискретным представлением функции потерь. Функция полезности отражает экономические последствия потребителя в зависимости от его действий на основании прогнозов и последующего осуществления защитных мероприятий и погоды [15].

В рамках настоящей работы потребуется лишь первая часть вычислений. Чтобы оценить эффективность прогнозов тумана, необходимо создать матрицы сопряженности для трёх методов прогноза. Данные для этих матриц будут рассчитываться с учётом реальных случаев туманов и гипотетических ситуаций, когда синоптические и метеорологические условия могли бы способствовать образованию тумана.

Создаются матрицы сопряженности для методических прогнозов, рассматриваемой метеорологической переменной и погодных явлений. Чаще всего применяются матрицы альтернативных прогнозов. Альтернативный прогноз включает одно из двух взаимоисключающих состояний погоды: ожидается (П) или не ожидается (не П). Анализ точности прогноза должен осуществляться на основе значительного количества прогнозов N . Адекватные оценки получаются при $N \geq 30$, а качественные — при $N \geq 100$ [16].

Критерии успешности позволяют численно оценивать результативность как методических, так и стандартных прогнозов. В этой работе будет использован один метод оценки успешности.

Общая оправдываемость прогнозов подразумевает отношение числа оправдавшихся прогнозов к общему количеству сделанных прогнозов. Общая оправдываемость альтернативного прогноза в процентах рассчитывается по формуле:

$$p = \frac{n_{11} + n_{22}}{N} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

где n_{11} и n_{22} — число случаев оправдавшихся прогнозов.

Для оценки оправдываемости метода прогноза тумана, используемого на аэродроме Иркутск, был выбран десятилетний период с 2013 по 2022. Так как наибольшее количество радиационных туманов наблюдается летом, будет оцениваться только летний сезон [13].

Анализ температур туманообразования и оценка методов прогнозов тумана происходил следующим образом по этапам:

1. Расчет температуры образования тумана тремя разными методами;
2. Сравнение температур туманообразования с минимальными температурами за ночь;
3. Подсчет элементов матрицы сопряженности;
4. Расчет оправдываемости прогнозов.

Для каждого метода были составлены матрицы сопряженности:

1) Прогноз туманов по методу А.С. Зверева:

Таблица 4.1 – Матрица сопряженности по методу А.С. Зверева

Фактически было (Ф)	Прогнозировалось (П)		Сумма Ф
	да	нет	
да	28	112	140
нет	45	735	780
Сумма П	73	847	920

Общая оправдываемость метода А.С. Зверева для аэродрома Иркутск:

$$P = (28+735)/920*100\%=82,9\%$$

2) Прогноз туманов по методу Н.В. Петренко:

Таблица 4.2 – Матрица сопряженности по методу Н.В. Петренко

Фактически было (Ф)	Прогнозировалось (П)		Сумма Ф
	да	нет	
да	79	61	140
нет	38	742	780
Сумма П	117	803	920

Общая оправдываемость метода Н.В. Петренко для аэродрома Иркутск:

$$P = (79+742)/920*100\%=89,2\%$$

3) Прогноз туманов по методу Б.В. Кирюхина:

Таблица 4.3 – Матрица сопряженности по методу Б.В. Кирюхина

Фактически было (Ф)	Прогнозировалось (П)		Сумма Ф
	да	нет	
да	65	75	140
нет	46	734	780
Сумма П	111	809	920

Общая оправдываемость метода Б.В. Кирюхина для аэродрома Иркутск:

$$P = (65+734)/920*100\%=86,8\%$$

Анализ результатов показал, что наиболее точным способом прогноза туманов для аэропорта Иркутск является метод Н.В. Петренко, с точностью предсказаний 89,2%. Метод Б.В. Кирюхина также показывает высокую эффективность, обеспечивая точность 86,8%, а метод А.С. Зверева имеет результативность 82,9%. Несмотря на различия, все три подхода могут считаться действенными инструментами для прогнозирования, поскольку их точность превышает 80% [13].

