



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Анализ гравитационных волн в мезосфере по данным спутниковой
съёмки»

Исполнитель Войтенко Ульяна Владиславовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы
(ученая степень, ученое звание)
Федосеева Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

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

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«7» июня 2026 года

Санкт-Петербург
2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Основы распространения волновых процессов	6
1.1 Строение и динамика средней атмосферы. Мезосфера.	6
1.2 Классификация волн в атмосфере.....	8
1.3 Особенности формирования гравитационных волн, условия генерации и распространения.....	9
1.4 Связь гравитационных волн и опасных явлений в атмосфере	12
2. Спутниковая съемка мезосферы: данные и методы обработки	14
2.1 Мониторинг и наблюдение гравитационных волн	14
2.2 Современные спутниковые аппараты для наблюдения мезосферы....	15
2.3 Отличия и преимущества применяемых в работе спутников	17
3. Анализ гравитационных волн в мезосфере по спутниковым данным в канале DVB.....	20
3.1 Южная Дакота 02 сентября 2019 г.....	21
3.2 Техас 28 октября 2022 г.....	28
3.3 Северо-Западная часть США 14 октября 2020 г.....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	49
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	51

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера является одним из самых динамичных компонентов окружающей среды. Состояние атмосферы Земли определяется совокупностью физических характеристик и процессов, химическим составом и превращением веществ, синоптическими и климатическими подателями, а также процессами взаимодействия приобретают в верхних слоях, в частности в мезосфере, где ключевым механизмом переноса энергии выступают гравитационные волны.

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) – это тип волновых движений, который формируется в устойчивой стратификации атмосферы и под действием силы тяжести. Гравитационные волны в мезосфере – это внутренние гравитационные волны, которые распространяются с слое атмосферы на высотах 50-90 км и оказывают для данного слоя большое влияние на динамику верхней атмосферы и имеют специфические условия формирования и распространения.

Актуальность. Гравитационные волны в атмосфере играют важную роль в переносе энергии и импульса с нижних слоев атмосферы в верхние, оказывая большое влияние на формирование термодинамического равновесия в атмосфере, а также влияют на изменение климата и погоды на Земле. Особенно важное значение они имеют для мезосферы – слоя атмосферы на высотах от 50 до 90 км., где термические и динамические процессы в основном определяются волновой активностью. ВГВ являются чертой устойчивой стратификации в атмосфере и обеспечивают эффективный перенос энергии на вышележащие слои атмосферы, а также требуют учёта в географических моделях для повышения точности прогнозов.

Цель работы - анализ гравитационных волн в мезосфере на основе данных спутниковой съемки в канале Day/Night Band, выявление и интерпретация ВГВ в выбранном регионе, определяя характер их изменчивости по времени, а так же сопоставления их с метеорологическими параметрами для установления связи

между процессами в атмосфере, орографией и другими характеристиками и генерацией гравитационных волн, распространяющихся в мезосфере.

Задачи:

1. Изучить и проанализировать теоретическую часть строения и динамики средней и верхней атмосферы, а также изучить классификацию и особенности формирования и распространения атмосферных волн, в особенности ВГВ.
2. Рассмотреть современные спутниковые аппараты и методы мониторинга гравитационных волн, а также обосновать преимущества канала DNB для распознавания и обнаружения данного вида возмущений.
3. Сформировать архив спутниковых снимков с различными на них ВГВ с использованием интернет-ресурса VIIRS Today со спутника NOAA-20 в канале DNB, обосновав взятые случаи и выполнить визуальный анализ волновых структур на снимках.
4. Проанализировать условия формирования волновых возмущений с использованием метеопараметров.
5. Сделать выводы на основе полученных данных.

Объект исследования – гравитационные волны в мезосфере, проявляющиеся в виде волновых структур и концентрических кругов на спутниковых снимках в канале DNB.

Предмет исследования – пространственные и временные характеристик ВГВ в мезосфере над территорией Северной Америки и их связь с динамическими и синоптическими процессами в атмосфере.

Материал исследования. Исходными данными послужили спутниковые снимки в канале Day/Night Band, которые были получены с интернет-ресурса VIIRS Today со спутника NOAA-20 для выявления ВГВ. Для анализа метеоусловий, включающих в себя снимки с адвекцией циклонической завихренности, поля ветра, омеги, индекса Шовальтера и других характеристик,

были использованы снимки с сайта Eumetrain и применялись доступные данные на рассмотренных случаях.

