



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

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ
РАБОТА**
(магистерская диссертация)

На тему: «Спутниковый мониторинг режима туманов»

Исполнитель

Кудряшов Степан Борисович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

Кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Абанников Виктор Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

- И.О. Заведующего кафедрой

(подпись)

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

Дробжева Яна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«02» 06. 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

1. Особенности образования и классификация туманов	5
1.1. Анализ процессов формирования туманов	5
1.2. Основные разновидности туманов	16
1.3. Антропогенные туманы	23
1.4. Причины возникновения антропогенных туманов в Якутске и пути решений их последствий	26
2. Анализ режима туманов в сочетании с метеорологическими факторами ..	29
2.1. Физико-географические и климатические особенности Якутска	29
2.2. Анализ характеристик режима туманов в Якутске	31
2.3. Особенности формирования туманов в Якутске	34
2.4. Сезонность туманов в городской черте Якутска	36
2.5. Режим туманов в Якутске: климатические особенности и антропогенное влияние	38
2.6. Анализ сочетания метеорологических характеристик с туманами	43
3. Дистанционное зондирование туманов в Якутии	49
3.1. Методология спутникового наблюдения: технологические аспекты и практическое применение	49
3.2. Спутниковый мониторинг туманов в Якутии: комплексный анализ методов и технологий.	57
3.3. Методика обработки и анализа данных спутникового мониторинга ледяных туманов в Якутии	67
3.4. Практические приложения спутникового мониторинга туманов в Якутии	69
Заключение	77
Список литературы	79

Введение

Якутск, столица Республики Саха (Якутия), выделяется не только культурно-историческим наследием, но и экстремальными климатическими условиями. Находясь в зоне вечной мерзлоты, город регулярно сталкивается с аномально низкими температурами, способствующими формированию зимних ледяных туманов. Это опасное метеорологическое явление создает серьезные риски для городской инфраструктуры и здоровья населения, что обуславливает необходимость его систематического наблюдения.

Ледяные туманы представляют собой приземные скопления ледяных кристаллов, образующиеся при температурах ниже -30°C и повышенной влажности. В условиях Якутска их интенсивность усиливается за счет антропогенных факторов: промышленных выбросов, работы котельных и транспортных средств, которые поставляют в атмосферу дополнительные ядра конденсации. Подобные туманы резко снижают видимость, создавая аварийные ситуации на дорогах и нарушая авиасообщение. Длительное воздействие ледяного тумана может провоцировать заболевания дыхательных путей и обострение хронических патологий у горожан.

Существующие методы мониторинга, основанные на данных метеостанций, обладают существенными недостатками: ограниченным охватом территории, субъективностью оценок и недостаточной оперативностью. В этой связи внедрение спутниковых технологий дистанционного зондирования представляется перспективным решением для комплексного изучения данного явления.

Современные спутниковые системы, оснащенные мультиспектральными сенсорами (видимого, ИК и микроволнового диапазонов), позволяют осуществлять мониторинг пространственного распределения, динамики и физических характеристик ледяных туманов в режиме реального времени. Получаемые данные могут быть использованы для

совершенствования систем оповещения, оптимизации транспортной инфраструктуры и разработки природоохранных мероприятий.

В рамках настоящего исследования проводится комплексный анализ возможностей спутникового мониторинга ледяных туманов в Якутске. Особое внимание уделяется: механизмам формирования туманов, применяемым типам спутниковых данных, алгоритмам их обработки, а также перспективам интеграции космических наблюдений с наземными измерениями и атмосферными моделями. Результаты работы могут способствовать повышению безопасности жизнедеятельности в условиях экстремального северного климата.

В крупных городских агломерациях наблюдаются специфические условия для образования туманов, обусловленные значительными выбросами промышленных отходов и автомобильных выхлопов. Эти загрязняющие вещества выступают в качестве активных ядер конденсации, что приводит к возникновению тумана уже при относительной влажности воздуха от 75%.

В качестве исследовательской базы использованы метеорологические данные станции Якутск за десятилетний период (2012-2022 гг.), с особым акцентом на детальный анализ зимнего сезона 2021-2022 гг. Методика исследования включала статистическую обработку следующих параметров:

- среднесуточные показатели температуры воздуха
- значения атмосферного давления
- частота случаев туманообразования

Проведенный анализ позволил выявить характерные закономерности формирования туманов в условиях экстремального северного климата.

Актуальность исследования. Туман представляет собой одно из наиболее значимых атмосферных явлений в городской среде, наблюдаемое в течение всего года. Как опасное метеорологическое явление (ОЯП), он сопровождается резким снижением горизонтальной видимости до 1 км и менее из-за скопления водяных капель, ледяных кристаллов или их комбинации с дымом (смог). В случаях, когда видимость падает ниже 50 м,

продолжительность превышает 12 часов, а охват территории города или акватории порта составляет более 30%, туман классифицируется как особо опасное явление погоды (ООЯП).

Помимо прямого влияния на транспортную инфраструктуру, туманы способствуют ухудшению экологической обстановки в городах. В таких условиях концентрация загрязняющих веществ (ЗВ) может превышать предельно допустимые нормы в десятки и даже сотни раз. Взаимодействие этих веществ с влагой тумана приводит к образованию агрессивных химических соединений (кислотных или щелочных), которые могут обладать токсичными свойствами. Высокий уровень загрязнения негативно воздействует на экосистемы города и пригородов, здоровье населения, а также разрушает объекты культурного наследия.

Частая повторяемость туманов в отдельных районах города способствует ухудшению экологической ситуации, что, в свою очередь, снижает стоимость земельных участков и недвижимости.

Научная и практическая значимость работы обусловлена высокой пространственной изменчивостью туманов на ограниченных территориях. Точный учет их микроклиматических особенностей крайне важен для:

- Разработки оптимальных градостроительных решений,
- Планирования инфраструктуры в городах с повышенной повторяемостью туманов (более 12–15 дней в месяц).

Таким образом, исследование направлено на решение актуальных задач, связанных с минимизацией рисков, вызванных туманами, и оптимизацией городской среды в условиях их частого возникновения.

1. Особенности образования и классификация туманов

1.1. Анализ процессов формирования туманов

Туманы как метеорологический феномен представляют собой визуальное проявление сложных термодинамических процессов в приземном слое атмосферы. Их генезис обусловлен взаимодействием множества факторов, создающих уникальные условия для фазовых переходов водяного пара. Физическая природа этого явления коренится в процессах переноса тепла и влаги, где ключевую роль играет достижение точки насыщения воздушных масс.

Формирование туманного покрова начинается с охлаждения воздушного слоя до температуры, при которой происходит конденсация или сублимация водяного пара. Этот процесс может развиваться по различным сценариям в зависимости от доминирующего механизма теплообмена. Наиболее распространенным является радиационный путь, когда земная поверхность теряет тепло через инфракрасное излучение в условиях ясного неба и слабой ветровой активности. В таких случаях формируются устойчивые приземные инверсии, способствующие аккумуляции охлажденных воздушных масс в топографических понижениях.

Альтернативный механизм связан с адвективными процессами, когда теплые влажные воздушные массы перемещаются над холодной подстилающей поверхностью. В этом случае вертикальный градиент температуры создает условия для постепенного охлаждения нижних слоев атмосферы. Особенно ярко этот процесс проявляется в прибрежных регионах, где морские воздушные потоки взаимодействуют с охлажденными континентальными поверхностями.

В условиях урбанизированных территорий процесс туманообразования приобретает специфические черты. Городская застройка модифицирует термический режим приземного слоя, создавая локальные зоны повышенной

температуры ("острова тепла"), которые взаимодействуют с окружающими холодными воздушными массами. Одновременно техногенные аэрозоли, выбрасываемые промышленными предприятиями и транспортными системами, выступают в качестве дополнительных ядер конденсации, существенно интенсифицируя процесс образования туманных масс.

Особый интерес представляют кристаллические туманы, формирующиеся в условиях экстремально низких температур. Их образование связано с прямым переходом водяного пара в твердую фазу, минуя жидкое состояние. Этот процесс требует специфических условий - температуры ниже -30°C при одновременном наличии достаточного количества водяного пара и ядер сублимации. В арктических регионах такие туманы могут сохраняться в течение длительного времени, создавая устойчивый покров из ледяных кристаллов.

Микроклиматические особенности местности существенно влияют на характеристики формирующихся туманов. Рельеф территории определяет особенности циркуляции воздушных масс, способствуя либо рассеиванию, либо накоплению туманных образований. Гидрологические условия, включая наличие водоемов и степень увлажнения территории, регулируют баланс влаги в приземном слое атмосферы. Все эти факторы в совокупности создают уникальную картину туманообразования в каждом конкретном регионе.

Эволюция туманного покрова представляет собой динамический процесс, включающий стадии формирования, стабилизации и рассеивания. Продолжительность каждой стадии зависит от метеорологических условий, сезонных факторов и особенностей подстилающей поверхности. В современных условиях изменение климатических параметров вносит дополнительные переменные в этот процесс, модифицируя традиционные схемы туманообразования и создавая новые, ранее не наблюдавшиеся сценарии развития этого атмосферного явления.

Туман как физико-метеорологический феномен представляет собой результат сложного взаимодействия термодинамических процессов в

пограничном слое атмосферы. Генезис этого явления обусловлен комплексом взаимосвязанных механизмов, приводящих к достижению состояния перенасыщения водяного пара и последующей его конденсации или сублимации.

Центральным звеном в процессе туманообразования выступает механизм охлаждения воздушных масс до температуры точки росы. Этот процесс может реализовываться через несколько физических сценариев. Наиболее распространённым является радиационное выхолаживание подстилающей поверхности, когда в ночные часы при ясном небе и слабом ветре происходит интенсивная потеря тепла через длинноволновое излучение. В таких условиях формируется выраженный приземный температурный инверсионный слой, создающий идеальные предпосылки для аккумуляции охлаждённого воздуха в топографических депрессиях.

Альтернативный путь охлаждения связан с адвективным переносом тёплых влажных воздушных масс над холодной подстилающей поверхностью. В данном случае ключевую роль играет вертикальный теплообмен между нижними слоями атмосферы и поверхностью, приводящий к постепенному выхолаживанию перемещающегося воздушного потока. Особенно интенсивно этот механизм проявляется при взаимодействии морских воздушных масс с охлаждёнными континентальными поверхностями или ледовыми покровами.

Существенное значение в процессе туманообразования имеет испарительный механизм, когда дополнительное насыщение приземного воздуха водяным паром происходит за счёт испарения с тёплых водных поверхностей. Этот процесс характерен для переходных сезонов года, когда сохраняется значительный контраст между температурой воды и окружающего воздуха. Образующиеся в таких условиях туманы отличаются специфической локализацией и суточной динамикой.

В условиях урбанизированных территорий механизм туманообразования существенно модифицируется под влиянием антропогенных факторов. Техногенные аэрозоли выступают в качестве

активных ядер конденсации, существенно снижая порог относительной влажности, необходимый для начала процесса туманообразования. Одновременно городская застройка изменяет характер теплообмена и воздушных потоков, создавая специфические условия для формирования устойчивых туманных образований.

Особый класс механизмов связан с образованием ледяных туманов в условиях крайне низких температур. В этом случае ключевую роль играет процесс сублимации водяного пара, минуя жидкую фазу. Такие условия требуют сочетания экстремального холода (ниже -30°C), определённого уровня влажности и наличия ядер кристаллизации. В арктических регионах этот механизм часто сочетается с радиационным выхолаживанием, создавая устойчивые туманные покровы продолжительностью в несколько суток.

Важным аспектом механизмов туманообразования является их пространственно-временная изменчивость. Микромасштабные особенности подстилающей поверхности, локальная циркуляция воздушных масс и сезонные колебания метеорологических параметров создают сложную мозаику условий, определяющих специфику формирования туманных образований в каждом конкретном случае. Современные исследования позволяют выделить основные закономерности этих процессов, однако полное понимание всех аспектов туманообразования требует дальнейших комплексных исследований.

Рассмотрим условия необходимые для формирования туманов.

Прежде всего, ключевую роль играет достаточное содержание влаги в воздухе, поскольку без наличия водяного пара сам процесс конденсации становится невозможным. Воздух должен быть насыщен до такой степени, чтобы дальнейшее понижение температуры или увеличение влажности привело к переходу пара в жидкое состояние.

Важнейшим условием является охлаждение воздушных масс, которое может происходить различными путями. Например, радиационное выхолаживание поверхности земли в ночные часы способствует снижению

температуры прилегающих слоёв атмосферы. Адвективное охлаждение возникает при перемещении тёплого влажного воздуха над холодной поверхностью, будь то океан, снежный покров или промёрзшая почва. Кроме того, существенную роль играет испарение с тёплых водных поверхностей в холодный воздух, что часто наблюдается осенью и зимой над реками и озёрами.

Не менее значимым фактором выступает наличие ядер конденсации – микроскопических частиц пыли, солей, продуктов горения или других аэрозолей, вокруг которых формируются капли воды. Без этих частиц даже в перенасыщенном влагой воздухе конденсация затруднена, поскольку чистая атмосфера не предоставляет достаточного количества центров для образования капель.

Также важна слабая турбулентность воздушных масс, поскольку сильные ветры или активное перемешивание слоёв атмосферы препятствуют устойчивому накоплению капель в приземном слое. Спокойные условия, характерные для антициклональной погоды, способствуют длительному сохранению тумана, тогда как даже лёгкое движение воздуха может привести к его рассеиванию.

Таким образом, возникновение тумана – это результат тонкого баланса между влажностью, температурой, наличием ядер конденсации и стабильностью атмосферы. Нарушение любого из этих условий может либо предотвратить его образование, либо привести к быстрому исчезновению уже сформировавшегося тумана.

Очень важную роль в формировании туманов играют механизмы охлаждения воздуха.

Формирование тумана невозможно без снижения температуры воздушных масс до точки росы, при которой происходит конденсация водяного пара. Этот процесс охлаждения может осуществляться различными путями, каждый из которых имеет свои физические особенности и зависит от конкретных метеорологических условий.

Одним из наиболее распространённых механизмов является радиационное выхолаживание, наблюдаемое в ночные и утренние часы при ясной погоде. Поверхность земли, активно отдающая тепло в космическое пространство, быстро охлаждается, что приводит к передаче холода прилегающим слоям воздуха. Если охлаждение достигает критических значений, а влажность воздуха достаточно высока, избыточный водяной пар конденсируется в виде мельчайших капель, формирующих приземный туман. Этот тип охлаждения особенно характерен для осеннего и зимнего периодов, когда длинные ночи и слабая солнечная активность способствуют более интенсивной потере тепла.

Другой важный механизм – адвективное охлаждение, возникающее при перемещении тёплых влажных воздушных масс над холодной поверхностью. Например, когда воздух, сформировавшийся над тёплыми океаническими течениями, перемещается в район холодных прибрежных вод или снежного покрова, его нижние слои резко теряют тепло. В результате происходит конденсация, и над поверхностью образуется плотный туман. Адвективные туманы часто наблюдаются в прибрежных регионах, а также в районах с резкими перепадами температур между сушей и водоёмами.

Значительную роль играет и испарительное охлаждение, которое происходит при контакте холодного воздуха с относительно тёплой водной поверхностью. Испаряющаяся влага насыщает приземный слой, а одновременное поглощение тепла, необходимого для фазового перехода, приводит к локальному понижению температуры. В результате воздух быстро достигает точки росы, и над водоёмом или вблизи него формируется туман. Этот механизм особенно активен в осенне-зимний период, когда температура воздуха уже достаточно низкая, а вода ещё сохраняет остаточное тепло.

Кроме того, охлаждение может происходить за счёт подъёма воздушных масс (орографического или фронтального характера). При восходящем движении воздух адиабатически расширяется, что приводит к его охлаждению без теплообмена с окружающей средой. Если поднимающаяся масса содержит

достаточное количество влаги, то при достижении определённой высоты начинается конденсация, которая в некоторых случаях может опускаться до поверхности земли, образуя туман.

Таким образом, процесс охлаждения воздуха, необходимый для образования тумана, реализуется через сложное взаимодействие различных физических механизмов. Их эффективность зависит от множества факторов – влажности, скорости ветра, характера подстилающей поверхности и общей синоптической обстановки. Понимание этих процессов позволяет не только прогнозировать возникновение туманов, но и глубже анализировать их роль в формировании микроклимата различных регионов.

Следующий важный фактор – это роль ветра в процессах туманообразования.

Ветер как важнейший метеорологический фактор оказывает многоплановое и неоднозначное влияние на процессы туманообразования, выступая одновременно как катализатором, так и ингибитором формирования конденсационных явлений в приземном слое атмосферы. Характер этого влияния определяется сложным взаимодействием кинематических параметров воздушного потока с термодинамическими условиями окружающей среды, создавая пространственно-временную изменчивость в проявлении туманообразующих процессов.

При слабых ветровых режимах, не превышающих 1–2 м/с, создаются оптимальные условия для аккумуляции охлаждённых воздушных масс в приземном слое. В таких условиях минимизируется турбулентный перенос тепла, что способствует интенсивному радиационному выхолаживанию подстилающей поверхности и формированию температурной инверсии. Одновременно слабая адвекция обеспечивает локальное накопление влаги в пограничном слое атмосферы, создавая предпосылки для достижения точки росы и последующей конденсации водяного пара. Именно в таких условиях чаще всего наблюдаются наиболее плотные и устойчивые радиационные туманы, характеризующиеся выраженной пространственной локализацией.

Умеренные ветровые потоки (2–4 м/с) играют принципиально иную роль в туманообразовании, выступая фактором адвективного переноса воздушных масс. В данном случае ветер обеспечивает горизонтальный перенос тепла и влаги, создавая условия для формирования адвективных туманов. Особенно ярко это проявляется при перемещении тёплых влажных воздушных масс над холодной подстилающей поверхностью, когда ветер поддерживает постоянный приток насыщенного влагой воздуха в зону охлаждения. При этом важнейшее значение приобретает вертикальный градиент скорости ветра, который определяет интенсивность турбулентного перемешивания и, как следствие, вертикальную протяжённость туманообразования.