4.2 Методы улучшения прогноза тумана на аэродроме Иркутск

При прогнозировании тумана настало время отказаться от устаревших подходов, которые не учитывают комплексность климатических и метеорологических факторов. Старые методы часто полагаются на простые статистические данные, не принимая во внимание сезонные изменения, что может привести к неоправдавшимся прогнозам. Например, туманы разного типа могут формироваться в зависимости от времени года и местных особенностей, и игнорирование этих факторов может существенно повлиять на результаты прогнозов. В методических рекомендациях, применяемых на аэродроме Иркутск с 2011 года, не были учтены случаи образования туманов в барических ложбинах, при прохождении теплого фронта, а также отрицалось образование тумана при адвекции холода в поле АТ-850 гПа. После проведенного анализа данных параметров и условий образования туманов за пятилетний период исследования, есть возможность опровергнуть ошибочные заключения.

Недостаточная точность таких методов может поставить под угрозу безопасность авиационных перевозок. Оценка местных особенностей, таких как рельеф и наличие водоемов, также играет важную роль в формировании тумана. Принимая во внимание ожидаемый тип тумана и соответствующие метеорологические условия, можно значительно повысить качество прогнозов. Таким образом, переход на комплексный синоптический подход необходим для эффективного прогнозирования туманов.

На основе проведенного анализа сезонности явления, синоптической обстановки и ключевых метеопараметров были разработаны рекомендации для синоптиков Иркутского аэропорта. Для обобщения и систематизации информации об условиях образования тумана на аэродроме Иркутск с учетом местных особенностей, синоптических и метеорологических факторов были составлены таблицы 4.4 - 4.6.

Таблица 4.4 – Рекомендации по прогнозированию туманов охлаждения на аэродроме Иркутск по анализу данных за период 2019-2023

Туманы охлаждения			
Тип тумана	Метеорологические условия	Синоптические условия	Локальные условия
Радиационный	• Ветер: штиль, неустойчивый 1 м/с, преимущественно восточный до 3 м/с • Приземная инверсия температуры • Выхолаживание земной поверхности	• Уровень моря: гребень, антициклон, седловина, малоградиентное барическое поле • АТ-850 гПа: барический гребень, антициклон, размытое барическое поле, гребень или очаг тепла	• Сезон: лето, осень • Осадки в течение суток
Адвективно-радиационный	• Ветер: северо-западный 1-4 м/с, юго-восточный 1-3 м/с, северо-восточный 1-4 м/с • Приземная или приподнятая инверсия температуры • Выхолаживание земной поверхности • Адвекция теплого влажного воздуха	• Уровень моря: гребень, западная и восточная периферии антициклона, теплый сектор циклона, малоградиентное барическое поле, тыловая часть ложбины • АТ-850 гПа: барический гребень, антициклон, размытое барическое поле, гребень или очаг тепла, ложбина холода	• Сезон: лето, осень, зима • Осадки в течение суток • Дополнительные потоки влажной воздушной массы при северо-западном ветре с реки Ангара осенью • Таяние снега в дневное время, как фактор увлажнения подстилающей поверхности
Адвективный	• Ветер: юго-восточный или северо-восточный до 3 м/с • Приподнятая инверсия температуры • Адвекция теплой и влажной воздушной массы на холодную поверхность	• Уровень моря: северная периферия южного циклона • АТ-850 гПа: барическая ложбина, гребень тепла	• Смещение южного циклона с юго-запада на районы Забайкалья, Бурятии • Осадки в течение суток

Таблица 4.5 – Рекомендации по прогнозированию туманов испарения на аэродроме Иркутск по анализу данных за период 2019-2023