Методическая база включает в себя основы физики атмосферы и теории возникновения ВГВ, а также методы визуального представления спутниковых снимков и фиксации волн, сравнительного анализа характеристик волновой активности и оценки динамических условий формирования данных возмущений.

Практическая значимость заключается в том, что результаты исследования могут быть использованы в качестве вспомогательного средства прогнозирования ВГВ по данным спутниковой съемки.

Содержание исследования состоит из содержания, списка сокращений, введения, трех глав, заключения и списка литературы. Практическая часть включает в себя выборку спутниковых снимков в канале DNB для трёх анализируемых событий с выявленными волновыми структурами и картами величин исследуемых метеопараметров с сайта Eumetrain.

1. ОСНОВЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1 Строение и динамика средней атмосферы. Мезосфера.

Атмосфера — это воздушная оболочка Земли, которая находится в постоянном движении и неоднородна по своим физическим свойствам. Изменяются с высотой такие характеристики погоды как: температура, давление, влажность воздуха, плотность, скорость ветра. Для качественного анализа и прогнозирования необходимы данные о состоянии атмосферы на различных высотах.

Атмосферу по вертикальному распределению температуры подразделяют на несколько слоёв (см. рисунок 1.1.1), в промежутках между которыми располагаются переходные слои атмосферы (тропопауза, стратопауза и мезопауза, термопауза). Нижним слоем является тропосфера, располагающаяся в слое от поверхности Земли до 8 км в полярных широтах и до 18 км в тропических широтах. В этом слое сосредоточено около 80 % всей массы атмосферных газов, в число которых входят: азот, кислород и аргон, в котором формируются циклоны, антициклоны, фронты, которые определяют погоду. Затем простирается переходный слой – тропопауза. Выше него располагается стратосфера, достигающая высоты в 55 км. В её газовый состав входят преимущественно азот, кислород и аргон, при этом характерной особенностью и отличием является наличие озонового слоя, который в свою очередь поглощает опасное ультрафиолетовое излучение, а также влияет на рост температуры с высотой. Переходным слоем является стратопауза.

Затем следует мезосфера, до высоты 80-85 км. Несмотря на сходство химического состава с нижележащими слоями, мезосфера характеризуется экстремально низкими температурами, достигающими -90°C и сильно разрежённым воздухом. Данный слой атмосферы отличается очень сильными зональными ветрами и их вертикальными сдвигами, зимой в средних и высоких широтах преобладают западные ветра со скоростью от 30 до 80 м/с, летом -

восточные со значениями от 20 до 60 м/с, а на экваторе преобладают восточные ветра. Также для этого слоя характерны вертикальные сдвиги ветра, которые достигают 10-20 м/с на 1 км. В свою очередь, изменения вертикальной скорости ветра с увеличением высоты и во времени часто имеют волнообразный характер и происходят с периодичностью, характерной для внутренних гравитационных волн. Выше данного слоя переходной зоной является мезопауза.

На высоте от 85 км до 600 км располагается термосфера, отличающаяся очень высокими температурными значениями, контрастируя значениями с предыдущими слоями. В пределах термосферы выделяют ионосферу, на процессы в которой влияют ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца, которые при взаимодействии с газами и формируют полярные сияния. После него идет переходная граница – термопауза. Самым верхним слоем выделяют экзосферу, которая начинается с 600 км и заканчивается космическим пространством и является границей между атмосферой Земли и космосом. Она состоит из разреженных лёгких газов, температура превышает отметку в 2000 °С.