Сильные ветровые потоки (превышающие 5–6 м/с) как правило приводят к деструкции уже сформировавшихся туманов за счёт интенсивного турбулентного перемешивания воздушных масс. В таких условиях нарушается стратификация приземного слоя атмосферы, происходит выравнивание температурных и влажностных характеристик по вертикали, что делает невозможным поддержание условий для конденсации. Однако в особых орографических условиях (горные долины, котловины) даже сильные ветра могут способствовать туманообразованию за счёт механизма фёнового эффекта или орографического подъёма воздушных масс, сопровождающегося адиабатическим охлаждением.

Особый интерес представляет роль ветра в формировании испарительных туманов над водными поверхностями. В данном случае ветер выполняет двоякую функцию: с одной стороны, он усиливает процесс испарения за счёт увеличения коэффициента турбулентного обмена, с другой - способствует выносу насыщенных влагой воздушных масс за пределы акватории. Оптимальные условия возникают при определённом сочетании температуры воды и воздуха, когда ветер обеспечивает интенсивное испарение, но не вызывает чрезмерного перемешивания воздушных слоёв.

Сезонная изменчивость ветрового режима вносит существенные коррективы в пространственно-временное распределение туманов. В

холодный период года, когда преобладают процессы радиационного выхолаживания, слабые ветра способствуют формированию продолжительных и плотных туманов. В тёплый сезон возрастает роль адвективных процессов, и ветер становится важнейшим фактором пространственного распределения туманообразования, особенно в прибрежных районах с выраженной бризовой циркуляцией.

Таким образом, ветер выступает как ключевой регулятор процессов туманообразования, определяя не только возможность их возникновения, но и пространственную конфигурацию, временную динамику и микрофизические характеристики. Понимание тонких механизмов ветрового воздействия на туманообразующие процессы имеет принципиальное значение для совершенствования методов прогнозирования этого опасного метеорологического явления и оценки его влияния на различные сферы человеческой деятельности.

Влияние рельефа местности на процессы туманообразования: орографические факторы формирования конденсационных явлений.

Рельеф земной поверхности выступает важнейшим природным регулятором процессов туманообразования, создавая уникальные микроклиматические условия, которые существенно модифицируют общепринятые закономерности формирования конденсационных явлений. Орографические особенности местности оказывают комплексное воздействие на все ключевые параметры туманообразования - термический режим, влагосодержание воздушных масс и характер их циркуляции, формируя специфические пространственные закономерности распределения туманов.

В условиях пониженных форм рельефа, таких как речные долины, котловины и межгорные впадины, наблюдаются наиболее благоприятные предпосылки для интенсивного туманообразования. Замкнутость этих геоморфологических структур создает естественные условия для аккумуляции холодного воздуха, который в условиях слабой вентиляции подвергается продолжительному радиационному выхолаживанию. Особенно ярко этот

эффект проявляется в условиях температурной инверсии, когда плотные холодные воздушные массы скапливаются в нижней части рельефной депрессии, формируя устойчивый слой переохлажденного воздуха. Одновременно ограниченный воздухообмен с окружающими территориями способствует накоплению влаги, что в совокупности создает идеальные условия для продолжительных и плотных туманов.

Склоны горных систем оказывают неоднозначное влияние на процессы конденсации водяного пара. Наветренные склоны, подверженные орографическому подъему воздушных масс, становятся зоной активного адиабатического охлаждения, что при определенных условиях может приводить к образованию так называемых "склоновых туманов". При этом важнейшую роль играет экспозиция склона - северные склоны в умеренных широтах более подвержены туманообразованию из-за меньшей инсоляции и более продолжительного сохранения влаги. Подветренные склоны, напротив, часто оказываются зоной фёнового эффекта с нисходящими потоками нагретого воздуха, что создает естественный барьер для распространения туманов.

Высотная поясность существенно модифицирует характеристики формирующихся туманов. В высокогорных районах наблюдаются особые типы туманов, связанные с фазовыми переходами влаги в условиях пониженных температур. Здесь часто формируются ледяные туманы, состоящие из взвешенных кристаллов льда, а сам процесс туманообразования приобретает сезонную зависимость, достигая максимума в переходные климатические периоды. Примечательно, что в горных системах туманы часто приобретают ярусное распределение, образуя характерные "облачные полосы" на определенных высотах, что напрямую связано с особенностями вертикальной циркуляции воздушных масс.

Особый случай представляет влияние мезорельефа на локальное туманообразование. Даже незначительные перепады высот в несколько десятков метров могут создавать существенные различия в термическом

режиме смежных участков, приводя к формированию так называемых "туманных озер". Это явление особенно характерно для холмистых территорий, где холодный воздух стекает по склонам и накапливается в микропонижениях, создавая мозаичную картину распределения туманов. Подобные микроклиматические аномалии часто имеют выраженный суточный ход, достигая максимального развития в предутренние часы.

Прибрежные районы с выраженным береговым рельефом демонстрируют уникальные механизмы взаимодействия орографических факторов с морскими туманами. Береговые уступы и клифы могут либо блокировать продвижение туманов вглубь материка, либо, напротив, способствовать их распространению через систему ветровых коридоров. В условиях изрезанной береговой линии часто наблюдается сложная пространственная динамика туманов, когда отдельные мысы и бухты становятся центрами конденсации, формируя характерные "туманные шлейфы", ориентированные по преобладающим ветровым потокам.

Урбанизированные территории с антропогенно преобразованным рельефом создают особые условия для туманообразования. Архитектурные формы городской застройки имитируют эффекты микрорельефа, формируя зоны застоя воздуха в пределах городских котловин и способствуя концентрации ядер конденсации. При этом высотные здания могут как усиливать туманообразование за счет создания ветровой тени, так и препятствовать ему благодаря эффекту урбанистического теплового острова. Особенно сложная картина наблюдается в городах, расположенных в долинах рек, где естественные орографические предпосылки для туманообразования взаимодействуют с антропогенными факторами.

Таким образом, рельеф местности выступает как мощный природный фактор, определяющий пространственную организацию процессов туманообразования через сложную систему прямых и опосредованных воздействий на термодинамические параметры приземного слоя атмосферы. Понимание орографических закономерностей формирования туманов имеет

важное прикладное значение для решения задач транспортной логистики, экологического мониторинга и градостроительного планирования в условиях меняющегося климата.

1.2. Основные разновидности туманов

К ключевым разновидностям туманов относятся:

- **радиационные** (образуются вследствие охлаждения земной поверхности);
- **адвективные** (формируются при движении тёплых влажных воздушных масс над холодной поверхностью);
- **фронтальные/смешанные** (возникают в результате сочетания различных физических процессов).

Туманы как метеорологическое явление представляют собой визуальную манифестацию конденсации водяного пара в приземном слое атмосферы, формирующуюся под влиянием комплекса факторов, включая температурные градиенты, влажность, циркуляцию воздушных масс и особенности подстилающей поверхности. Их классификация базируется на совокупности физических механизмов, обуславливающих генезис и динамику данного явления, что позволяет выделить несколько принципиально различных типов, каждый из которых обладает уникальными характеристиками и условиями образования.

Радиационные туманы.

Эти туманы представляют собой уникальное атмосферное явление, формирующееся вследствие интенсивного теплового излучения земной поверхности в ночной период при наличии благоприятных синоптических условий. Этот тип тумана возникает в результате сложного взаимодействия радиационных, турбулентных и микрофизических процессов в приземном слое атмосферы, когда эффективное излучение подстилающей поверхности

приводит к ее значительному охлаждению и последующему выхолаживанию прилегающих воздушных масс. В отличие от адвективных туманов, связанных с горизонтальным переносом воздушных масс, радиационные туманы являются продуктом суточных колебаний температуры и демонстрируют четкую привязку к локальным особенностям рельефа и характеру земного покрова.

Физический механизм образования радиационных туманов основан на фундаментальных законах теплообмена в системе "поверхность Земли - приземный слой атмосферы". В условиях ясного неба и слабого ветра происходит интенсивная потеря тепла за счет длинноволнового излучения, что приводит к прогрессирующему охлаждению поверхности и соприкасающихся с ней воздушных слоев. Когда температура воздуха достигает точки росы, начинается процесс конденсации водяного пара на имеющихся в атмосфере ядрах конденсации, преимущественно аэрозольного происхождения. Особенностью данного процесса является его выраженная вертикальная стратификация - наиболее интенсивное охлаждение наблюдается непосредственно у земной поверхности, что создает характерную температурную инверсию и способствует накоплению тумана в нижних слоях атмосферы.

Микрофизическая структура радиационных туманов отличается специфическими особенностями, обусловленными условиями их формирования. Капельный спектр таких туманов характеризуется относительно малыми размерами частиц и высокой пространственной неоднородностью, что связано с особенностями ночного турбулентного режима и изменчивостью радиационных характеристик подстилающей поверхности. Концентрация капель в единице объема воздуха может достигать чрезвычайно высоких значений, что приводит к значительному снижению видимости, особенно в утренние часы, когда процесс конденсации достигает максимальной интенсивности.

Экологическая роль радиационных туманов проявляется в их влиянии на формирование микроклимата территории и функционирование наземных экосистем. В условиях засушливых регионов они выступают важным дополнительным источником влаги, компенсируя недостаток атмосферных осадков. Процесс осаждения туманной влаги на растительные поверхности существенно влияет на водный баланс фитоценозов, особенно в период вегетации. Одновременно туманы оказывают значительное воздействие на радиационный режим территории, отражая и рассеивая солнечную радиацию в дневные часы и тем самым замедляя прогрев поверхности после холодной ночи.

Климатическая изменчивость радиационных туманов представляет особый научный интерес в контексте современных глобальных изменений. Наблюдаемое повышение концентрации парниковых газов в атмосфере и связанное с этим усиление противоизлучения могут приводить к модификации условий формирования радиационных туманов. Особенно заметны эти изменения в урбанизированных территориях, где эффект "теплового острова" и повышенная запыленность атмосферы существенно изменяют традиционные закономерности туманообразования. В то же время, в некоторых регионах отмечается сокращение частоты возникновения радиационных туманов, что может быть связано с изменением режима увлажнения и циркуляционных процессов в атмосфере.

Современные методы исследования радиационных туманов включают комплексный подход, сочетающий наземные наблюдения, дистанционное зондирование и численное моделирование. Особое внимание уделяется изучению химического состава туманной влаги, который отражает как природные особенности территории, так и степень антропогенного воздействия на атмосферу. Развитие методов прогнозирования радиационных туманов имеет важное практическое значение для обеспечения безопасности транспорта, особенно авиации и автомобильных перевозок, где внезапное ухудшение видимости может создавать серьезные проблемы.

Адвективные туманы представляют собой особый класс метеорологических явлений, генерируемых крупномасштабными процессами горизонтального переноса воздушных масс с существенно отличными термодинамическими параметрами. Их формирование обусловлено сложным взаимодействием между адвективными потоками теплого влажного воздуха и охлажденной подстилающей поверхностью, что приводит к возникновению устойчивого слоя конденсации в приземном слое атмосферы. В отличие от радиационных туманов, связанных с локальными процессами выхолаживания, адвективные туманы характеризуются значительной пространственной протяженностью и продолжительностью существования, часто охватывая обширные территории в сотни квадратных километров.

Физическая природа данного явления основывается на фундаментальных законах тепло- и массообмена в пограничном слое атмосферы. При перемещении относительно теплых и насыщенных влагой воздушных масс над более холодной поверхностью происходит интенсивный теплоотвод от нижних слоев атмосферы, приводящий к их адиабатическому охлаждению. Этот процесс сопровождается постепенным достижением точки росы и последующей конденсацией избыточной влаги на имеющихся в атмосфере ядрах конденсации. Особенностью адвективных туманов является их способность сохраняться в течение всего дня, поскольку механизм их поддержания связан не с суточными колебаниями температуры, а с постоянным термодинамическим контрастом между перемещающейся воздушной массой и подстилающей поверхностью.

Географическое распределение адвективных туманов демонстрирует четкую приуроченность к зонам активного взаимодействия различных воздушных масс. Наиболее благоприятные условия для их формирования создаются в прибрежных регионах, где наблюдается постоянный перенос морского воздуха на континент, а также в районах с ярко выраженной сезонной изменчивостью температурного режима подстилающей поверхности. Особую интенсивность этот процесс приобретает в переходные сезоны, когда

сохраняется значительный контраст между прогретыми океаническими водами и охлажденными континентальными территориями, либо наоборот - между холодными океаническими течениями и прогретыми материковыми массивами.

Микрофизические характеристики адвективных туманов отличаются определенным своеобразием, проявляющимся в распределении размеров капель, их концентрации и пространственной неоднородности. Как правило, эти туманы характеризуются большей плотностью и устойчивостью по сравнению с другими типами, что обусловлено постоянным притоком влаги из перемещающейся воздушной массы. Одновременно наблюдается выраженная вертикальная стратификация микрофизических параметров, связанная с градиентом температур в пограничном слое атмосферы и интенсивностью турбулентного перемешивания.

Климатическое значение адвективных туманов проявляется в их влиянии на радиационный баланс территории, гидрологический режим и функционирование экосистем. В некоторых регионах, особенно в засушливых прибрежных зонах, они выступают важным источником атмосферного увлажнения, существенно дополняя скудные осадки. Одновременно их продолжительное существование оказывает значительное воздействие на тепловой режим подстилающей поверхности, замедляя ее суточный прогрев и способствуя сохранению пониженных температур.

Современные исследования адвективных туманов приобретают особую актуальность в контексте изучения изменений климата и их региональных проявлений. Наблюдаемые трансформации температурного режима океанов и континентов, модификация атмосферной циркуляции и изменение характера взаимодействия океана и атмосферы неизбежно отражаются на частоте, интенсивности и пространственном распределении этого явления. Особое значение приобретает изучение адвективных туманов в урбанизированных территориях, где их физико-химические характеристики существенно

модифицируются под влиянием антропогенного аэрозоля, что приводит к изменению оптических свойств и продолжительности существования.

Комплексные туманы.

В системе атмосферных явлений особое место занимают комплексные туманы, представляющие собой результат взаимодействия разнородных физических процессов, создающих уникальные условия для конденсации водяного пара в приземном слое атмосферы. Эти метеорологические образования отличаются от классических типов туманов сложной природой формирования, сочетающей в себе элементы радиационного выхолаживания, адвективных процессов, орографических эффектов и антропогенных воздействий. Их изучение требует междисциплинарного подхода, объединяющего принципы физики атмосферы, синоптической метеорологии и экологии.

Генезис комплексных туманов основан на нелинейном взаимодействии нескольких механизмов конденсации, создающих синергетический эффект. Характерной особенностью таких туманов является их способность формироваться в условиях, когда ни один из отдельных факторов не достигает пороговых значений, необходимых для образования классических туманных структур. Например, сочетание слабой адвекции влажного воздуха с умеренным радиационным охлаждением может привести к возникновению устойчивого тумана, тогда как по отдельности эти факторы оказались бы недостаточными для инициации процесса конденсации. Этот феномен особенно ярко проявляется в переходные сезоны, когда атмосферные процессы характеризуются повышенной изменчивостью.

С пространственно-временной точки зрения комплексные туманы демонстрируют уникальные характеристики, отличающие их от других типов туманных образований. Они часто образуют обширные, но неравномерные поля с выраженной мозаичной структурой, где участки с различной плотностью тумана чередуются в сложном пространственном рисунке. Временная динамика таких туманов также отличается нестандартным

поведением - они могут сохраняться в течение необычно длительных периодов или, напротив, демонстрировать резкие колебания плотности, связанные с изменением доминирующих факторов формирования.

Современные климатические изменения придают особую актуальность изучению комплексных туманов, так как наблюдаемая трансформация атмосферных процессов приводит к появлению новых, ранее не встречавшихся сочетаний факторов туманообразования. В частности, изменение характера атмосферной циркуляции и температурного режима подстилающей поверхности создает условия для формирования туманов с необычными свойствами, сочетающих черты радиационных и адвективных типов. Особенно заметны эти изменения в урбанизированных территориях, где тепловой остров мегаполисов взаимодействует с измененными потоками влаги и аэрозольными характеристиками атмосферы.

Микрофизические параметры комплексных туманов представляют особый научный интерес, так как отражают взаимодействие различных механизмов их формирования. Капельный спектр таких туманов часто характеризуется бимодальным распределением, свидетельствующим о разных стадиях и условиях конденсации. Химический состав туманной влаги в комплексных туманах также отличается повышенной сложностью, включая как природные, так и антропогенные компоненты в различных пропорциях, что делает их важным объектом экологических исследований.

Методология изучения комплексных туманов требует применения современных технологий мониторинга и моделирования. Особую ценность приобретают методы дистанционного зондирования, позволяющие отслеживать пространственную динамику туманных полей, а также численные модели, способные учитывать взаимодействие множества факторов. Развитие этих направлений имеет важное прикладное значение для совершенствования систем прогнозирования туманов, что особенно актуально для транспортной инфраструктуры и авиации.

Экологическая роль комплексных туманов в современных условиях приобретает новые аспекты, связанные с их способностью транспортировать и трансформировать различные вещества в атмосфере. В условиях антропогенного воздействия эти туманы становятся важным звеном в цикле загрязняющих веществ, влияя на их распределение, химические превращения и осаждение. Одновременно они играют значительную роль в формировании локального климата, изменяя радиационный баланс и тепловой режим территорий.