Туманы испарения			
Тип тумана	Метеорологические условия	Синоптические условия	Локальные условия
Фронтальный (холодный фронт)	- Ветер: северный или северо-западный 2-6 м/с - Приземная глубокая инверсия температуры (разрушается при прохождении холодного фронта и усилении ветра более 7 м/с) - Адвекция влажного холодного воздуха на теплую поверхность	- Влияние холодного фронта 1 рода - Уровень моря: циклон, тыловая часть циклона, ложбина - АТ-850 гПа: тыловая часть барической ложбины, ложбины холода, очаг тепла (при продолжительных туманах)	- Прохождение фронта в вечернее и ночное время - Предфронтальный туман - Иногда туман наблюдается со слабыми осадками
Фронтальный (теплый фронт)	- Ветер: штиль, неустойчивый 1 м/с, северо-западный до 3 м/с - Приземная глубокая инверсия температуры - Адвекция теплого влажного воздуха на холодную подстилающую поверхность	- Прохождение теплого фронта волнами в параллельных потоках (зоне ВФЗ) - Уровень моря: ось ложбины, тыловая часть ложбины - АТ-850 гПа: ось барической ложбины, гребень тепла	- Направление ветра по ведущему потоку от 300° до 350° - Сезон: весна, зима - Время суток: утро, вечер, ночь - Предфронтальный туман
Парения	- Ветер: северо-западный до 3 м/с - Приземная инверсия - Разница температур между водой и воздухом составляет больше 8°C	- Уровень моря: антициклон, северная периферия антициклона - АТ-850 гПа: барический гребень, гребень тепла	Перенос влажной воздушной массы с водохранилища и реки Ангара

Таблица 4.6 – Рекомендации по прогнозированию антропогенных туманов на аэродроме Иркутск по анализу данных за период 2019-2023

Антропогенные туманы			
Тип тумана	Метеорологические условия	Синоптические условия	Локальные условия
Морозный	• Температура воздуха -39°C и меньше • Ветер: штиль, неустойчивый 1 м/с • Приземная инверсия	• Уровень моря: антициклон, малоградиентное барическое поле, ось гребня • АТ-850 гПа: барическая ложбина, гребень тепла или ложбина холода	• Дополнительные ядра конденсации от сгорания топлива самолетов
Городской	• Отрицательная температура воздуха до -30 °С • Ветер: северо-западный 1-2 м/с • Приземная инверсия	• Уровень моря: ось ложбины, гребень, седловина • АТ-850 гПа: барическая ложбина, гребень или очаг тепла	• Дополнительные ядра конденсации с города
Смог	• Ветер: штиль, неустойчивый 1 м/с • Приземная инверсия • Положительная температура воздуха	• Уровень моря: малоградиентное барическое поле, антициклон, ложбина • АТ-850 гПа: барический гребень, гребень или очаг тепла	• Очаги лесных пожаров, распространяющиеся по потоку ветра дымом и смогом на Иркутск

Эти рекомендации направлены на улучшение качества прогнозов туманов, что особенно важно для обеспечения безопасности воздушных перевозок. Также в рекомендации включено влияние локальных факторов на формирование тумана. Таким образом, внедрение данных рекомендаций позволит синоптикам составлять точный прогноз туманов.

Заключение

В результате проведенного исследования туманов на аэродроме Иркутск в период с 2019 по 2023 год были выявлены ключевые характеристики и закономерности, связанные с ухудшением видимости менее 1 км.

Туманы на аэродроме Иркутск имеют четко выраженный годовой ход с максимальным количеством туманов летом и постепенным снижением их числа к весне.

Суточный ход тумана зависит от времени захода и восхода солнца. Поэтому можно выделить по сезонам года, что летом повторяемость туманов больше в 06:00 местного времени, осенью в 07:00, зимой туманы образуются и вечером (19:00-23:00), и утром после восхода солнца (08:00). Весной туманы появлялись при прохождении атмосферных фронтов и их время возникновения не зависело от солнечных ритмов.

Наибольшая повторяемость у туманов продолжительностью менее часа (34%). Максимальная непрерывная продолжительность тумана в Иркутске составила 13 часов. Повторяемость тумана как опасного явления для авиации (более 5 часов) составила 18%.

Наибольшее количество туманов в Иркутске наблюдалось радиационного и адвективно-радиационного характера. Туманы антропогенного происхождения встречались чаще туманов при прохождении атмосферного фронта. Так же туманы на холодном фронте более вероятны, чем на теплом, ввиду особенностей рельефа и географического положения. Реже всего наблюдались адвективные туманы.

Туман на аэродроме Иркутск образуется при разных синоптических положениях. Наиболее сложными для прогнозирования являются туманы адвективного и фронтального происхождения.

Для формирования радиационных туманов необходимы условия устойчивой атмосферы в малоградиентных барических полях, антициклонах и седловинах.