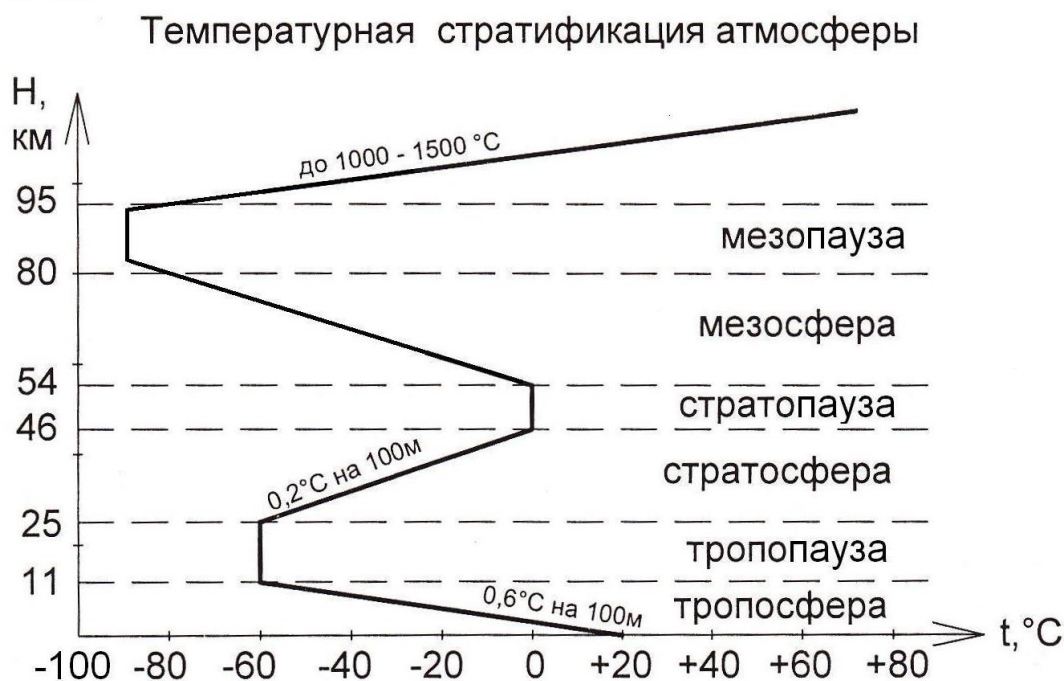


Рисунок 1.1.1. Строение атмосферы по слоям

1.2 Классификация волн в атмосфере.

Волна – это возмущение, распространяющееся в пространстве и переносящее энергию без переноса веществ. По механизму распространения подразделяются на механические, электромагнитные, гравитационные, по пространственной размерности выделяют на: одномерные, двумерные и трехмерные, а по направлению колебаний на: продольные и поперечные.

Волны в атмосфере – это колебательные возмущения физических параметров относительно состояния равновесия. Восстанавливающие силы – это физические силы, которые стремятся вернуть смещенную частицу воздуха обратно в состояние равновесия. Волновые движения в атмосфере, основанные на преобладающих восстанавливающих силах и масштабах процессов подразделяют на несколько типов (см. табл. 1.1.):

Табл.1.1. Характеристики волн в атмосфере

Тип волны	Восстанавливающая сила	Характерный масштаб	Дисперсия	Пример
Акустические	Сила давления	От см до км	Нет	Звук, гром
Внутренние гравитационные	Сила плавучести	1 км - 10 км	Сильная	Горные волны, волнистые облака
Инерционные	Сила Кориолиса (β -эффект)	1000 - 10000 км	Сильная	Циклоны, антициклоны
Гравитационные	Сила тяжести (на границе)	0.1 - 1 км	Есть	Волны Кельвина-Гельмгольца

- Акустические волны - колебательное движение гидродинамических частиц с малыми амплитудами в сжимаемой жидкости. В каждом месте жидкости в акустической волне происходят попеременные сжатия и разрежения. Акустическая волна переносит импульс энергии.

Акустическая волна является продольной, так как вектор колебательной скорости параллелен направлению распространения волны [4];

- Внутренние гравитационные - волны, которые возникают в устойчиво стратифицированной атмосфере при смещении объема воздуха по вертикали. В атмосфере, где плотность и воздух изменяются с высотой, происходит смещение некоторого объема воздуха вверх и в качестве возвращающей силы является сила Архимеда (сила плавучести);

- Инерционные волны - сложный тип волновых движений, которые возникают при совместном действии Архимедовой силы и силы Кориолиса в стратифицированной среде. Для образования данного типа волн необходимо одновременно наличие вертикальной стратификации и учета вращения планеты;

- Гравитационные волны - волновые движения, энергия которых сосредоточена у границ раздела сред и затухает по мере удаления от них. Основной тип - волны Лэмба, которые возникают из-за сил упругости и тяжести, они могут переносить энергию на тысячи километров, служить индикаторами взрывов, а также влиять на верхнюю атмосферу и на формирование цунами.