1.3. Антропогенные туманы

В современной метеорологии особую категорию составляют антропогенные туманы, формирующиеся под влиянием хозяйственной деятельности человека и представляющие собой сложный физико-химический феномен. Эти атмосферные образования принципиально отличаются от природных аналогов механизмами возникновения, структурными характеристиками и экологическим воздействием. Их формирование обусловлено комплексным взаимодействием техногенных выбросов, измененного теплового режима урбанизированных территорий и антропогенной трансформации атмосферных процессов. В условиях глобальной индустриализации изучение таких туманов приобретает особую актуальность как с научной, так и с практической точек зрения.

Физическая природа антропогенных туманов основывается на уникальном сочетании естественных процессов конденсации и специфических факторов, создаваемых человеческой деятельностью. Техногенные аэрозоли, выступающие в роли ядер конденсации, существенно отличаются от природных по химическому составу, размерам и гигроскопическим свойствам, что приводит к формированию туманов с особыми микрофизическими характеристиками. Промышленные выбросы, содержащие сульфаты, нитраты и органические соединения, значительно

увеличивают количество потенциальных центров конденсации, способствуя образованию тумана даже при относительно низкой влажности воздуха. Одновременно урбанизированные ландшафты создают специфический тепловой режим, модифицирующий традиционные процессы туманообразования.

Особенностью антропогенных туманов является их выраженная пространственно-временная приуроченность к центрам промышленной активности и транспортным узлам. В отличие от природных аналогов, они могут формироваться независимо от времени суток и сезона года, демонстрируя особую устойчивость в условиях температурных инверсий, характерных для городской среды. Их химический состав представляет сложную смесь водяного пара с техногенными загрязнителями, что придает таким туманам специфические кислотные свойства и повышенную опасность для экосистем и здоровья населения. Исторический опыт лондонского смога и современных промышленных центров свидетельствует о значительном потенциале негативного воздействия этого явления.

Специфика антропогенных туманов в условиях Якутии.

В арктических и субарктических регионах, включая территорию Республики Саха (Якутия), антропогенные туманы приобретают особые характеристики, обусловленные уникальным сочетанием природно-климатических факторов и спецификой хозяйственного освоения. Экстремальные температурные условия, характерные для этого региона, создают предпосылки для формирования туманов с необычными физико-химическими свойствами. В условиях продолжительной полярной ночи и устойчивых температурных инверсий техногенные выбросы городских поселений и промышленных объектов приводят к образованию устойчивых туманных образований с высокой концентрацией загрязняющих веществ.

Особенностью якутских антропогенных туманов является их выраженная сезонная динамика и специфический механизм формирования в условиях крайне низких температур. В зимний период, когда температура

воздуха опускается ниже -35°C , выбросы тепла и влаги от жилищно-коммунального хозяйства и промышленных предприятий создают устойчивые туманные образования над населенными пунктами. Эти "тепловые" туманы, характерные для северных городов, отличаются высокой плотностью и способностью сохраняться в течение нескольких недель, создавая значительные проблемы для транспорта и здоровья жителей.

Уникальной чертой якутских антропогенных туманов является их взаимодействие с явлением ледяного тумана, когда переохлажденные капли воды мгновенно замерзают при контакте с поверхностями, образуя густой морозный туман. Этот процесс значительно усиливается при наличии техногенных выбросов, создающих дополнительные ядра кристаллизации. В летний период промышленные выбросы в условиях температурных инверсий способствуют формированию фотохимических туманов, содержащих сложный коктейль из загрязняющих веществ.

Экологические последствия антропогенных туманов в Якутии приобретают особую остроту в связи с хрупкостью северных экосистем и замедленными процессами самоочищения атмосферы в условиях низких температур. Накопление загрязняющих веществ в туманной влаге приводит к кислотным осадкам и нарушению химического баланса почв и водоемов. Одновременно продолжительные туманные эпизоды в населенных пунктах создают значительные риски для здоровья населения, особенно в сочетании с низкими температурами воздуха.

Современные исследования антропогенных туманов Якутии требуют разработки специальных методик, учитывающих региональную специфику. Особое внимание уделяется изучению микрофизических параметров этих образований, их химического состава и взаимодействия с криолитозоной. Развитие систем мониторинга и прогнозирования таких туманов имеет важное значение для экологической безопасности региона и адаптации хозяйственной деятельности к условиям изменения климата.

1.4. Причины возникновения антропогенных туманов в Якутске и пути решений их последствий

Промышленные выбросы.

Якутск является крупным промышленным центром, где расположены предприятия энергетики, добывающей и перерабатывающей промышленности. ТЭЦ, работающие на угле, выбрасывают в атмосферу значительное количество золы, сажи и сернистых соединений. Эти частицы служат ядрами конденсации, способствуя образованию плотного смога, особенно в зимний период.

Автомобильные выхлопы.

Рост числа автомобилей в городе приводит к увеличению концентрации выхлопных газов, содержащих оксиды азота, угарный газ и мелкодисперсные частицы. В условиях низких температур (до -40°C и ниже) эти выбросы смешиваются с холодным воздухом, формируя устойчивый туман.

Отопление частного сектора.

Значительная часть жилого фонда Якутска состоит из частных домов, отапливаемых углём и дровами. В зимний период, когда температура опускается до экстремальных значений, объёмы сжигаемого топлива возрастают, что приводит к увеличению выбросов дыма и сажи.

Особенности микроклимата.

Якутск расположен в долине реки Лены, что способствует застою воздуха. В условиях температурной инверсии (когда холодный воздух задерживается у поверхности земли) загрязняющие вещества накапливаются в приземном слое, усиливая туманообразование.

Последствия антропогенных туманов.

1) Влияние на здоровье населения

Туман, насыщенный вредными веществами, вызывает заболевания дыхательной системы (бронхиты, астму, ХОБЛ), увеличивает риск сердечно-

сосудистых патологий и онкологических заболеваний. Особенно уязвимы дети и пожилые люди.

2) Ухудшение видимости и транспортные проблемы

Густой туман снижает видимость до нескольких метров, что приводит к авариям на дорогах, задержкам авиарейсов и осложнениям в работе городского транспорта.

3) Экологический ущерб

Оседающие на снег и почву токсичные вещества загрязняют окружающую среду, влияют на растительность и водные ресурсы.

Пути решения проблемы.

- Модернизация промышленности.

Внедрение фильтров и систем очистки на ТЭЦ, переход на более экологичные виды топлива (природный газ, возобновляемые источники энергии).

- Развитие общественного транспорта.

Сокращение числа автомобилей за счёт улучшения инфраструктуры общественного транспорта, популяризации электромобилей.

- Утепление жилья и переход на альтернативное отопление.

Программы энергоэффективности для частного сектора, использование электрических и геотермальных систем отопления.

- Мониторинг атмосферы

Усиление контроля за качеством воздуха, создание системы оповещения о неблагоприятных метеоусловиях.

В итоге мы получаем, что антропогенные туманы в Якутске — серьёзная экологическая проблема, требующая комплексного подхода к решению. Снижение уровня загрязнения воздуха возможно только при совместных усилиях власти, бизнеса и населения. Реализация экологических программ и внедрение современных технологий помогут улучшить качество жизни в городе и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. В таблице 1 приведены результаты сравнения туманов.

Таблица 1. Сравнительная таблица типов туманов

Критерий	Радиационный	Адвективный	Комплексный
Причина	Ночное охлаждение	Перенос тёплого воздуха	Сочетание факторов
Время суток	Ночь/утро	Любое время	Зависит от механизма
Ветер	Слабый (1–3 м/с)	Умеренный (3–7 м/с)	Разный
Устойчивость	Рассеивается утром	Может держаться сутками	Зависит от условий
Места	Долины, низины	Моря, океаны, снежные поля	Города, фронтальные зоны

Заключение

Туманы – сложное метеорологическое явление, зависящее от термодинамических процессов в приземном слое атмосферы.

- Радиационные – результат локального охлаждения.
- Адвективные – следствие переноса воздушных масс.
- Комплексные – сочетание разных механизмов, включая антропогенное влияние.

Понимание их природы важно для авиации, судоходства и экологического мониторинга.

Туманы оказывают существенное влияние на климатические условия, транспортную инфраструктуру и жизнедеятельность человека. Исследование их природы способствует повышению точности прогнозов и снижению связанных с ними рисков. Многообразие условий возникновения и классификационных признаков подчёркивает сложность данного

атмосферного явления, формирующегося под воздействием как глобальных циркуляционных механизмов, так и локальных характеристик земной поверхности.

2. Анализ режима туманов в сочетании с метеорологическими факторами

2.1. Физико-географические и климатические особенности Якутска

Географическое положение Якутска можно увидеть на рисунке 1.

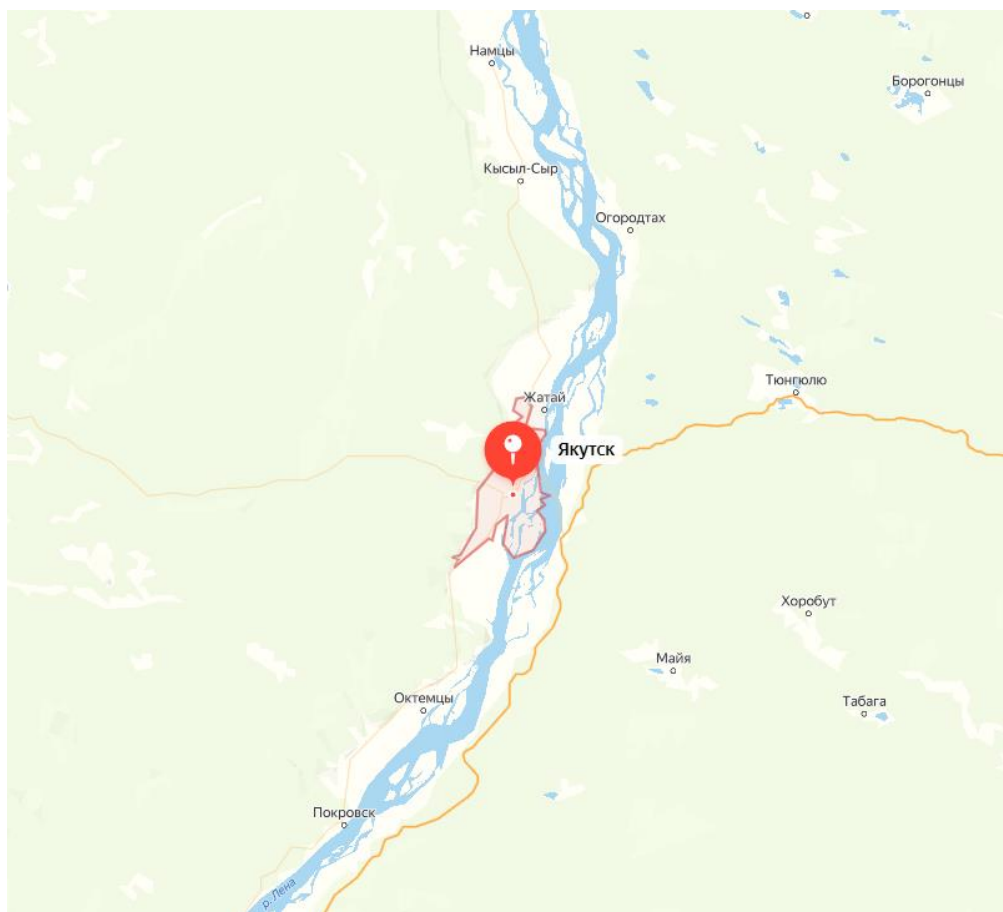


Рисунок 1. Географическое положение Якутска.

Якутск расположен в долине реки Лены на 62° северной широты, представляя собой уникальный пример городского поселения в экстремальных северных условиях. Город находится в зоне сплошной многолетней мерзлоты мощностью до 400 метров, что определяет особые требования к строительству и инфраструктуре. Территория характеризуется равнинным рельефом с абсолютными высотами 90-120 метров, сложенным аллювиальными отложениями с многочисленными ледяными жилами.

Гидрографическая сеть представлена рекой Леной с годовым стоком 515 км³ и многочисленными термокарстовыми озерами. Почвенный покров состоит преимущественно из криоземов таежных с растительностью северотаежного типа, где доминирует лиственница Гмелина.

Климатические особенности.

Якутск обладает экстремально континентальным климатом, являясь самым холодным крупным городом мира:

- Среднегодовая температура составляет $-8,8^{\circ}\text{C}$.
- Абсолютный минимум зафиксирован на отметке $-64,4^{\circ}\text{C}$.
- Летний максимум достигает $+38,4^{\circ}\text{C}$.
- Годовое количество осадков не превышает 235 мм.

Климатическая сезонность выражена резко:

- Длительная зима (7 месяцев) со средней температурой января $-38,6^{\circ}\text{C}$.
- Короткое, но относительно жаркое лето со средней температурой июля $+19,5^{\circ}\text{C}$.
- Характерны сильные температурные инверсии в зимний период.

Антропогенное влияние и экологические проблемы.

Уникальные природные условия Якутска создают особые вызовы для городского развития:

1) Градостроительные особенности:

- Специальные типы фундаментов (свайные, вентилируемые)
- Проблемы термокарстовых процессов
- Формирование городских островов тепла

2) Основные экологические проблемы:

- Деградация многолетней мерзлоты (до 2 см/год)
- Загрязнение атмосферы в отопительный период
- Изменение естественного гидрологического режима

2.2. Анализ характеристик режима туманов в Якутске

Для понимания режима туманов необходимо рассмотреть многолетние значения числа дней с туманами на территории Якутска (табл.2). Основное внимание уделяем зимним туманам, т.к. они чаще всего наблюдаются.

Таблица 2. Число дней с туманами с ноября по март 2012-2022 гг.

Год	Январь	Февраль	Март	Ноябрь	Декабрь	Всего
2012	5	10	2	2	8	0
2013	9	9	0	0	1	19
2014	7	5	0	0	4	16
2015	3	2	1	0	3	9
2016	6	2	0	3	3	14
2017	3	1	1	3	6	14
2018	5	6	0	1	0	12
2019	1	2	0	0	1	4
2020	1	1	0	0	0	2
2021	0	1	0	0	1	2
2022	1	3	0	0	1	5
	41	42	4	9	28	124

Исходя из полученных данных, получаем, что большее число туманов приходилось на январь и февраль (41 и 42 дня соответственно). Меньше всего туманы наблюдались в марте и ноябре (4 и 9 соответственно). Всего за десятилетие с 2012 г. по 2022 г. В зимне-весенний период туманы наблюдались 124 дня.

В процессе анализа режима туманов понимаем, что число дней с туманом не всегда отражает характер их режима. Поэтому важное место в данном анализе отводится таким данным, как продолжительность туманов (табл.3.).

Таблица 3. Продолжительность туманов с ноября по март 2012-2022 гг.

Год	Январь	Февраль	Март	Ноябрь	Декабрь	Всего
2012	16	17	2	10	21	66
2013	31	29	0	0	1	61
2014	22	12	0	0	9	43
2015	8	5	1	0	5	19
2016	8	4	0	6	6	24
2017	6	1	2	6	16	31
2018	14	29	0	1	0	44
2019	2	8	0	0	1	11
2020	1	2	0	0	0	3
2021	0	2	0	0	1	3
2022	5	6	0	0	3	14
	113	115	5	23	63	319

Исходя из полученных результатов, наиболее продолжительные туманы возникали в январе и феврале. Наименее же продолжительные туманы наблюдались в марте и ноябре (Рисунок 2 и 3).

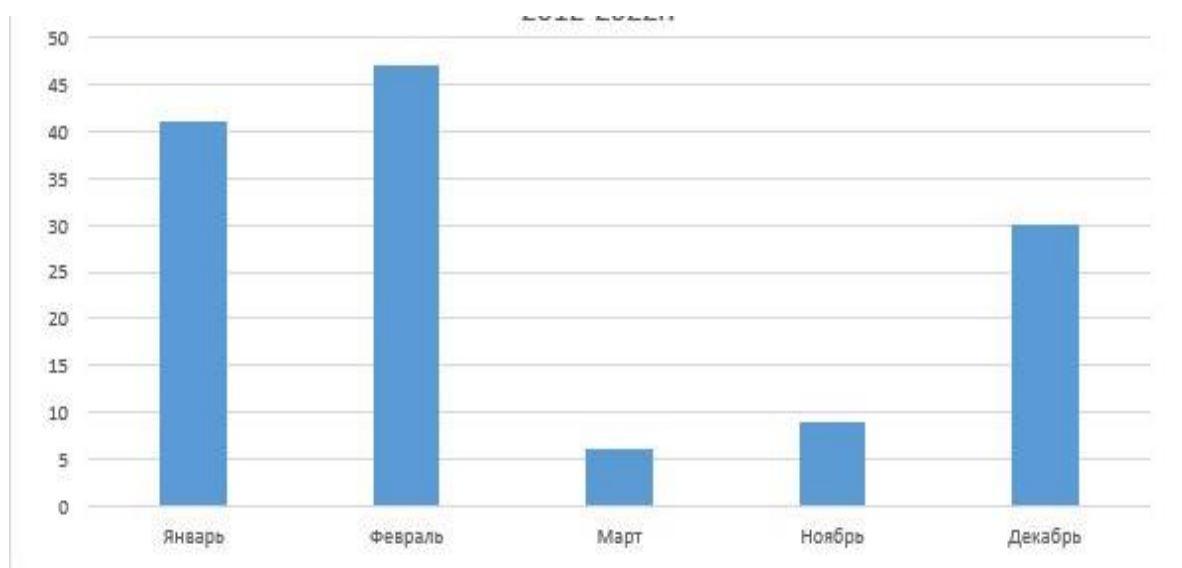


Рисунок 2. Распределения по месяцам числа дней с туманами в период с ноября по март 2012-2022 гг.