При прогнозировании адвективно-радиационного тумана следует оценивать влияние адвекции влажной воздушной массы в приземном слое и радиационного охлаждения воздуха, а также турбулентного перемешивания. Туман появляется в осях ложбин, а также в передней и тыловой частях ложбины, в тылу циклонов, в теплых секторах циклонов, на восточных перифериях антициклонов, в седловинах и малоградиентных полях.

Туманы испарения образуются в результате парения водных объектов, таких как реки и водохранилища, и часто наблюдаются в осенний период. Обычно парение водоемов является дополнительным фактором образования тумана других типов.

Условия образования туманов антропогенного характера (городские, морозные и туманы от дымов лесных пожаров) схожи с условиями для радиационных и адвективно-радиационных туманов. Основное различие заключается в том, что в качестве ядер для конденсации выступают мелкие частицы, такие как пепел, дым или продукты сгорания топлива самолетов.

Адвективные туманы в Иркутске возникали исключительно с выходом южных циклонов на территорию Забайкалья.

Фронтальные туманы в Иркутске за последние 5 лет наблюдались только при прохождении теплых фронтов волнами в параллельных потоках с северо-запада и холодных фронтов 1-го рода.

На данный момент специалисты АМЦ Иркутск используют для прогноза радиационных туманов метод А.С. Зверева, который соответствует необходимому уровню оправдываемости (более 80%), однако для улучшения прогнозирования тумана рекомендуется использовать дополнительно методы Н.В. Петренко и Б.В. Кирюхина с большим процентом оправдываемости.

Использование информации из таблиц рекомендаций по прогнозированию туманов на аэродроме Иркутск может принести положительные результаты в работе специалистов с прогностическими функциями и улучшить оправдываемость авиационных прогнозов TAF и GAMET.

Полученные данные подчеркивают важность учета метеорологических и синоптических факторов для прогноза такого опасного явления для авиации как туман. Дальнейшие исследования в этой области могут способствовать улучшению прогнозирования туманов и повышению безопасности полетов.

Список литературы

1. Атлас облаков / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. Обсерватория им. А.И. Воейкова; [Д. П. Беспалов и др. ; ред.: Л. К. Сурыгина]. – Санкт-Петербург : Д'АРТ, 2011. – 248 с.
2. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология [текст] / В.И. Воробьев. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
3. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии / О.Г. Богаткин. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. – 339 с.
4. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. / Под ред. С. Л. Белоусова и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1986.
5. Хандожко Л.А. «Региональные синоптические процессы», методическое пособие, 1988 – 93-99 с.
6. Мазин И. П. Облака, строение и физика образования / И. П. Мазин, С. М. Шмистер. - Л.: Гидрометеиздат, 1983. - 278 с.
7. Хромов С.П., Петросянц М.А. «Метеорология и климатология», учебник – Москва, 2006 г. – 584 с.
8. Богаткин О.Г. Практикум по курсу «Основы авиационной метеорологии» [текст] / О.Г. Богаткин. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. – 136 с.
9. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА – 95) [текст] / М.: изд. Росгидромет, 1995. – 160 с.
10. Богаткин О.Г. Авиационные прогнозы погоды [текст] / О.Г. Богаткин. – 2-е изд., стереотипное. – СПб.: БХВ - Петербург, 2010. – 288 с.
11. Федеральные авиационные правила «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов», утвержденные Приказом Минтранса от 03.03.2014 г. № 6
12. Полянская Е.А. «Синоптические процессы Восточной Сибири и Дальнего Востока», учебное пособие, 1 часть, 2011 – 13 с.

13. Ахмадеева А.И., Линникова С.А. Оценка успешности прогнозов тумана на аэродроме Иркутск в летние месяцы. В сборнике: Материалы II международной научно-практической конференции «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития». – СПб., 2024. – С. 216-221.
14. Латышева И.В. Климатическое описание аэродрома Иркутск / Латышева И.В. – Иркутск, 2021. – 227 с.
15. Хандожко Л. А. Оценка успешности метеорологических прогнозов. – Л.: ЛПИ, 1977. – 65 с.
16. Дробжева Я.В., Волобуева О.В. Метеорологические прогнозы и их экономическая полезность: учебное пособие /Дробжева, Волобуева. – СПб.: Адмирал, 2016. – 116 с.
17. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. – М.: Триада лтд, 2016. – 312 с.