1.3 Особенности формирования гравитационных волн, условия генерации и распространения

Атмосферные гравитационные волны - это колебательные возмущения, возникающие под действием возвращающей архимедовой силы в устойчивой стратификации атмосферы. Они распространяются в атмосферной среде благодаря силе тяжести и силе плавучести. Их характеризует частота, с которой может колебаться вертикально смещенная воздушная частица в атмосфере с устойчивой стратификацией, которая называется - частота Брента-Вяйсяля. Устойчивая стратификация – это состояние атмосферы, когда плотность воздуха

с высотой убывает быстрее, чем плотность частицы, которая адиабатически поднимается.

Частота Брента-Вяйсяля (N) - это параметр, который характеризует вертикальную стратификацию атмосферы (см. формулу 1):

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}} \quad (1)$$

Где N - круговая частота Брента-Вяйсяля;

g - ускорение свободного падения;

ρ - плотность воздуха;

z - глубина;

Если $N^2 > 0$, то атмосфера устойчива, соответственно плотность убывает с высотой и смещённая частица будет возвращаться обратно, совершая колебания с частотой, что является необходимым для формирования и существования гравитационных волн;

Если $N^2 = 0$, то атмосфера нейтральна устойчивая, отсутствует возвращающая сила и частица, которая сместилась вертикально, остаётся на новом месте, при этом конвекция не развивается, и волны не поддерживаются;

Если $N^2 < 0$, то атмосфера неустойчивая, соответственно плотность растёт с высотой, возникает конвекция и гравитационные волны не способны распространяться, их энергия быстро переходит в турбулентность.

Частота Брента-Вяйсяля (частота плавучести) является характеристикой стратификации атмосферы. Если среда имеет устойчивую стратификацию, где плотность убывает с высотой, то на частицу начнёт действовать возвращающая сила Архимеда. Данная сила возникает в устойчиво стратифицированной среде, в которой возникает разность между плотностями частицы и окружающей её средой, что заставляет частицу возвратиться к положению равновесия и из-за

инерции она пропускает это положение и создается колебание, которое передаётся соседним частицам, что формирует из этого волну. Если среда неустойчива, где плотность будет расти с высотой, то смещённая вверх частица окажется легче окружающей её среды и будет развиваться конвекция.

Дисперсионное соотношение связывает частоту волны ω (как быстро будет колебаться точка) с волновым числом k (скорость смены фазы в пространстве). Для внутренних гравитационных волн в атмосфере оно характеризуется формулой (с приближением Буссинеска) (см. формулу 2):

$$\omega^2 = N^2 \frac{k^2}{k^2 + m^2} \quad (2)$$

Где

Ω - частота волны;

N - частота Брента-Вяйсяля;

k - горизонтальное волновое число;

m - вертикальное волновое число;

Приближения – это набор упрощений в гидродинамике для идеально стратифицированной жидкости в поле силы тяжести.

Приближение Буссинеска:

-отфильтровываются акустические волны и фокусируется на гравитационных волнах;

-масштаб движений много меньше масштаба изменения фоновой плотности (высоты неоднородности атмосферы).

Ключевые характеристики гравитационных волн:

- Горизонтальная длина волны (λ_h) - расстояние между двумя соседними гребнями в горизонтальной плоскости. Её значения достигают от десятков метров до нескольких тысяч километров;

- Вертикальная длина волны (λ_2) - расстояние между соседними гребнями по вертикали, значения которой составляет от нескольких до десятков километров;
- Период (Т) - временной интервал между последовательными прохождениями волны через фиксированную точку пространства, продолжительность которых от нескольких минут до нескольких часов;
- Амплитуда - величина отклонения параметров атмосферы его фонового значения;
- Фазовая скорость (с) - скорость перемещения волнового фронта;
- Поток импульса - скорость переноса импульса волной, которая является основной характеристикой для оценки влияния волн на общую циркуляцию атмосферы.

Характеристики гравитационных волн необходимы для определения свойств атмосферы, таких как частота Брента-Вяйсяля, профили ветра, устойчивость стратификации и для идентификации источников волн и оценки передаваемой ими энергии и импульса. Зная эти параметры, можно моделировать распространение движения волн в атмосфере, прогнозировать их и оценивать влияние на глобальную циркуляцию и турбулентное перемешивание в атмосфере.