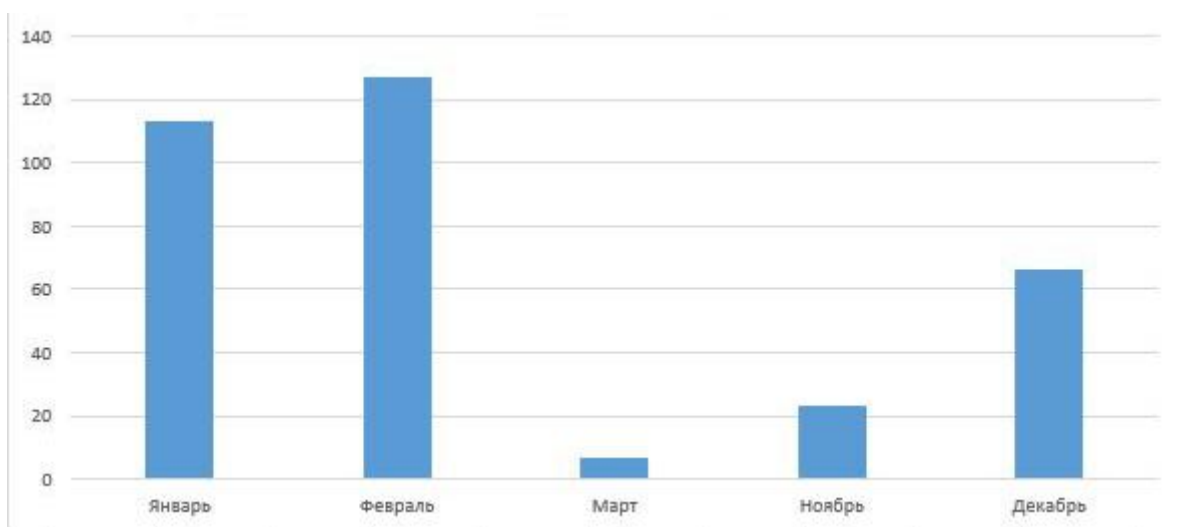


Рисунок 3. Диаграмма распределения по месяцам продолжительности туманов в период с ноября по март 2012-2022 гг. (час)

2.3. Особенности формирования туманов в Якутске

В районе Якутска, где уникальное сочетание природных и антропогенных факторов создает специфические механизмы формирования туманных образований. Географическое положение города в долине реки Лены, окруженной возвышенностями, в сочетании с резко континентальным климатом и интенсивной урбанизацией территории формирует особый микроклимат, существенно влияющий на частоту, интенсивность и физические характеристики местных туманов.

Ключевым фактором, определяющим специфику якутских туманов, выступает исключительная температурная динамика региона, где годовая амплитуда температур превышает 100°C . В зимний период, когда столбик термометра опускается ниже -40°C , над городом формируются устойчивые ледяные туманы, представляющие собой взвесь микроскопических кристаллов льда. Их образование связано с конденсацией и последующей сублимацией водяного пара, выделяемого при сжигании топлива, работе промышленных предприятий и даже дыхании жителей. Эти туманы отличаются особой плотностью и способностью сохраняться в течение

нескольких недель, создавая характерный "парниковый эффект" над городской застройкой.

Летний период в Якутске характеризуется иным механизмом туманообразования, связанным с особенностями циркуляции воздушных масс в долине Лены. Адвекция относительно теплых и влажных воздушных потоков над охлажденными водными поверхностями и заболоченными участками поймы создает благоприятные условия для формирования обширных туманных полей. Особенностью этих туманов является их слоистая структура и способность перемещаться вдоль речной долины, подчиняясь местным ветровым режимам. В условиях городской застройки они приобретают дополнительные свойства благодаря взаимодействию с урбанистическим тепловым островом.

Антропогенное влияние на процессы туманообразования в Якутске проявляется в нескольких аспектах. Во-первых, техногенные выбросы создают избыточное количество ядер конденсации, существенно увеличивая частоту и плотность туманов. Во-вторых, тепловое загрязнение городской среды изменяет естественные температурные градиенты, создавая условия для формирования туманов в нетипичных метеорологических ситуациях. В-третьих, особенности городской планировки и высотной застройки модифицируют воздушные потоки, способствуя застою туманных масс в отдельных районах города.

Особого внимания заслуживают радиационные туманы, формирующиеся в переходные сезоны, когда сочетание ясной погоды, слабого ветра и интенсивного ночного выхолаживания создает идеальные условия для конденсации влаги. В условиях Якутска эти туманы приобретают специфические черты благодаря взаимодействию с городской средой - они формируются быстрее, достигают большей плотности и сохраняются дольше, чем в естественных ландшафтах. Их микрофизические характеристики существенно отличаются от фоновых значений из-за высокого содержания техногенных аэрозолей.

Гидрологические особенности местности также вносят значительный вклад в процесс туманообразования. Близость крупных водных объектов, обширные заболоченные территории и специфика сезонного промерзания грунтов создают уникальный режим увлажнения приземного слоя атмосферы. В период ледостава на реках наблюдается особый тип туманов испарения, когда разница температур между относительно теплой водой под ледяным покровом и холодным воздухом приводит к интенсивному парообразованию.

Современные климатические изменения добавляют новые аспекты в изучение якутских туманов. Наблюдаемое потепление в арктических регионах приводит к модификации традиционных механизмов туманообразования, изменяя их сезонную динамику, частоту возникновения и физические свойства. Особенно заметны эти изменения в зимний период, когда повышение температуры воздуха влияет на фазовый состав туманных частиц и продолжительность их существования.

Исследование туманов Якутска требует комплексного подхода, сочетающего традиционные метеорологические наблюдения с современными методами дистанционного зондирования и компьютерного моделирования. Полученные данные имеют не только научное значение для понимания процессов в криолитозоне, но и важное практическое применение в градостроительстве, экологическом мониторинге и организации городского хозяйства в экстремальных климатических условиях.

2.4. Сезонность туманов в городской черте Якутска

Исследование закономерностей возникновения туманов в условиях Якутска представляет собой сложную научную задачу, требующую комплексного анализа взаимодействия разнородных метеорологических параметров. Частота появления туманных явлений в данном регионе демонстрирует выраженную зависимость от сезонной динамики климатических характеристик, формируя уникальную картину

пространственно-временного распределения этого атмосферного феномена. Особенностью якутских туманов выступает их тесная корреляция с экстремальными значениями основных метеовеличин, что создает специфические статистические закономерности, не наблюдаемые в других географических регионах.

В зимний период максимальная повторяемость туманов наблюдается при сочетании трех ключевых факторов: аномально низких температур (ниже -35°C), слабого ветра (не превышающего 2 м/с) и выраженной температурной инверсии в приземном слое атмосферы. Такие метеорологические условия способствуют аккумуляции продуктов антропогенной деятельности в городском воздушном бассейне, создавая устойчивые предпосылки для образования ледяных туманов. Статистический анализ многолетних наблюдений выявляет прямую зависимость между продолжительностью антициклональной погоды и частотой возникновения туманных явлений в холодный сезон, при этом интенсивность туманов возрастает пропорционально сроку существования барического максимума.

Переходные сезоны (весна и осень) характеризуются иным механизмом формирования туманной статистики, где определяющую роль играет взаимодействие радиационного фактора с влажностными характеристиками воздушных масс. Наибольшая повторяемость туманов в этот период регистрируется при относительной влажности воздуха 85-95% в сочетании с суточными колебаниями температуры $10-15^{\circ}\text{C}$. Особенностью межсезонья выступает чувствительность туманообразования к скорости ветра - даже незначительное усиление воздушных потоков до 3-4 м/с приводит к резкому снижению вероятности возникновения этого явления. Метеорологические условия ясного неба и отсутствия облачности в ночные часы создают оптимальные предпосылки для интенсивного выхолаживания поверхности и последующего формирования радиационных туманов.

Летний период демонстрирует более сложную зависимость повторяемости туманов от комплекса метеопараметров, где ключевое значение

приобретает взаимодействие температурного режима речной воды с характеристиками перемещающихся воздушных масс. Адвективные туманы наиболее часто образуются при разнице температур воды в Лене и воздуха в 8-12°C, когда относительная влажность достигает 90-95%. Статистические модели показывают нелинейную зависимость между повторяемостью летних туманов и скоростью ветра - максимальная частота наблюдается при слабых ветрах (1-3 м/с), тогда как усиление воздушных потоков свыше 5 м/с практически полностью исключает возможность туманообразования.

Особый интерес представляет анализ повторяемости туманов в условиях городской застройки Якутска, где антропогенный фактор модифицирует естественные метеорологические закономерности. Тепловое излучение урбанизированных территорий создает специфический микроклимат, в котором пороговые значения параметров туманообразования существенно отличаются от фоновых показателей. Многофакторный регрессионный анализ выявляет статистически значимую связь между концентрацией аэрозолей в городском воздухе и частотой возникновения туманных явлений, особенно выраженную в зимний период при температуре ниже -30°C.

Современные изменения климата вносят коррективы в традиционные статистические модели повторяемости туманов. Наблюдаемое повышение среднегодовой температуры в регионе приводит к модификации сезонного распределения туманных явлений - сокращению продолжительности зимнего туманного периода и увеличению частоты летних туманов. Особенно заметны эти изменения в последнее десятилетие, когда традиционные метеорологические параметры туманообразования демонстрируют выраженный тренд к трансформации, требующий постоянного обновления статистических моделей и методов прогнозирования.

2.5. Режим туманов в Якутске: климатические особенности и антропогенное влияние

Якутск, являясь одним из наиболее холодных мегаполисов планеты с экстремально континентальным климатом, демонстрирует уникальные особенности туманообразования. В городе преобладают радиационные, адвективные и антропогенные типы туманов, чья интенсивность и частота проявления находятся в прямой зависимости от сезонных факторов, орографических условий и техногенного воздействия.

Климатические причины туманообразования в Якутске.

Орографо-географические особенности.

- Локализация в пойменной части реки Лена, обрамлённой возвышенностями, что способствует аккумуляции холодных воздушных масс в понижениях рельефа
- Ярко выраженная континентальность климата с экстремальными температурными колебаниями (летние максимумы до $+35^{\circ}\text{C}$, зимние минимумы до -50°C)
- Гидротермические условия.
- Зимний период: характеризуется пониженной влажностью (70–80%), однако температурные инверсии создают предпосылки для туманообразования
- Тёплый сезон (лето-осень): отмечается рост относительной влажности до 80–90% вследствие интенсивного испарения с акватории Лены и прилегающих заболоченных территорий
- Циркуляционные особенности.
- В зимний сезон преобладают слабые ветровые потоки (1–3 м/с), способствующие стагнации охлаждённых воздушных масс.
- Летом наблюдается активизация воздухообмена, однако в условиях антициклональной погоды возможно длительное сохранение туманных явлений.

Сезонные особенности туманов в Якутске.

В Якутске наблюдается ярко выраженная сезонная динамика туманообразования, обусловленная экстремальными климатическими условиями региона.

В зимний период (ноябрь-март) преобладают радиационные ледяные туманы, формирующиеся благодаря уникальному сочетанию природных факторов. Длительная полярная ночь, особенно в декабре-январе, способствует интенсивному выхолаживанию приземного слоя атмосферы. Этот процесс усиливается устойчивыми антициклонами, которые обеспечивают ясную погоду и штилевые условия. Характерной особенностью является мощная температурная инверсия - при -45°C у поверхности на высоте 100 метров температура может быть на 15 градусов выше. Образующиеся в таких условиях туманы отличаются особой устойчивостью, часто сохраняясь несколько суток подряд, и имеют преимущественно кристаллическую структуру из микроскопических ледяных частиц. Существенное влияние на их характеристики оказывают антропогенные выбросы от городских ТЭЦ и печного отопления частного сектора.

В переходные сезоны (апрель-май и сентябрь-октябрь) картина существенно меняется. Весной активное таяние снежного покрова приводит к повышенному испарению, которое в сочетании с ночным охлаждением создает идеальные условия для формирования адвективно-радиационных туманов. Осенью аналогичный эффект достигается за счет охлаждения увлажненных летними осадками воздушных масс. Эти туманы отличаются четкой суточной динамикой - образуясь в предрассветные часы, они обычно полностью рассеиваются к полудню. Особенно интенсивно они развиваются в пойменных участках реки Лены и ее притоков.

Летний период (июнь-август) характеризуется преобладанием испарительных туманов, возникающих при контакте теплого воздуха с холодной поверхностью речных вод. Этот процесс сопровождается адиабатическим охлаждением воздушных масс при их подъеме, что усиливает конденсацию водяного пара. Особенностью летних туманов является их четкая

локализация вдоль водных артерий и максимальная интенсивность в ранние утренние часы. Существенное влияние на их характеристики оказывает дымка от лесных пожаров, которая в сочетании с естественными туманами создает устойчивые смоговые ситуации. Важно отметить, что во все сезоны антропогенный фактор играет значительную роль, проявляясь в увеличении частоты туманообразования в городской черте, изменении микрофизических свойств туманов и формировании опасных метеорологических условий.

Антропогенное воздействие на туманные явления в Якутске.

Городская среда Якутска существенно модифицирует естественные процессы туманообразования. Основными источниками загрязнения атмосферы выступают угольные ТЭЦ, выбрасывающие в воздух диоксид серы и сажевые частицы, транспортные средства с их выхлопами, содержащими оксиды азота и мелкодисперсные взвеси, а также пыль от гравийных дорожных покрытий. Особенно ярко это проявляется в зимний период, когда промышленные выбросы в сочетании с морозными туманами образуют устойчивый смог. Наличие большого количества твердых частиц в воздухе приводит к увеличению продолжительности туманных явлений, поскольку эти частицы служат дополнительными центрами конденсации влаги.

Статистические показатели туманной активности.

Климатические наблюдения фиксируют значительные сезонные колебания туманной активности. В холодное время года метеорологи отмечают 15–20 дней с туманами ежемесячно, тогда как летом их количество сокращается до 5–10 случаев, причем преимущественно в приречных зонах. Абсолютный рекорд продолжительности был зарегистрирован в 2018 году, когда туманное состояние атмосферы сохранялось непрерывно в течение 12 суток. В наиболее интенсивные периоды видимость в городе может снижаться до критических 10–50 метров, создавая серьезные проблемы для всех видов транспорта.

Социально-экономические последствия.

Туманы оказывают комплексное негативное воздействие на жизнь города. Авиаперевозки через аэропорт "Якутск" регулярно испытывают сбои из-за ухудшения видимости. На автомобильных дорогах сочетание тумана с гололедицей многократно увеличивает риск дорожно-транспортных происшествий. Медицинские учреждения фиксируют рост обращений с респираторными заболеваниями в периоды смога, а энергетики сталкиваются с проблемами обледенения линий электропередач, когда капли тумана замерзают на проводах.

Меры по минимизации последствий.

Для снижения негативного влияния городские власти реализуют комплекс мероприятий. В экологической сфере это включает перевод теплоэнергетики на газовое топливо и ограничение использования угля в частном секторе. Инфраструктурные решения направлены на улучшение городской вентиляции и оснащение дорог современными системами обнаружения тумана. Медицинские рекомендации предусматривают использование средств индивидуальной защиты в периоды ухудшения качества воздуха и внедрение систем мониторинга атмосферы по аналогии с китайским опытом.

В заключении необходимо отметить, что туманы в Якутске представляют собой комплексное атмосферное явление, формирующееся под воздействием как природных, так и антропогенных факторов. В зимний период доминируют радиационные и кристаллические туманы, интенсивность которых значительно возрастает из-за промышленных и бытовых выбросов. Летом преобладают испарительные туманы, локализующиеся преимущественно над акваторией реки Лена. Наиболее острой экологической проблемой остаётся зимний смог, образующийся при сочетании низких температур, температурных инверсий и высоких концентраций загрязняющих веществ в атмосфере.

Серьёзность ситуации усугубляется тем, что без принятия эффективных природоохранных мер проблема будет прогрессировать параллельно с ростом

городской застройки и увеличением антропогенной нагрузки на окружающую среду. Особую актуальность приобретает разработка и реализация комплексной программы по улучшению экологической обстановки, включающей модернизацию энергетического комплекса, совершенствование системы городского транспорта и внедрение современных технологий мониторинга качества воздуха. Только такой системный подход позволит минимизировать негативное воздействие туманных явлений на городскую инфраструктуру и здоровье населения.

2.6. Анализ сочетания метеорологических характеристик с туманами

Важное место в исследовании туманов отводится анализу сочетания туманов с метеорологическими характеристиками, что дает возможность понимания процессов, которые могут привести к формированию туманов (табл.).

Таблица 4. Среднемесячной относительной влажности воздуха в зимние периоды 2012-2022гг.

Период	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль
2012-2013	75,74	73,81	72,71	73,58
2013-2014	70,50	70,01	66,55	67,27
2014-2015	75,47	71,24	74,33	73,43
2015-2016	77,52	75,06	73,66	72,14
2016-2017	71,81	75,46	81,88	83,31
2017-2018	71,46	74,28	74,79	76,84
2018-2019	79,88	76,28	76,05	77,10
2019-2020	77,82	71,94	77,84	79,11
2020-2021	81,98	74,46	71,47	76,83
2021-2022	80,71	67,01	69,04	71,72

Была рассчитана среднемесячная относительная влажность в зимний период 2012-2022гг. Для примера рассмотрим зимний период 2021-2022гг. (Рис.4).

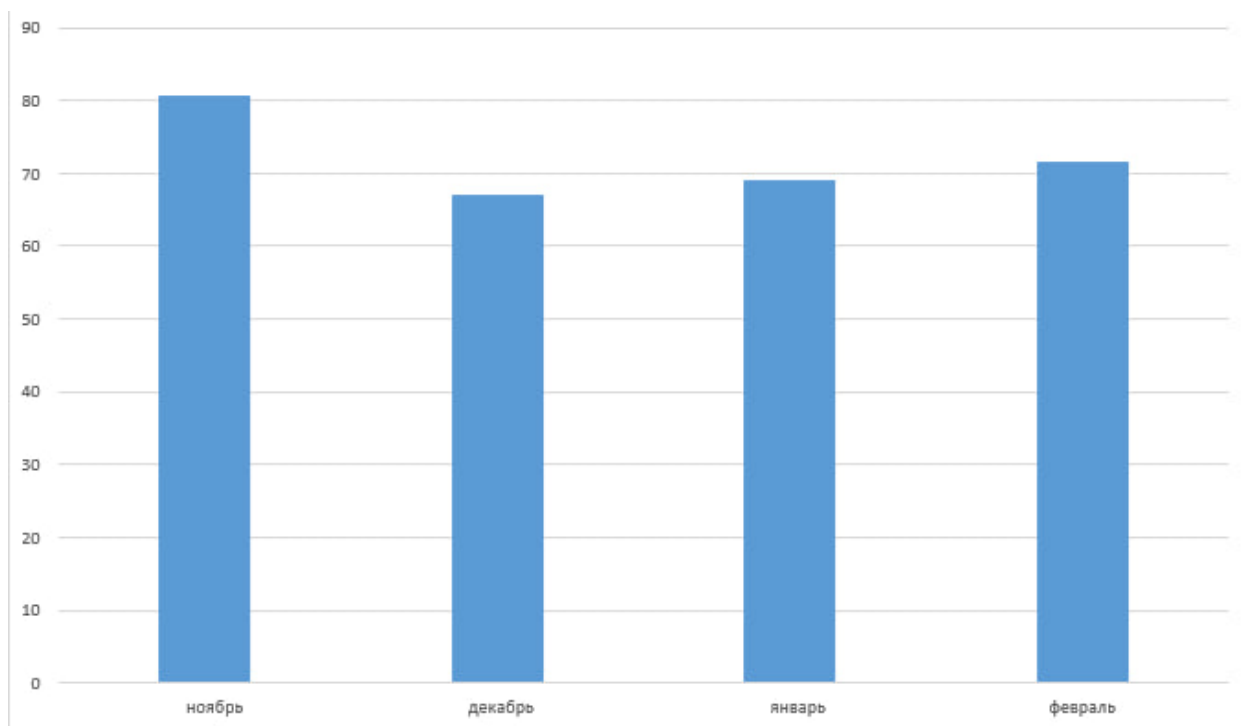


Рисунок 4. Среднемесячная относительная влажность воздуха в зимний период 2021-2022гг.

На диаграмме видно, что наибольшая влажность наблюдалась в ноябре, а наименьшая же в декабре.

В Якутии зимние туманы возникают при малой абсолютной, но высокой относительной влажности в сочетании с экстремальным холодом и застоем воздуха. Это уникальный механизм, не имеющий аналогов в умеренных широтах.

Далее были составлены графики числа туманов и относительной влажности, для отслеживания корреляции двух этих значений (рис.5).

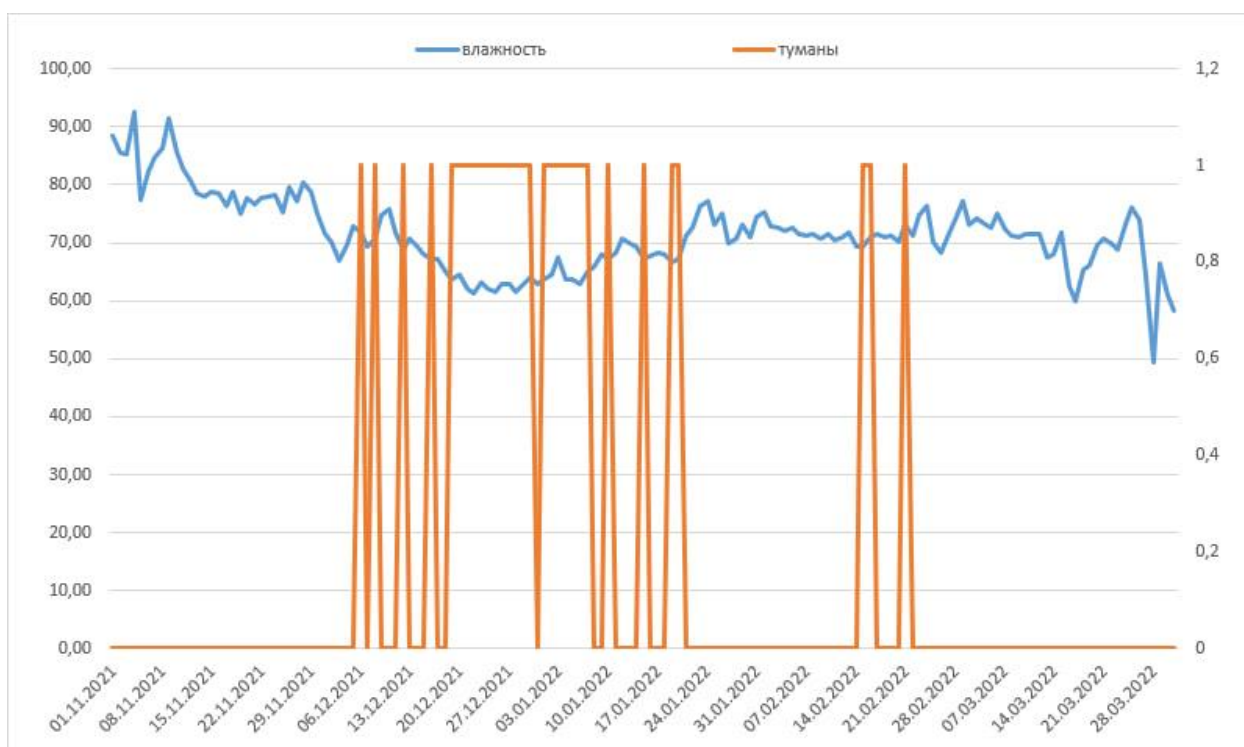


Рисунок 5. График зависимости возникновения туманов от относительной влажности воздуха.

На рисунке видно, что туманы возникали в те дни, где значения относительной влажности воздуха наиболее невелики.

В условиях экстремально низких температур Якутска (часто ниже -40°C) ледяные туманы формируются по уникальному механизму, отличающемуся от классического туманообразования в умеренных широтах.

Даже при 50-60% относительной влажности количество влаги недостаточно для обычного тумана, однако для ледяных кристаллов этого достаточно благодаря особым условиям сублимации. Прямой переход водяного пара в лед, минуя жидкую фазу происходит при температуре ниже -30°C , требуя наличия ядер сублимации (пыль, продукты сгорания).

Далее проанализируем сочетание туманов с температурой воздуха. Это имеет важное значение, т.к. видим, что больше всего туманы наблюдаются в зимнее время (табл.5).

Таблица 5. Среднемесячная температура воздуха в зимние периоды 2012-2022гг.

Период	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль
2012-2013	-29,23	-35,50	-40,09	-33,28
2013-2014	-25,26	-30,29	-41,42	-31,79
2014-2015	-25,45	-38,82	-33,56	-27,76
2015-2016	-26,30	-34,36	-34,70	-35,14
2016-2017	-26,70	-36,90	-33,79	-30,97
2017-2018	-29,13	-38,33	-37,22	-32,86
2018-2019	-23,57	-33,39	-35,79	-30,26
2019-2020	-25,73	-38,49	-31,41	-28,09
2020-2021	-19,68	-38,64	-44,52	-32,39
2021-2022	-21,34	-38,30	-35,67	-30,12

Была рассчитана среднемесячная температура воздуха в зимний период 2012-2022гг. Для примера так же был рассмотрен зимний период 2021-2022гг. (рис.6.).

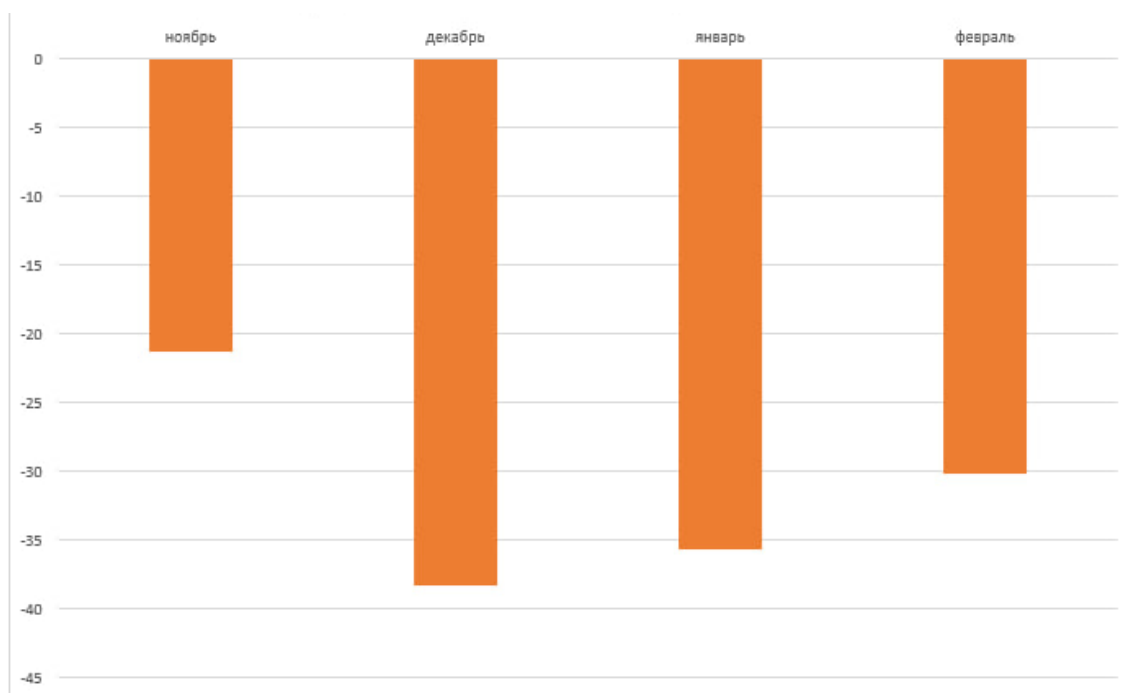


Рисунок 6. Среднемесячная температура воздуха в зимний период 2021-2022гг.

На данной диаграмме видно, что наименьшее значение температуры воздуха приходилось на декабрь, наибольшее же на ноябрь.

В условиях Якутска ледяные туманы формируются в строго определенном температурном интервале:

Нижний порог: -35°C – при более низких температурах образование затруднено из-за крайне низкого содержания водяного пара.

Оптимальный диапазон: -40°C до -30°C – максимальная частота возникновения.

Верхний предел: -25°C – переход в фазу переохлажденных водяных туманов.

Далее так же были составлены графики числа туманов и температуры воздуха, для отслеживания корреляции двух этих значений (рис.7).

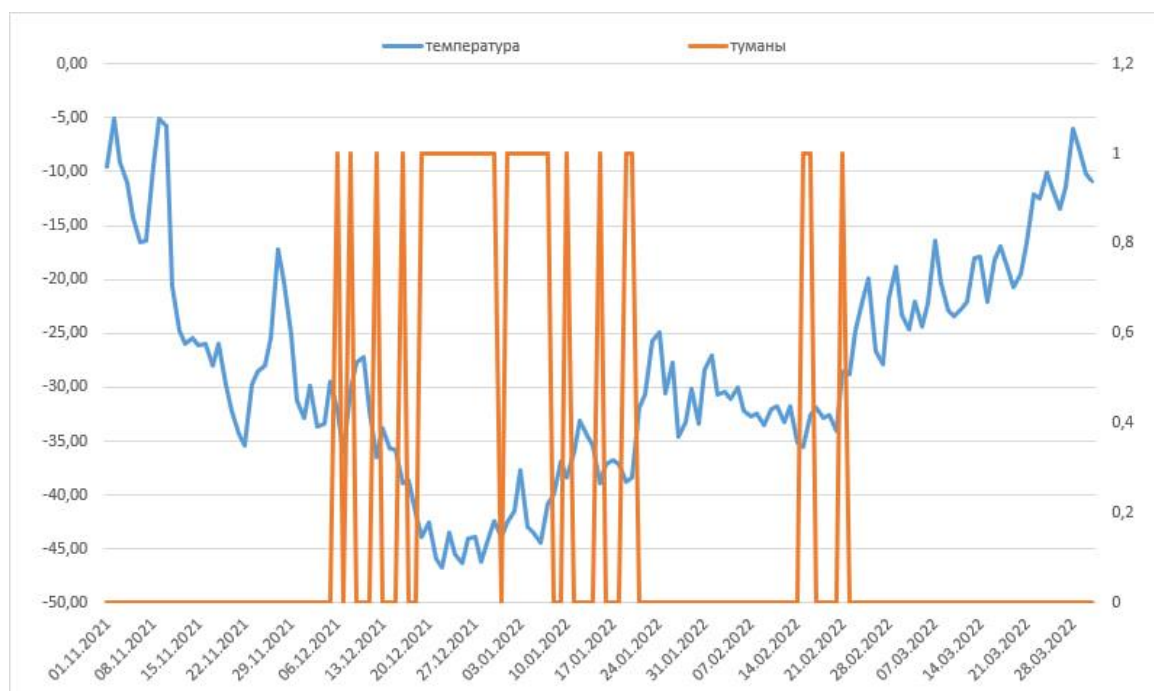


Рисунок 7. График зависимости возникновения туманов от температуры воздуха.

На рисунке видно, что туманы возникали в те дни, где значения температуры воздуха имеют наиболее низкие значения. И используя парные значения числа дней с туманами и с температурой воздуха определили коэффициент парной корреляции между этими значениями и она составила

0,64, что свидетельствует у среднем уровне влияния низких температур воздуха на число дней с туманами (рис.8).

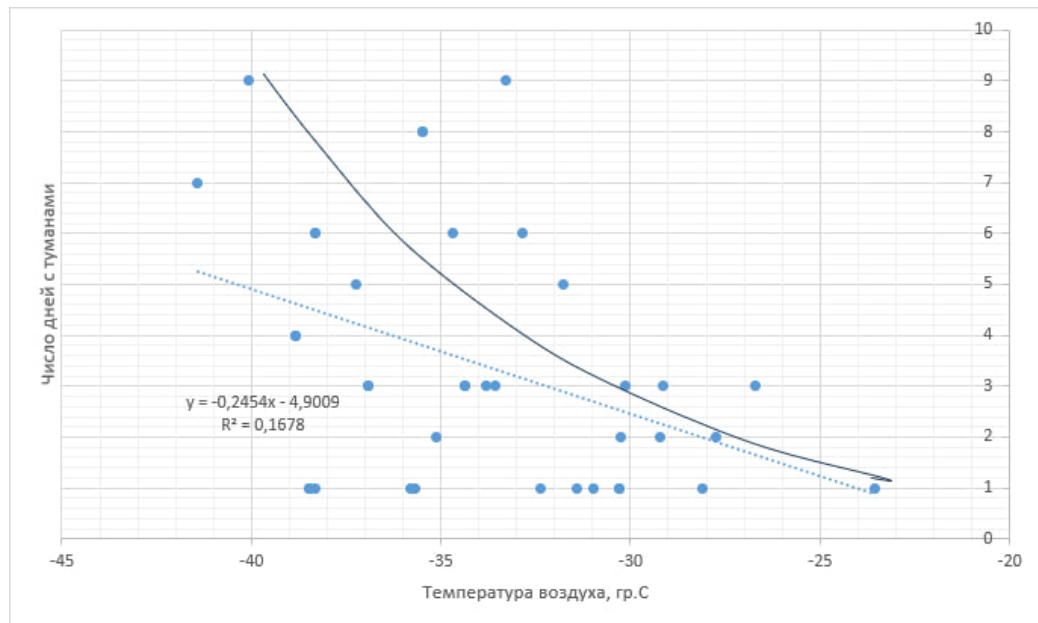


Рисунок 8. Корреляционный график зависимости числа дней с туманами и температуры воздуха.

По графику видно, что есть некоторая тенденция к увеличению количества числа дней с туманами с понижением температуры воздуха. И связь обратная, чем ниже температура, тем больше туманов.

Экстремальный холод (-40°C и ниже) вызывает мгновенную кристаллизацию пара в ледяные кристаллы, минуя жидкую фазу. Минимум ветра (штиль) и мощные инверсии «запирают» влагу у поверхности. Техногенные факторы (выбросы ТЭЦ, дыхание города) дают: ядра конденсации (аэрозоли) и дополнительную влагу. Локальные источники (полюньи, испарения льда) поддерживают высокую относительную влажность (70-90%) при мизерном абсолютном содержании воды в воздухе.

Данный механизм принципиально отличается от процессов туманообразования в умеренных широтах, что объясняет уникальность якутских ледяных туманов как климатического феномена.

Итог: туманы образуются именно в сильные морозы из-за уникального сочетания физики фазовых переходов и местных условий.

3. Дистанционное зондирование туманов в Якутии

3.1. Методология спутникового наблюдения: технологические аспекты и практическое применение

Современная методология спутникового наблюдения представляет собой сложную междисциплинарную систему, объединяющую достижения космического приборостроения, физики атмосферы и цифровых технологий обработки больших данных. В контексте исследования атмосферных процессов эта методологическая платформа претерпела значительную эволюцию - от простого визуального анализа изображений до комплексных систем автоматизированного мониторинга с элементами искусственного интеллекта. Технологические аспекты современных наблюдений базируются на принципе мультисенсорного подхода, когда комбинирование данных различных диапазонов электромагнитного спектра позволяет реконструировать трехмерную структуру атмосферных явлений с беспрецедентной точностью.

Физико-математическая основа методологии спутникового зондирования атмосферы опирается на фундаментальные законы радиационного переноса, учитывающие взаимодействие электромагнитного излучения с частицами различной природы и размеров. Современные алгоритмы обработки спутниковых данных включают сложные модели атмосферной коррекции, позволяющие выделить полезный сигнал из совокупности различных искажающих факторов. Особое значение приобретает разработка специализированных спектральных индексов, адаптированных для идентификации конкретных атмосферных явлений - в случае туманов это нормализованные показатели, основанные на разности яркостных температур в различных инфракрасных каналах.