1.4 Связь гравитационных волн и опасных явлений в атмосфере

Атмосферные гравитационные волны являются значимым движущим механизмом в динамике атмосферы, они способны усиливать и предвещать множество опасных явлений. Они играют большую роль в формировании и развитии штормов, турбулентности и других природных катастроф. Потоки энергии, переносимые гравитационными волнами из нижних слоёв в верхние, сравнимы с теми, которые поступают от солнечного

излучения. Это оказывает существенное влияние на баланс динамики и энергии в атмосфере, а следовательно, и на погодные условия.

Они способны выступать источником мощной конвекции: волновые подъемы воздуха могут высвободить накопленную неустойчивость, начиная развитие сильных гроз, ливней и смерчей, а также формируют атмосферные фронты, обостряя их и усиливая контрасты температуры и ветра, что ведет к более интенсивной штормовой активности, а от мощных ураганов и циркуляций расходятся волны в виде концентрических окружностей.

О результатах воздействия гравитационных волн можно судить по изменениям, происходящим в слоях атмосферы (изменение давления и плотности воздуха), и наоборот, сами волны появляются вследствие разного рода воздействий (возникают в следствии наличия солнечного терминатора и из-за воздействия Луны на атмосферу Земли). Источниками ВГВ являются атмосферные фронты, мезомасштабные процессы, орография, штормы, а также тектонические процессы. ВГВ распространяются в устойчиво стратифицированном слое воздуха на большие расстояния от источников (сотни и тысячи километров) с малым затуханием, перенося при этом значительную энергию. [5]

Подавляющее большинство внутренних гравитационных волн, наблюдаемых в мезосфере, формируется в тропосфере и нижней стратосфере. Основными генераторами являются особенности рельефа местности, мощная конвекция, характеризуемая грозowymi ячейками, атмосферные фронты и сдвиговые неустойчивости, например неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Все эти процессы создают возмущения плотности и скорости с характерными периодами от нескольких минут до нескольких часов. Кроме того, гравитационные волны генерируются при землетрясениях и извержениях вулканов, они могут влиять на распространение цунами, а также возникают под действием быстрых потоков солнечного ветра. Лесные пожары и извержения вулканов также способны порождать мощные волновые возмущения, фиксируемые спутниками.

2. СПУТНИКОВАЯ СЪЕМКА МЕЗОСФЕРЫ: ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

2.1 Мониторинг и наблюдение гравитационных волн

Зафиксировать внутренние гравитационные волны (ВГВ) довольно сложно, поскольку внешне они практически незаметны. Как правило, для изучения их параметров применяют акустическое, лидарное и радиолокационное зондирование. Хотя эти способы дают возможность лишь локально, зато регулярно отслеживать ВГВ над сушей, обеспечивая высокое временное разрешение.

В приземных слоях атмосферы воздушные колебания не видны глазу, однако на высоте они иногда становятся различимыми. Под действием ВГВ воздух колеблется, из-за чего водяной пар сначала охлаждается, а затем нагревается и в результате на волновых гребнях могут сформироваться облака, которые имеют характерную форму и характер распространения, их можно разглядеть со спутника, используя различные каналы.

Зафиксировать внутренние гравитационные волны в средней атмосфере можно с помощью радиозондирования. Главным преимуществом такого подхода является охват больших пространств и длительных промежутков времени, а также возможность получать глобальные вертикальные распределения давления, плотности и температуры по высоте с высоким качеством изображения, при этом вне зависимости от погоды. Однако, у этого метода есть серьёзный недостаток - он опирается лишь на одну систему наблюдений, поэтому даёт информацию всего об одной независимой переменной, что приводит к искажениям при описании волновых процессов. Для решения данной проблемы, применяют радиозонды, которые позволяют измерять скорость ветра и температуру.

Для изучения влияния ВГВ на термодинамический режим атмосферы, используют также оптический метод. В тонком излучающем слое на высотах

мезопаузы регистрируют изменения свечения ночного неба, температуры и яркости излучения. Это даёт возможность наблюдать волновые структуры в ночных свечениях атомарного кислорода, молекулярного кислорода, гидроксила и натрия на высотах 80-100 км.

Airglow - это собственное, слабое свечение верхних слоев атмосферы (на высотах от 85 до 300 км.), которое возникает в результате химических реакций и является полезным индикатором для изучения гравитационных волн в мезосфере, поскольку оно доминирует в сигнале видимого света в ночное время в безлунные ночи. Гравитационные волны, распространяющиеся через мезосферу, можно наблюдать по их модуляции интенсивности свечения атмосферы, что связано с локальными возмущениями температуры и плотности, вызванными прохождением волны. Проходя через атмосферу, гравитационные волны вызывают сжатие и разряжение воздуха, что формирует интенсивность этого свечения.