Технологический арсенал современного спутникового мониторинга включает несколько поколений космических аппаратов с

взаимодополняющими характеристиками. Геостационарные спутники (типа GOES-R или Himawari) обеспечивают непрерывное наблюдение с высоким временным разрешением (до 10 минут), что критически важно для изучения динамики быстроразвивающихся атмосферных процессов. Полярно-орбитальные системы (такие как MODIS или VIIRS) предоставляют данные с более высоким пространственным разрешением (до 250 м), позволяющие детализировать структуру наблюдаемых явлений. Перспективным направлением является использование спутников с активными лидарными системами (CALIPSO), способными предоставлять вертикальные профили атмосферных параметров.

Практическое применение методологии спутникового наблюдения в метеорологии трансформировало традиционные подходы к прогнозированию атмосферных явлений. Оперативные системы ассимиляции спутниковых данных в численные модели прогноза погоды позволили значительно повысить точность краткосрочных и среднесрочных прогнозов. В контексте мониторинга туманов спутниковые технологии обеспечивают принципиально новые возможности для:

- 1) Раннего обнаружения зон туманообразования
- 2) Отслеживания их пространственной динамики
- 3) Оценки микрофизических характеристик
- 4) Прогнозирования времени рассеивания

Современные технологические тренды в области спутникового мониторинга связаны с развитием систем искусственного интеллекта для автоматической классификации атмосферных объектов. Глубокое машинное обучение на основе нейросетевых архитектур позволяет выявлять сложные пространственно-временные паттерны в данных, недоступные традиционным алгоритмам обработки. Особую перспективу представляет интеграция спутниковых данных с показаниями наземных сенсорных сетей и беспилотных наблюдательных платформ, создающая основу для распределенных систем мониторинга атмосферных явлений.

Методологические аспекты обработки спутниковых данных постоянно совершенствуются с учетом развития вычислительных технологий. Современные облачные платформы (Google Earth Engine, AWS Ground Station) предоставляют исследователям беспрецедентные возможности для обработки больших массивов спутниковой информации без необходимости создания дорогостоящей локальной инфраструктуры. Развитие технологий распределенных реестров (blockchain) открывает новые перспективы для создания децентрализованных систем валидации и сертификации спутниковых данных.

Эффективность практического применения методологии спутникового наблюдения существенно зависит от качества калибровки и верификации получаемых данных. Современные подходы к валидации включают сложные схемы межспутниковой калибровки, сравнение с наземными лидарными измерениями и аэрологическим зондированием, а также статистический анализ долговременных рядов наблюдений. Особое значение приобретает разработка регионально адаптированных алгоритмов интерпретации данных, учитывающих специфику местных атмосферных условий и характеристик подстилающей поверхности.

Для мониторинга туманов особенно важны:

- 1) Видимый диапазон (0,4–0,7 мкм) - позволяет визуализировать пространственное распределение тумана по его отражательной способности;
- 2) Инфракрасные каналы (10–12 мкм) - дают возможность определять температурные характеристики и вертикальную структуру туманного слоя;
- 3) Микроволновое зондирование - эффективно при наблюдении в условиях полярной ночи и через облачный покров.

Таблица 5. Классификация методов дистанционного зондирования.

Критерий	Пассивное зондирование	Активное зондирование
Источник сигнала	Солнце или тепловое излучение Земли	Спутник излучает сигнал (радар, лидар)

Примеры	MODIS, VIIRS, Sentinel-3	Sentinel-1 (SAR), CloudSat (лидар)
Преимущества	Не требует энергии на излучение	Работает ночью и сквозь облака
Недостатки	Зависит от освещенности и облачности	Сложнее в обработке данных

Спектральные характеристики спутникового мониторинга.

Принцип работы спутникового зондирования основывается на дифференцированном взаимодействии различных объектов с электромагнитными волнами. Каждый тип поверхности и атмосферного явления обладает уникальными спектральными характеристиками отражения и излучения, что позволяет проводить их детальную идентификацию и анализ.

Видимый спектр (0.4–0.7 мкм) находит широкое применение в задачах картографирования и мониторинга антропогенных объектов. Спутниковые системы типа Landsat и Sentinel-2 обеспечивают съемку с пространственным разрешением 10–30 метров, однако их использование ограничено светлым временем суток. Ближний инфракрасный диапазон (0.7–1.3 мкм) особенно важен для оценки состояния растительного покрова через расчет вегетационных индексов и анализа влажности почв, что реализовано в приборах MODIS и Sentinel-2.

Коротковолновая инфракрасная область (1.3–3 мкм) демонстрирует высокую эффективность при детектировании очагов возгораний и геологических исследованиях. Спутниковые аппараты ASTER и Landsat оснащены специальными каналами для работы в этом диапазоне. Тепловая инфракрасная съемка (3–14 мкм) позволяет определять температурные характеристики поверхности, что применяется в системах мониторинга VIIRS и Sentinel-3 для выявления тепловых аномалий различного происхождения.

Микроволновый диапазон представлен двумя принципиально разными подходами. Пассивные микроволновые радиометры (AMSR-2, SMOS) используются для измерения параметров окружающей среды независимо от времени суток и облачности. Активные радиолокационные системы, такие как

Sentinel-1, обеспечивают всепогодный мониторинг поверхности с возможностью детектирования минимальных деформаций земной коры и загрязнений акваторий. Каждый из спектральных диапазонов вносит уникальный вклад в комплексное изучение земной поверхности и атмосферных явлений, включая мониторинг туманов в условиях Якутии.

Методика обработки спутниковых данных для мониторинга туманов.

Современная методология обработки космической информации для детектирования и анализа туманных массивов представляет собой многоуровневый аналитический процесс, интегрирующий физические принципы атмосферной оптики, алгоритмы цифровой обработки изображений и методы машинного обучения. Технологическая цепочка преобразования исходных спутниковых данных в информативные слои пространственного распределения туманов требует тщательной методологической проработки каждого этапа – от первичной радиометрической коррекции до тематического картографирования и количественной оценки параметров туманного покрова.

Физической основой методики выступает анализ спектральных характеристик туманных образований в различных диапазонах электромагнитного спектра. В видимом диапазоне (0,4–0,7 мкм) туманы проявляют высокую отражательную способность вследствие интенсивного рассеяния солнечного излучения на водяных каплях, тогда как в ближнем инфракрасном диапазоне (3,5–4,0 мкм) наблюдается существенное поглощение излучения, связанное с фазовым состоянием частиц. Особое диагностическое значение имеет средний инфракрасный диапазон (10,5–12,5 мкм), где яркостная температура туманного слоя отражает его вертикальную структуру и термические характеристики.

Первичная обработка спутниковых данных начинается с процедур радиометрической калибровки, преобразующей цифровые значения пикселей в физические величины спектральной яркости. Для современных мультиспектральных сканеров типа MODIS или VIIRS этот этап включает учет временной деградации чувствительности сенсоров и пространственной

неоднородности отклика детекторов. Последующая геометрическая коррекция устраняет искажения, вызванные кривизной Земли, рельефом местности и особенностями проекции сканирующей системы, обеспечивая точную привязку данных к географическим координатам.

Ключевым этапом методики является атмосферная коррекция, направленная на выделение полезного сигнала от туманного образования из общего радиационного потока. Применение моделей переноса излучения (6S, MODTRAN) с учетом вертикальных профилей температуры, влажности и аэрозольного состава позволяет компенсировать влияние вышележащих слоев атмосферы. Для полярных регионов особое значение приобретает учет многократного рассеяния на ледяных кристаллах и снежном покрове, требующий модификации стандартных алгоритмов коррекции.

Алгоритмы автоматизированного детектирования туманов основываются на комбинации спектральных критериев и текстурного анализа. Наиболее эффективными оказываются:

- разностные индексы яркостных температур в инфракрасных каналах
- нормализованные показатели контраста между туманом и подстилающей поверхностью
- пространственные характеристики однородности облачного покрова
- временная динамика изменения оптических свойств

Для сложных случаев (различение тумана и низкой облачности) применяются алгоритмы многокритериальной классификации, учитывающие вертикальные профили температуры, полученные с микроволновых звуучателей или данных радиозондирования.

Современные методы обработки включают технологии машинного обучения, где нейросетевые архитектуры (сверточные сети, U-Net) обучаются на размеченных наборах спутниковых данных. Этот подход особенно эффективен для идентификации туманов в сложных ландшафтных условиях, когда традиционные спектральные методы демонстрируют низкую надежность. Обученные модели способны выявлять сложные

пространственные паттерны и учитывать контекстные взаимосвязи между различными участками изображения.

Верификация результатов обработки проводится путем сравнения с наземными наблюдениями метеостанций, данными аэрологического зондирования и измерениями специализированных лидарных систем. Статистический анализ точности классификации включает расчет матрицы ошибок, показателей полноты и точности детектирования, а также оценку пространственного соответствия границ туманных массивов.

Перспективным направлением развития методики является создание интегрированных аналитических платформ, объединяющих спутниковые данные различных разрешений, прогностические модели атмосферных процессов и системы поддержки принятия решений. Такие комплексы позволяют не только фиксировать текущее состояние туманного покрова, но и прогнозировать его эволюцию с учетом синоптической обстановки и локальных физико-географических условий.

Основные спутниковые системы.

Характеристики основных спутниковых систем приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6. Мультиспектральные спутники

Спутник	Диапазоны	Разрешение	Применение
Landsat-9	VIS, NIR, SWIR, TIR	30 м (VIS)	Мониторинг землепользования
Sentinel-2	13 каналов (VIS–SWIR)	10–60 м	Сельское хозяйство
MODIS	36 каналов	250–1000 м	Климат, пожары

Таблица 7. Радарные системы

Спутник	Диапазон	Разрешение	Применение
Sentinel-1	С-диапазон	5–40 м	Мониторинг катастроф

TerraSAR-X	X-диапазон	1–16 м	Военная разведка
------------	------------	--------	------------------

Лидарные системы.

ICESat-2 – лазерное зондирование для измерения толщины льда и рельефа.

Применение и перспективы спутникового мониторинга.

Современные технологии космического зондирования находят широкое применение в различных сферах научной и практической деятельности. В метеорологической отрасли данные с аппаратов GOES и MetOp существенно повышают точность прогнозов погоды, в то время как специализированные системы типа CYGNSS позволяют отслеживать развитие тропических циклонов. Экологический мониторинг использует спутниковые данные для контроля лесных массивов и анализа атмосферных загрязнений, что особенно актуально для промышленных регионов.

Океанографические исследования опираются на спутниковые измерения уровня моря и фиксацию концентрации хлорофилла, дающие ценную информацию о состоянии морских экосистем. В сфере безопасности и чрезвычайных ситуаций особое значение приобретают системы оперативного обнаружения пожаров и нефтяных загрязнений акваторий.

Перспективные направления развития:

Современные тенденции в области дистанционного зондирования связаны с внедрением гиперспектральных технологий, обеспечивающих детальный анализ химического состава поверхности. Значительный потенциал имеют наноспутниковые системы, предлагающие экономичное решение для оперативного мониторинга. Особую роль играют методы искусственного интеллекта, позволяющие автоматизировать процесс выявления изменений на земной поверхности.

Заключительные положения:

Космический мониторинг представляет собой важнейший инструмент изучения нашей планеты, объединяющий достижения физики,

алгоритмической обработки данных и технологий больших массивов информации. Совершенствование радиолокационных систем и внедрение интеллектуальных методов анализа открывают новые возможности для решения актуальных задач в области климатических исследований, экологического контроля и управления чрезвычайными ситуациями. Эти разработки приобретают особую значимость в условиях нарастающих глобальных изменений окружающей среды.

3.2. Спутниковый мониторинг туманов в Якутии: комплексный анализ методов и технологий.

Методологическая основа спутникового мониторинга в Якутии базируется на синтезе мультиспектрального анализа, машинного обучения и физического моделирования атмосферных процессов. Особенностью региона выступает необходимость одновременного учета нескольких специфических факторов: экстремальных температурных градиентов, высокой отражательной способности снежного покрова, особенностей фазовых переходов влаги в условиях сверхнизких температур и выраженного антропогенного влияния в урбанизированных зонах. Эти условия требуют существенной модификации общепринятых алгоритмов детектирования туманов и разработки специализированных региональных моделей интерпретации спутниковых данных.

Технологическая платформа мониторинга интегрирует данные различных орбитальных группировок, каждая из которых вносит уникальный вклад в изучение туманных явлений. Геостационарные спутники (Himawari-8/9, GOES) обеспечивают непрерывное наблюдение с временным разрешением до 10 минут, что критически важно для отслеживания быстрой динамики туманов в условиях резких температурных колебаний. Полярно-орбитальные системы (MODIS, VIIRS, Sentinel-3) предоставляют данные высокого пространственного разрешения, позволяющие детализировать

микрофизическую структуру туманных массивов. Перспективные активные сенсоры (CALIPSO, CloudSat) дают информацию о вертикальном распределении туманных частиц, существенно дополняя пассивные наблюдения.

Аналитический аппарат исследования включает многоуровневую систему обработки данных, где особое внимание уделяется:

- адаптивной радиометрической коррекции с учетом сезонных изменений подстилающей поверхности
- специализированным алгоритмам атмосферной коррекции для условий низких температур
- гибридным методам классификации, сочетающим физические и статистические подходы
- нейросетевым моделям, обученным на региональных эталонах туманных образований

Для условий Якутии разрабатываются уникальные спектральные индексы, учитывающие специфику взаимодействия излучения с переохлажденными каплями и ледяными кристаллами. Особую сложность представляет различение туманов и ледяной дымки, требующее привлечения данных микроволнового зондирования и анализа поляризационных характеристик отраженного сигнала.

Верификация результатов спутникового мониторинга осуществляется через разветвленную систему наземных валидационных измерений, включающую:

- сеть автоматических метеорологических станций со специализированными датчиками видимости
- мобильные лидарные комплексы для определения вертикальной структуры туманов
- аэрологическое зондирование с ледовых аэродромов
- камерные системы круглосуточного наблюдения

Современные тенденции развития технологий мониторинга связаны с созданием интеллектуальных аналитических платформ, объединяющих спутниковые данные с прогностическими моделями мезомасштабной циркуляции атмосферы. Особую актуальность для Якутии приобретают системы раннего предупреждения об опасных туманных явлениях, способные учитывать как природные факторы, так и антропогенное влияние урбанизированных территорий.

Оптические свойства ледяных туманов и их значение для дистанционного зондирования.

Туман, как сложная гетерогенная система, состоящая из взвешенных в воздухе микроскопических капель или кристаллов льда, представляет собой уникальный объект для дистанционного зондирования. Его оптические характеристики, формирующиеся под влиянием микрофизических параметров и атмосферных условий, создают специфический сигнал, который может быть зарегистрирован спутниковыми сенсорами различных диапазонов. Понимание природы этих оптических свойств открывает новые возможности для совершенствования методов мониторинга, особенно в сложных климатических условиях, подобных якутским.

Физико-оптические основы взаимодействия излучения с туманом.

Фундаментальное значение для дистанционного зондирования туманов имеет процесс рассеяния электромагнитного излучения на аэрозольных частицах. В зависимости от соотношения длины волны зондирующего излучения и размеров капель (обычно 1–50 мкм) проявляются различные эффекты:

- Рэлеевское рассеяние (для частиц значительно меньших длины волны)
- Ми-рассеяние (когда размеры частиц сопоставимы с длиной волны)
- Геометрическая оптика (для крупных частиц)

Особый интерес представляет аномальное рассеяние в ближнем инфракрасном диапазоне (3.7–4.0 мкм), где капли тумана демонстрируют уникальные резонансные свойства. Этот эффект лег в основу современных

алгоритмов автоматического детектирования туманов по данным геостационарных спутников.

Спектральные подписи туманов в различных диапазонах зондирования

Каждый диапазон электромагнитного спектра предоставляет особую информацию о свойствах тумана:

1) Видимый диапазон (0.4–0.7 мкм)

- Высокое альbedo (70–90%) из-за многократного рассеяния
- Характерное "размытие" контуров объектов
- Зависимость от солнечной освещенности (ограничение в полярную ночь)

2) Ближний инфракрасный (1.5–4.0 мкм)

- Чувствительность к фазовому состоянию частиц (вода/лед)
- Возможность ночного детектирования
- Информация о вертикальной структуре

3) Термальный инфракрасный (8–12 мкм)

- Тепловое излучение верхней границы тумана
- Возможность оценки температуры поверхности тумана
- Менее подвержен влиянию солнечного излучения

4) Микроволновый диапазон (18–37 ГГц)

- Способность проникать сквозь туман
- Информация о водозапасе и температуре
- Независимость от времени суток

Поляриметрические характеристики как дополнительный диагностический инструмент

Современные методы дистанционного зондирования все чаще используют поляризационные свойства рассеянного туманами излучения.

Угол поляризации и степень деполяризации содержат ценную информацию о:

- Форме частиц (различие водяных капель и ледяных кристаллов)
- Распределении частиц по размерам
- Вертикальной неоднородности туманного слоя

Эти данные особенно важны для различения переохлажденных туманов и ледяных дымок, часто встречающихся в условиях Якутии.

Методологические аспекты интерпретации оптических сигналов

Обработка спутниковых данных о туманах требует учета ряда специфических факторов:

- Влияние подстилающей поверхности (особенно снежного покрова)
- Атмосферные помехи (аэрозоли, высокие облака)
- Суточные вариации оптических характеристик
- Региональные особенности микрофизики туманов

Современные алгоритмы (например, COSMO-FOG, SAT-FOG) используют комплексный подход, сочетая прямые измерения с радиационными моделями переноса в облачных средах.

Перспективные направления исследований

Развитие технологий дистанционного зондирования открывает новые возможности изучения оптических свойств туманов:

- 1) Гиперспектральное зондирование (разрешение до 1 нм)
- 2) Активное лидарное зондирование с борта спутников
- 3) Многоугловые системы наблюдения
- 4) Квантовые методы детектирования

Особую ценность представляет интеграция оптических данных с результатами численного моделирования микрофизических процессов в туманах.

Заключение: от фундаментальных свойств к прикладным решениям

Глубокое понимание оптических свойств туманов позволяет не только совершенствовать методы их детектирования, но и разрабатывать прогностические модели повышенной точности. Для условий Якутии, где туманы представляют серьезную опасность для транспорта и промышленности, это направление исследований приобретает особую практическую значимость. Дальнейшее развитие спутниковых технологий в сочетании с прогрессом в области атмосферной оптики обещает

революционные изменения в системе мониторинга и прогнозирования этого опасного явления.

Ключевые диагностические параметры спутникового мониторинга ледяных туманов в Якутии.

Якутия, с её экстремальными климатическими условиями, представляет собой уникальный полигон для исследования туманов, где традиционные методы наблюдения сталкиваются с существенными ограничениями. В этом контексте спутниковый мониторинг становится не просто альтернативой, а основным инструментом диагностики, обеспечивающим высокую точность и пространственную детализацию. Однако эффективность такого мониторинга напрямую зависит от корректного выбора и интерпретации ключевых диагностических параметров, которые позволяют не только обнаружить туман, но и оценить его физические и динамические характеристики.

Спектральные индикаторы: от видимого диапазона до микроволнового зондирования

Туман, как метеорологическое явление, обладает специфическими оптическими свойствами, которые могут быть зафиксированы с помощью мультиспектральной спутниковой съёмки. В дневное время наиболее информативным оказывается видимый диапазон (0,4–0,7 мкм), где высокая отражательная способность тумана контрастирует с тёмными поверхностями тайги или речных долин. Однако в условиях полярной ночи, которая в Якутии может длиться несколько месяцев, приоритет смещается в сторону инфракрасных каналов (3,7–12 мкм).

Критически важным параметром является разница яркостных температур между каналами 3,9 мкм и 10,8 мкм. Туман, состоящий из мельчайших капель воды, демонстрирует значительное рассеивание в коротковолновом ИК-диапазоне, что позволяет отличить его от низкой слоистой облачности. Для арктических регионов особую роль играет микроволновое зондирование (18–37 ГГц), поскольку оно не зависит от

солнечной освещённости и способно проникать сквозь тонкие туманные слои, фиксируя температурные аномалии у поверхности.

Термодинамические маркеры: температурные инверсии и вертикальные профили

Одним из ключевых факторов, способствующих длительному сохранению туманов в Якутии, являются приземные температурные инверсии, когда холодный воздух оказывается «запертым» под слоем более тёплого. Спутниковые радиометры, такие как AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) или IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), позволяют реконструировать вертикальные профили температуры с точностью до 1–2°C, что крайне важно для прогнозирования устойчивости тумана.

Особый интерес представляет потенциал конденсации, который может быть оценён через интеграцию данных о влажности и температуре. В зимний период, когда относительная влажность достигает 90–95%, а температуры опускаются ниже –40°C, даже незначительные колебания этих параметров могут спровоцировать мгновенное образование ледяного тумана – явления, характерного именно для Якутии.

Пространственно-временная динамика: разрешающая способность и частота съёмки

Для мониторинга быстро меняющихся туманов в условиях Якутии критически важны два параметра: пространственное разрешение и временная периодичность наблюдений. Геостационарные спутники, такие как Himawari-8, обеспечивающие съёмку каждые 10 минут, идеально подходят для отслеживания динамики, однако их разрешение (0,5–2 км) может быть недостаточным для локальных объектов. В свою очередь, полярно-орбитальные аппараты (например, Sentinel-3) предлагают детализацию до 300 м, но с интервалом в несколько часов.

Компромиссным решением становится синтетическая апертурная радиолокация (SAR), используемая спутниками Sentinel-1. Радарные снимки с разрешением 5×5 м позволяют выявлять даже небольшие очаги тумана,

особенно вблизи транспортных магистралей, где точность принципиально важна. Однако интерпретация SAR-данных требует сложной постобработки, включая фильтрацию шумов и учёт рельефа местности.

Интеграционные подходы: машинное обучение и ассимиляция данных

Современные методы диагностики туманов в Якутии уже не ограничиваются простым анализом спутниковых снимков. На первый план выходят гибридные модели, объединяющие данные ДЗЗ с прогнозами численных моделей атмосферы (например, WRF – Weather Research and Forecasting). Машинное обучение, в частности свёрточные нейронные сети (CNN), демонстрирует высокую эффективность в автоматическом детектировании туманов, обучаясь на исторических архивах спутниковых данных и метеонаблюдений.

Особый потенциал имеет ассимиляция данных – процесс интеграции спутниковых измерений в реальном времени в метеорологические модели. Например, использование алгоритма 3D-Var позволяет корректировать прогнозы туманов с учётом актуальных спутниковых наблюдений, что значительно повышает их точность.

Заключение: от диагностики к управлению рисками

Ключевые диагностические параметры спутникового мониторинга туманов в Якутии формируют комплексную систему, которая не только фиксирует текущее состояние атмосферы, но и прогнозирует развитие событий. Учитывая экономическую и социальную значимость региона – от авиации и автотранспорта до добывающей промышленности – дальнейшее совершенствование этих параметров остаётся стратегической задачей. Внедрение квантовых сенсоров, развитие группировок наноспутников и углублённый анализ big data откроют новые горизонты в понимании и предсказании одного из самых сложных метеорологических явлений Арктики.

Спутниковые системы для мониторинга туманов в условиях Якутии.

В условиях сурового климата Якутии, где температурные контрасты, продолжительные зимние антициклоны и высокая влажность создают

идеальные условия для образования густых и устойчивых туманов, традиционные методы метеонаблюдений демонстрируют свою ограниченность. На этом фоне спутниковые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) становятся ключевым инструментом в прогнозировании и анализе туманообразования, обеспечивая непрерывный мониторинг обширных и труднодоступных территорий.

Современные технологии спутникового детектирования туманов

Спектральные возможности современных геостационарных и полярно-орбитальных спутников, таких как Himawari-8, GOES-R и Meteosat Third Generation, позволяют идентифицировать туман даже в условиях полярной ночи, используя комбинацию инфракрасных и видимых каналов. Методы мультиспектрального анализа, включая алгоритмы Fog Product и Night Fog Microphysics, основанные на разнице температур между поверхностью и нижней границей облаков, дают возможность с высокой точностью определять пространственное распределение туманов.

В условиях Якутии, где температурные инверсии усиливают продолжительность и плотность туманов, особую ценность приобретают данные лидарного зондирования со спутников серии CALIPSO, способных дифференцировать слоистые туманы от низкой облачности. Дополнительный потенциал раскрывается при интеграции спутниковых измерений с нейросетевыми моделями, обученными на климатических данных региона, что позволяет прогнозировать туманы с учётом локальных особенностей – влияния рек Лена и Вилюй, антропогенных выбросов и ледовых испарений.

Проблемы и адаптивные решения

Несмотря на высокую технологичность спутниковых систем, их применение в арктических и субарктических зонах сталкивается с рядом вызовов. Низкие температуры (до -60°C) искажают показания инфракрасных сенсоров, а длительные периоды полярной ночи ограничивают использование видимого диапазона. Для минимизации погрешностей применяются комбинированные алгоритмы, включающие радиолокационные

данные SAR-спутников (например, Sentinel-1), которые фиксируют микроволновое излучение, не зависящее от освещённости.

Кроме того, в условиях Якутии критически важна высокая временная разрешающая способность наблюдений. Геостационарные аппараты, обеспечивающие съёмку каждые 10–15 минут, позволяют отслеживать динамику туманообразования в режиме реального времени, что особенно актуально для транспортной инфраструктуры – авиационных трасс и автодорог, таких как федеральная трасса «Колыма».

Перспективы развития: от мониторинга к предиктивному анализу

Будущее спутникового мониторинга туманов в Якутии связано с внедрением технологий искусственного интеллекта и гиперспектрального зондирования. Проекты вроде Arctic Weather Satellite (ESA) обещают повысить точность прогнозов за счёт специализированных микроволновых радиометров, адаптированных к высоким широтам. Параллельно развитие наноспутниковых группировок (CubeSat) может обеспечить детализированный охват удалённых районов, где стационарные метеостанции отсутствуют.

Важным направлением остаётся синтез данных – объединение спутниковых снимков с показаниями наземных датчиков, дронов и даже краудсорсинговых наблюдений от местных жителей. Такой подход не только повышает достоверность моделей, но и открывает путь к созданию цифровых двойников туманоопасных зон, способных имитировать сценарии развития событий при изменении климатических параметров.

Заключение

Спутниковые системы мониторинга туманов в Якутии представляют собой симбиоз передовых технологий и адаптивных решений, преодолевающих экстремальные вызовы Арктики. Их дальнейшее совершенствование будет определять не только безопасность транспортных коридоров, но и эффективность сельского хозяйства, энергетики и экологического мониторинга в одном из самых суровых регионов планеты.

3.3. Методика обработки и анализа данных спутникового мониторинга ледяных туманов в Якутии

Современные методы исследования атмосферных явлений в условиях Арктики требуют комплексного подхода, сочетающего передовые технологии дистанционного зондирования с глубоким пониманием региональных климатических особенностей. В случае Якутии, где наблюдаются уникальные по своей природе ледяные туманы, формирующиеся при экстремально низких температурах, разработка специализированной методики обработки спутниковых данных приобретает особую актуальность. Основу методологии составляет многоуровневая система анализа, начинающаяся с этапа первичной обработки сырых спутниковых данных, включающей радиометрическую коррекцию с учетом деградации чувствительности сенсоров во времени и пространственной неоднородности отклика детекторов. Особое внимание уделяется геометрической коррекции, устраняющей искажения, вызванные кривизной Земли и особенностями орбитального движения космических аппаратов, что особенно важно для точной привязки данных в условиях полярных регионов.

Следующий критически важный этап - атмосферная коррекция, направленная на выделение полезного сигнала от туманных образований из общего радиационного потока. В условиях Якутии эта процедура требует учета целого ряда специфических факторов: экстремально низких температур, влияния снежного покрова с его высокой отражательной способностью, особенностей полярного дня и ночи. Для этих целей применяются модифицированные версии стандартных моделей переноса излучения, адаптированные к арктическим условиям, с введением дополнительных параметров, описывающих микрофизические свойства ледяных аэрозолей. Алгоритмы автоматизированного детектирования туманов основываются на комплексном анализе спектральных характеристик в различных диапазонах

электромагнитного спектра, где особое значение приобретают разностные индексы яркостных температур в инфракрасных каналах, позволяющие надежно дифференцировать ледяные туманы от других атмосферных явлений.

Современные методы машинного обучения, в частности глубокие нейронные сети, находят все более широкое применение для классификации туманных образований по спутниковым данным. Обученные на обширных массивах размеченных изображений, эти алгоритмы демонстрируют высокую эффективность в выявлении сложных пространственных паттернов, характерных для ледяных туманов Якутии. Особенностью региона является необходимость учета антропогенного фактора - промышленных выбросов и урбанизированных территорий, которые существенно модифицируют естественные процессы туманообразования. Для анализа микрофизических параметров туманов применяются инверсионные методы, основанные на решении обратных задач атмосферной оптики, позволяющие оценивать размеры кристаллов, их концентрацию и форму по данным многоканальных измерений.

Верификация результатов спутникового мониторинга в Якутии представляет собой сложную задачу, требующую привлечения данных наземных лидарных комплексов, микроволновых радиометров и сети автоматических метеостанций, специально адаптированных для работы в экстремальных климатических условиях. Разработанная методика находит практическое применение в системах раннего предупреждения об опасных метеорологических явлениях, оптимизации работы транспортной инфраструктуры и решении экологических задач региона. Перспективы дальнейшего развития связаны с внедрением гиперспектральных технологий, позволяющих проводить детальный анализ химического состава туманных частиц, и созданием интегрированных аналитических платформ, объединяющих спутниковые наблюдения с прогностическими моделями мезомасштабной циркуляции атмосферы.

3.4. Практические приложения спутникового мониторинга туманов в Якутии

Спутниковый мониторинг туманов в Якутии представляет собой неотъемлемую часть современных технологий, направленных на обеспечение безопасности, оптимизацию хозяйственной деятельности и улучшение качества жизни в условиях экстремального климата. Получаемые данные находят широкое применение в различных сферах, демонстрируя высокую эффективность и практическую значимость.

Транспортная сфера.

Одним из ключевых направлений использования спутникового мониторинга является обеспечение безопасности транспортной инфраструктуры. Ледяные туманы, характерные для Якутии, значительно снижают видимость, создавая риски для авиации, автомобильного транспорта и судоходства. Спутниковые данные позволяют оперативно определять пространственное распределение туманов, их плотность и динамику, что дает возможность корректировать маршруты и графики движения. Например, аэропорты Якутска и других населенных пунктов используют эту информацию для принятия решений о задержках или отмене рейсов, минимизируя аварийные ситуации. Для автомобильных дорог разрабатываются системы раннего предупреждения, которые помогают водителям избегать опасных участков, а дорожным службам — своевременно проводить противогололедную обработку.

Энергетика и коммунальное хозяйство.

Энергетический комплекс Якутии сталкивается с серьезными вызовами, связанными с обледенением линий электропередачи во время туманов. Спутниковый мониторинг позволяет прогнозировать зоны повышенного риска и планировать профилактические работы. Это особенно важно для удаленных районов, где перебои в энергоснабжении могут привести к критическим последствиям. Кроме того, данные мониторинга используются

коммунальными службами для оптимизации работы систем отопления и водоснабжения, учитывая влияние туманов на тепловой режим городской среды.

Экология и здоровье населения.

Туманы в Якутии часто сопровождаются повышенной концентрацией загрязняющих веществ, что негативно сказывается на экологической обстановке и здоровье людей. Спутниковые технологии позволяют отслеживать распространение смога, оценивать его состав и прогнозировать потенциально опасные периоды. Эта информация используется медицинскими учреждениями для подготовки к возможному увеличению числа пациентов с респираторными заболеваниями, а также для разработки рекомендаций по защите населения. Экологический мониторинг на основе спутниковых данных помогает выявлять источники загрязнения и контролировать эффективность природоохранных мероприятий.

Сельское хозяйство и оленеводство.

В сельскохозяйственных районах Якутии спутниковый мониторинг туманов играет важную роль в защите растений от заморозков и обледенения. Данные о температуре и влажности воздуха используются для планирования агротехнических мероприятий, таких как укрытие посевов или регулирование полива. Для оленеводческих хозяйств информация о туманах помогает прогнозировать условия выпаса, предотвращая потери скота из-за ухудшения видимости или обледенения пастбищ.

Градостроительство и инфраструктура.

Учет данных о туманах при проектировании городской инфраструктуры позволяет создавать более комфортные и безопасные условия для жизни. Например, при планировании застройки учитываются зоны частого образования туманов, что влияет на размещение жилых кварталов, транспортных узлов и промышленных объектов. Инженерные решения, такие как системы вентиляции и теплоизоляции зданий, также адаптируются к местным климатическим условиям на основе спутниковых наблюдений.

Наука и образование.

Спутниковый мониторинг туманов активно используется в научных исследованиях, направленных на изучение климатических изменений в Арктике. Данные, накопленные за годы наблюдений, помогают анализировать тенденции в частоте и интенсивности туманов, что важно для прогнозирования будущих изменений. Кроме того, эти материалы применяются в образовательных программах, позволяя студентам и школьникам изучать атмосферные процессы на реальных примерах.

Перспективные направления.

Развитие технологий искусственного интеллекта и машинного обучения открывает новые возможности для обработки спутниковых данных. Внедрение автоматизированных систем прогнозирования и раннего предупреждения позволит еще больше повысить эффективность мониторинга. Особый интерес представляет интеграция спутниковых данных с другими источниками информации, такими как наземные датчики и беспилотные летательные аппараты, что создаст единую систему наблюдения за атмосферными явлениями.

Таким образом, спутниковый мониторинг туманов в Якутии является мощным инструментом, который находит применение в самых разных сферах жизни. Его дальнейшее развитие и совершенствование будут способствовать повышению устойчивости региона к климатическим вызовам и улучшению условий проживания для его жителей.

Перспективы развития спутникового мониторинга с учетом особенностей Якутии.

Современные технологии спутникового наблюдения достигли значительных успехов в мониторинге природных и антропогенных процессов. Однако для таких сложных регионов, как Республика Саха (Якутия), существующие методы требуют существенной адаптации и дальнейшего совершенствования. Особое значение приобретает развитие

специализированных подходов, учитывающих экстремальные климатические условия и специфику местных ландшафтов.

Основные направления будущих исследований следует сконцентрировать на трех ключевых аспектах. Во-первых, необходимо совершенствование технических возможностей мониторинга, включая разработку новых спутниковых систем, способных обеспечивать качественную съемку в условиях полярной ночи и облачности. Особую важность приобретает создание специализированных алгоритмов обработки данных для изучения термокарстовых процессов и деградации вечной мерзлоты.

Во-вторых, требуется развитие комплексных систем анализа, сочетающих спутниковые данные с наземными наблюдениями. Интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения позволит автоматизировать процесс выявления критических изменений в состоянии мерзлоты, лесных массивов и гидрологических систем. Особое внимание следует уделить созданию региональных центров обработки данных в Якутске, что повысит оперативность получения и анализа информации.