Все перечисленные методы позволяют анализировать характеристики ВГВ, но каждый из них имеет свои особенности, поэтому для более точных прогнозов их необходимо применять совместно. Кроме того, для прогнозирования формирования и распространения ВГВ в разных условиях необходимо использование численного моделирования.

2.2 Современные спутниковые аппараты для наблюдения мезосферы

Исследование гравитационных волн в мезосфере по спутниковым данным является сложным многоэтапным процессом. Основными источниками информации служат спутниковые приборы, одним из которых является спектрорадиометр на спутниках серии JPSS (Joint Polar Satellite System, такой как прибор VIIRS на борту Suomi NPP, имеющий уникальный канал день-ночь, способный регистрировать крайне слабое свечение атмосферы и серебристые облака на высотах около 80-90 км. Данные этих приборов доступны через архив LAADS DAAC сайта NASA. Канал DNB, обладая сверхвысокой

чувствительностью, способен регистрировать слабейшее собственное свечение атмосферы (airglow). Для спектральной полосы пропускания канала Day/Night Band вид возбужденного гидроксила OH (на высоте около 87 км) является наиболее сильным источником.

Ещё одним источником данных является спутник серии JPSS является NOAA-20, который является одним из ключевых аппаратов современной системы полярно-орбитального наблюдения Земли. Они практически идентичны по конструкции и научным приборам и имеют одинаковый набор инструментов для выполнения задач. По сути, NOAA-20 является прототипом, у них различия минимальны и связаны с улучшением надёжности некоторых узлов и программного обеспечения на нем.

Другой более специализированный источник, который создан исключительно для изучения гравитационных волн в мезосфере - шведский спутник MATS, запущенный в 2022 году. Его телескоп делает детальные снимки лимба Земли, одновременно фиксируя кислородное свечение и отражение ультрафиолета от серебристых облаков. Основной задачей спутника MATS является регистрация двух типов структур в верхней атмосфере, одно из которых это свечение, которое испускают молекулы кислорода на высоте примерно 100 километров, а второе это серебристые облака, формирующиеся в районе мезопаузы.

Для этих наблюдений на спутнике установлен лимбовый сканер - телескоп, работающий в шести спектральных каналах. Он непрерывно фотографирует атмосферный лимб с высоким разрешением. В результате совместного применения этих методов можно визуально наблюдать гравитационные волны на спутниковых снимках мезосферы, а также строить их детальные трёхмерные карты и оценивать температуру воздуха на высотах от 70 до 110 км. MATS - является новый экспериментальным спутником, который начал свою миссию относительно недавно, поэтому его данные могут быть недостаточно достоверными, к тому же объем архивных снимков мал.

2.3 Отличия и преимущества применяемых в работе спутников

Для анализа внутренних гравитационных волн спутники NOAA-20 и Suomi NPP представляют собой две части единой системы. Оба аппарата оснащены идентичными приборами VIIRS, включая канал DNB, и работают в одной орбитальной плоскости с интервалом около 50 минут. Их объединённые данные являются основой большинства современных исследований в этой области.

Спутник Suomi NPP является первым американским оперативным аппаратом нового поколения в составе Совместной полярной спутниковой системы. Он был создан по партнёрству NASA и NOAA, запущен 28 октября 2011 года на солнечно-синхронную орбиту с восходящим узлом в 13:30. С высоты 824 км спутник совершает оборот за 102 минуты, делая около 14 витков в сутки, что обеспечивает глобальный охват. На его борту установлены пять приборов: спектрорадиометр VIIRS, крест-трековый инфракрасный зондировщик CrIS, микроволновый зондировщик ATMS, озоновая аппаратура OMPS и система измерения радиационного баланса CERES. Прибор VIIRS объединяет возможности трёх предшествующих систем и обеспечивает 22 узкополосных канала в диапазоне 0,4-12 мкм.

Важнейшим является канал «День-Ночь» (Day/Night Band), который помимо обычной дневной съёмки позволяет регистрировать сверхслабый видимый и ближний инфракрасный свет ночью. Половина его чувствительности приходится на диапазон 500-900 нм., в связи с этим DNB является датчиком «видимого света при низкой освещённости».

Дневные измерения отражённого солнечного света представляют собой основу оптической спутниковой съёмки. Ночью обычные радиометры собирают только тепловое инфракрасное излучение, которое не позволяет различать объекты со похожими температурными свойствами, а также не даёт чувствительности к физическим параметрам, что ограничивает изучение суточных процессов, необходимых для моделирования погоды, поэтому было бы

хорошо иметь одинаково качественную информацию днём и ночью, что обеспечивает канал DNB функционирует как в дневное, так и в ночное время.

Спутник NOAA-20 является современным полярно-орбитальным спутником нового поколения и был создан в ходе реализации общей американской программы, как и спутник Suomi NPP под названием. Данный спутник работает на солнечно-синхронной орбите высотой 833 км., и имеет наклонение около 98 градусов. Спутник пересекает экватор около 13:30 по UTC на восходящем узле, совершает полный оборот за 101 минуту и имеет цикл повторения в 16 дней.

Соответственно, NOAA-20 является важным элементом глобальной системы наблюдения Земли, он создает основу для современного прогнозирования погоды, мониторинга стихийных бедствий и изучения климата. Данный спутник измеряет большой диапазон параметров, в которые входят: аэрозоли, профили температуры и влажности, ветер, движение облаков, тип и высоту облаков, осадки, концентрацию озона, вулканический пепел, температуру поверхности моря, цвет океана, площадь и состояние морского льда, температуру суши, активные пожары, снежный покров, альбедо и потоки энергии.

NOAA-20 оснащён 5-ю основными инструментами, в число которых входят:

- Многоканальный радиометр VIIRS, который позволяет получить детализированные снимки в ВД и ИК диапазонах с разрешением от 375 до 750 метров;
- Интерферометр CrIS измеряет инфракрасное излучение, испускаемое атмосферой и поверхностью Земли, а также служит средством для построения вертикальных профилей влажности и температуры атмосферы;
- Микроволновой зонд ATMS предназначен для измерения температуры и влажности в слоях атмосферы в любых погодных условиях;

-Спектрометр OMPS обеспечивает глобальное наблюдение за озоновым слоем Земли, а также фиксирует вулканические выбросы для информирования о пепловых шлейфах;

-Радиометр CERES, который измеряет энергетический баланс Земли.

Сравнение Suomi NPP и NOAA-20:

Оба аппарата выведены на солнечно-синхронные орбиты с близкими значениями высоты. Suomi NPP обращается на высоте около 824 км, а NOAA-20 на высоте 833 км. Оба спутника имеют одинаковое наклонение орбиты, период обращения и местное время пересечения экватора, а также NOAA-20 работает в связке со спутником Suomi NPP, отставая от него примерно на 50 минут, что обеспечивает синхронность съёмки и позволяет их полосам обзора частично накладываться друг на друга.

Оба спутника имеют идентичный набор приборов, включая спектрорадиометр VIIRS с каналом DNB, что и позволяет использовать их для совместного мониторинга атмосферных гравитационных волн.

Таким образом, несмотря на небольшие различия в высоте, массе и энергопотреблении, оба спутника образуют совместно синхронную группу спутников, что очень важно для исследования гравитационных волн по данным ночного свечения. В данном исследовании спутник NOAA-20 заменил Suomi NPP, так как на снимках NOAA-20 волновые структуры выглядят чётче и контрастнее, а сам аппарат является основным действующим спутником системы JPSS.

3. АНАЛИЗ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В МЕЗОСФЕРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ В КАНАЛЕ DNB

В ходе выполнения работы были рассмотрены два спутника - NOAA-20 и Suomi NPP, оснащённые прибором VIIRS с каналом Day/Night Band. Сравнительный анализ спутниковых снимков показал, что на NOAA-20 волновые структуры в мезосфере визуализируются более чётко и контрастно, чем на Suomi NPP, поэтому для дальнейшего анализа были выбраны данные именно с NOAA-20. Однако в процессе исследования возникли ограничения, связанные с доступностью исходных данных: часть информации, в частности данные с сайта NASA, оказалась недоступна на протяжении длительного времени и, соответственно, в связи с этим пришлось использовать исключительно сайт VIIRS Today, который предоставляет спутниковые снимки только по территории США, но не для всех анализируемых дат имелись полные комплекты необходимых метеорологических параметров, тем не менее, для выбранных трёх событий (Южная Дакота 02.09.2019, Техас 28.10.2022, Северо-Западная часть США 20.10.2020) удалось получить снимки хорошего качества, позволяющие идентифицировать и интерпретировать внутренние гравитационные волны.