В-третьих, необходимо сосредоточиться на практическом применении результатов мониторинга. Разрабатываемые системы должны быть ориентированы на решение конкретных задач: прогнозирование рисков для инфраструктуры, раннее предупреждение природных катастроф, оптимизацию землепользования. Важное значение имеет создание специализированных геоинформационных платформ, адаптированных к потребностям местных органов управления и научных учреждений.

Перспективы развития спутникового мониторинга в Якутии напрямую связаны с внедрением адаптивных технологий, учитывающих уникальные особенности региона. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание интегрированной системы наблюдения, сочетающей передовые космические технологии с локальными знаниями и практическим опытом.

Такой подход позволит не только решать текущие задачи, но и создавать основу для устойчивого развития территории в условиях меняющегося климата.

Практические результаты спутникового мониторинга туманов в Якутске.

Целью исследования спутникового мониторинга туманов стало понимание, можно ли спутники использовать и какова их надежность. В качестве примера были взяты спутниковые снимки Якутска и прилегающей территории, для оценки эффективности спутникового наблюдения за туманами (рис.8-10).

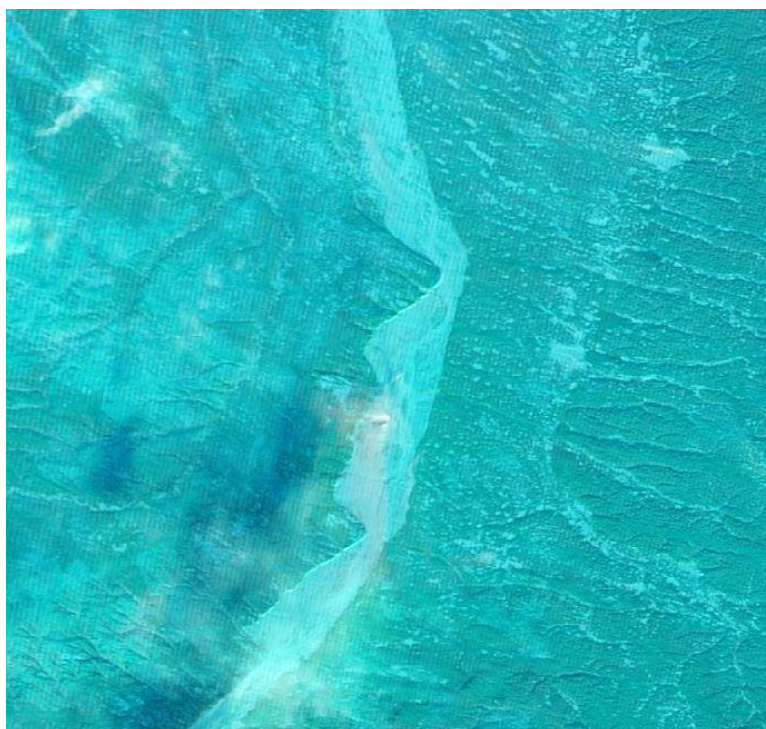


Рисунок 8. Спутниковый снимок Якутии 08.01.2015.

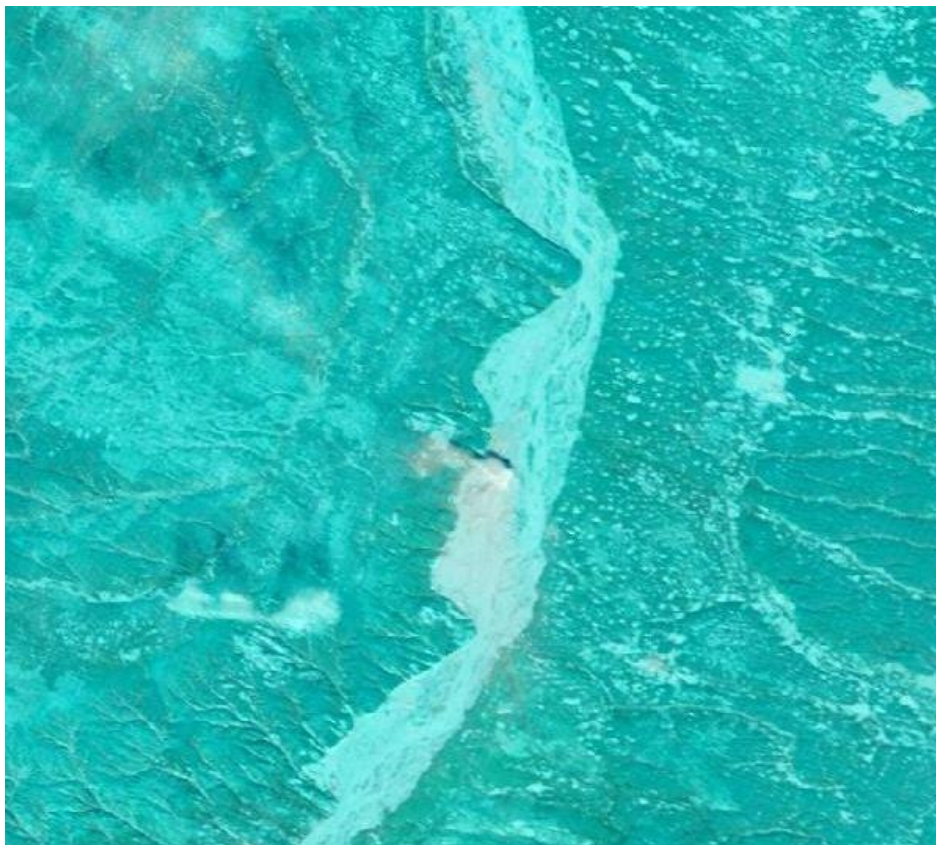


Рисунок 9. Спутниковый снимок Якутии 09.02.2013.

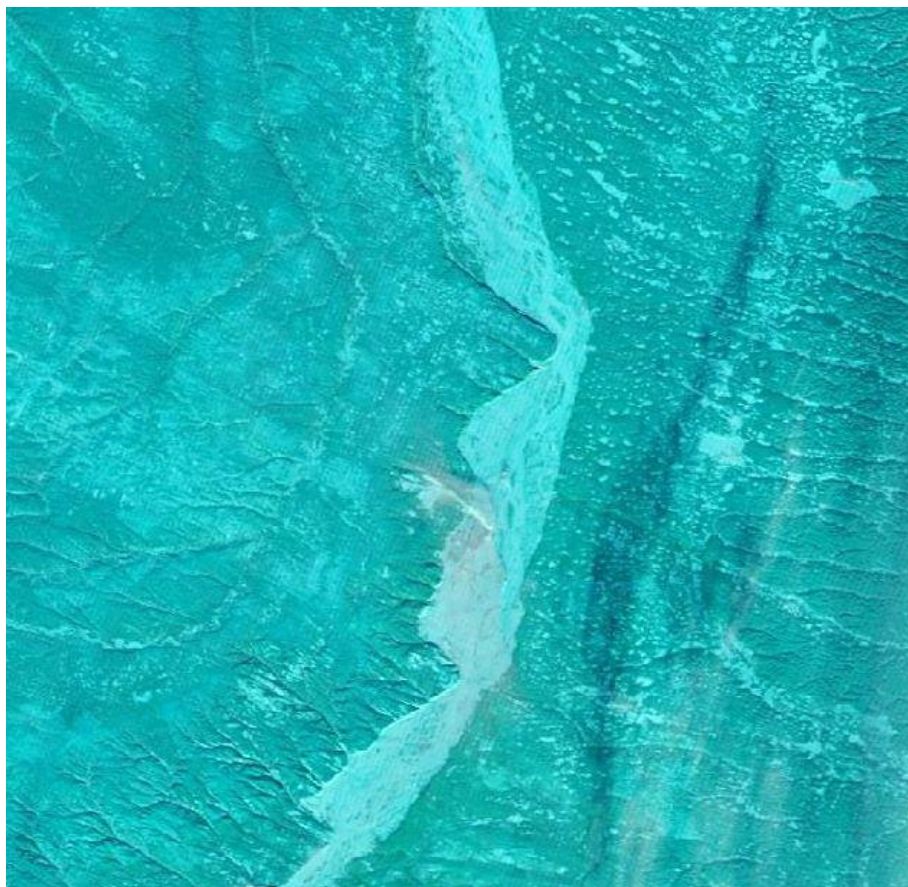


Рисунок 10. Спутниковый снимок Якутии 19.01.2013.

На данных снимках в канале (Terra/MODIS каналы 7-2-1), взятых с интернет-ресурса <https://sakhagis.ru> хорошо видны туманы, которым характерны серый цвет, отсутствие выраженной текстуры и повторение рельефа.

Вывод: при наблюдении за туманами можно положиться на спутниковые снимки и надёжность их достаточно велика. Во все дни по архиву, со спутника были видны туманы.

Для оценки плотности туманов на территории Якутска были выделены границы города (рис.11-13).

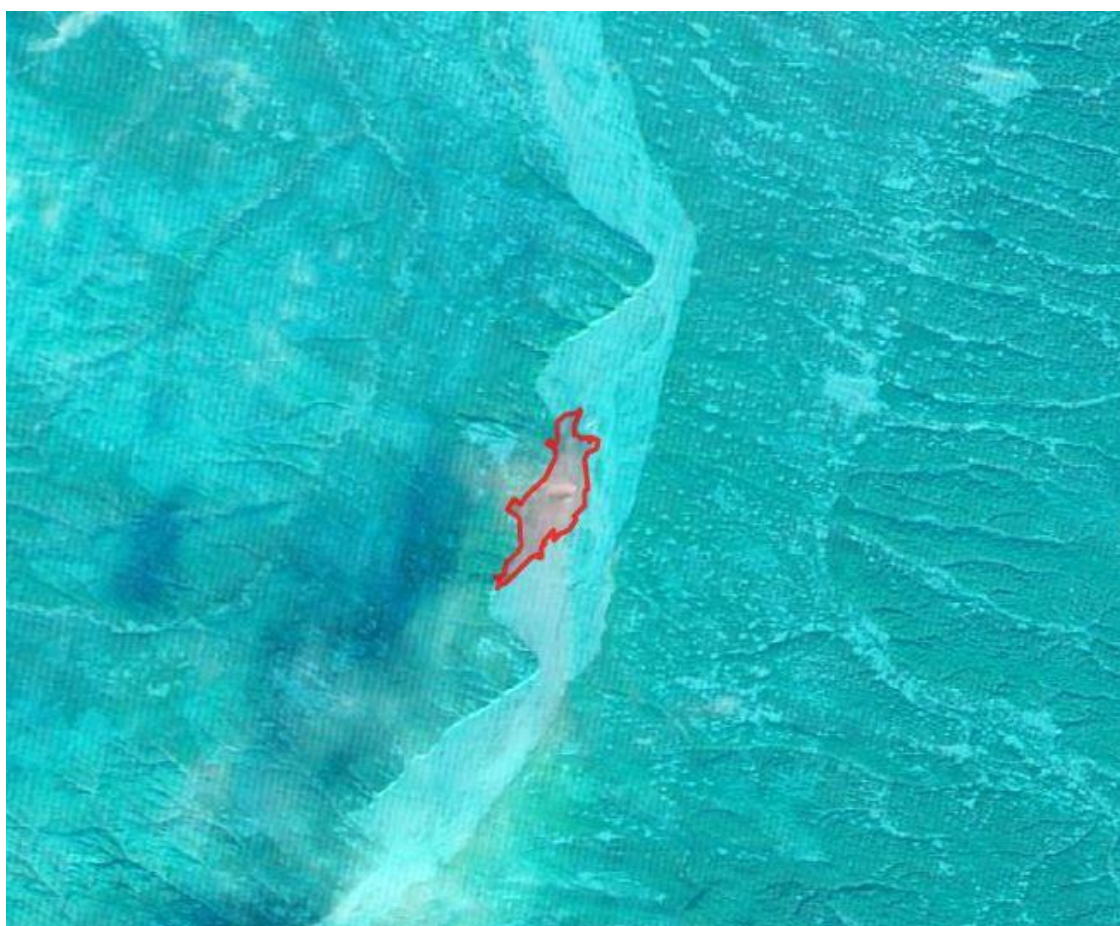


Рисунок 11. Спутниковый снимок Якутии с границей 08.01.2015.



Рисунок 12. Спутниковый снимок Якутии с границей 09.02.2013.

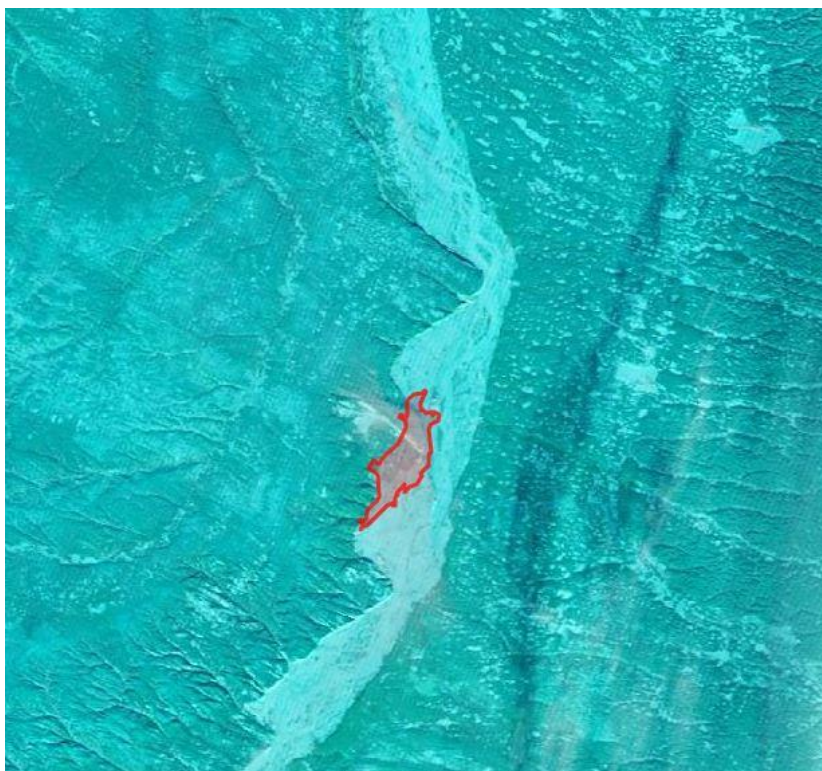


Рисунок 13. Спутниковый снимок Якутии с границей 19.01.2013.

На всех трёх снимках можно увидеть, что туман заполняет не менее 70% территории города, что говорит о достаточно высокой плотности туманов в границах Якутска.

Заключение

Проведенное исследование спутникового мониторинга ледяных туманов в Якутске позволило выявить ключевые закономерности их формирования, распространения и влияния на окружающую среду. Результаты работы подтвердили высокую эффективность использования современных спутниковых технологий для изучения этого уникального атмосферного явления, особенно в условиях экстремального климата Якутии.

Анализ данных показал, что ледяные туманы в регионе формируются при температуре ниже -30°C и высокой относительной влажности, достигая максимальной интенсивности в зимние месяцы. Их устойчивость и плотность обусловлены сочетанием природных факторов, таких как температурные инверсии и слабый ветер, а также антропогенного воздействия, включая промышленные выбросы и городскую застройку.

Спутниковый мониторинг продемонстрировал свою надежность и точность в детектировании туманов, что подтверждается сравнением с наземными наблюдениями. Использование мультиспектральных снимков позволило не только фиксировать пространственное распределение туманов, но и анализировать их микрофизические свойства. Это открывает новые возможности для прогнозирования и минимизации негативных последствий, таких как ухудшение видимости, обледенение инфраструктуры и воздействие на здоровье населения.

Практическая значимость исследования заключается в разработке рекомендаций по оптимизации транспортной системы, энергетического комплекса и градостроительных решений с учетом особенностей туманообразования. Дальнейшее развитие спутникового мониторинга, включая внедрение искусственного интеллекта и гиперспектральных технологий, позволит повысить точность прогнозов и адаптировать инфраструктуру Якутска к экстремальным климатическим условиям.

В целом, работа подтвердила актуальность и перспективность спутниковых методов для изучения ледяных туманов, что способствует улучшению качества жизни в регионе и обеспечивает научную основу для будущих исследований в области атмосферных явлений Арктики.

Список литературы

- 1.Алисов Б.П., Полтораус Б.В. Климатология. — М.: Изд-во МГУ, 2012. — 320 с.
- 2.Гольцберг И.А. Климат и микроклимат городов. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 248 с.
- 3.Зверев А.С. Синоптическая метеорология. — СПб.: Гидрометеиздат, 2009. — 480 с.
- 4.Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. — М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2001. — 352 с.
- 5.Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. — М.: Изд-во МГУ, 2006. — 582 с.
- 6.Васильев А.А., Федоров А.Н. Особенности климата Якутии в условиях глобального потепления // Метеорология и гидрология. — 2018. — № 5. — С. 45-56.
- 7.Гаврилова М.К. Микроклимат и температурные инверсии в Якутске // Известия РАН. Серия географическая. — 2015. — № 3. — С. 78-89.
- 8.Дегтярев А.И. Антропогенные туманы в условиях Крайнего Севера // Экология и промышленность России. — 2020. — № 4. — С. 12-17.
- 9.Иванова А.Р., Петров Е.С. Спутниковый мониторинг атмосферных явлений в Арктике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16. — № 3. — С. 112-125.
- 10.Коротков В.Н. Ледяные туманы Якутии: физика и прогнозирование // Лёд и снег. — 2017. — № 2. — С. 34-42.
- 11.Николаева М.П. Микроклиматические особенности Якутска и их влияние на здоровье населения: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М., 2018. — 24 с.
- 12.Данные Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). — URL: <http://www.meteorf.ru>

13.Национальный доклад "Состояние и охрана окружающей среды в Республике Саха (Якутия)". — Якутск, 2021. — URL: <https://minpriroda.sakha.gov.ru>

14.Спутниковые данные Terra/MODIS. — URL: <https://sakhagis.ru>