Данные снимки были сделаны в безлунную ночь, при этом волны на нём отчетливо видны, так как источником света здесь является не Солнце, а собственное свечение атмосферы - airglow. Волны создают на однородном фоне ночного неба контрастную картину из светлых и темных колец, что регистрирует высокочувствительный DNB канал.

Кроме того, интерпретация данных DNB осложняется из-за наличия артефактов (это может быть засветка вблизи терминатора, полосы и шумы, которые появляются в процессе работы спутника), а также загрязнения от света городских огней и отражения от облаков. Данные снимки были отобраны в том

числе с этим учётом, поэтому в представленных случаях помехи были минимальны, что позволило хорошо идентифицировать волновые структуры.

В качестве источника данных с метеорологическими условиями для анализа ВГВ был использован сайт Eumetrain, предоставляющий доступ к полям ветра, индексу Шовальтера, значениям омеги, дивергенции. Однако, данных ресурс представляет не полный набор данных за выбранные случаи из-за ограниченного архива, поэтому не для всех анализируемых дат и регионов удалось подобрать снимки с необходимыми параметрами.

3.1 Южная Дакота 02 сентября 2019 г.

02 сентября 2019 года над штатом Южная Дакота (США) на спутнике NOAA-20 с помощью прибора VIIRS в канале DNB были зафиксированы внутренние гравитационные волны (рисунок 3.1.1). На снимке различимы тонкие волновые структуры, которые выглядят как концентрические круги и радиально расходящиеся полосы.

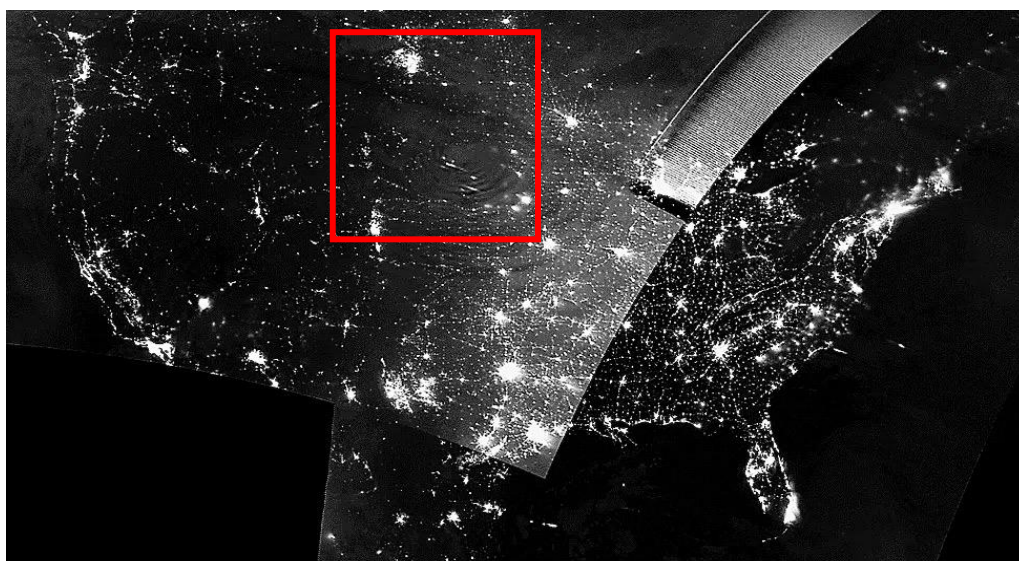


Рисунок 3.1.1. Снимок Северной Америки (США) со спутника NOAA-20 в канале DNB 02.09.2019

Анализ спутниковых снимков в видимом диапазоне (рисунок 3.1.2) позволяет идентифицировать кучево-дождевую облачность как большую ячейку, которая имеет плотную матовую текстуру, отличимую кругообразно структуру и чёткие края облачной системы.

Также, данный снимок позволяет детально проследить динамику развития и формирования конвективных процессов, где мощный восходящий поток внутри облака генерирует возмущения, которые распространяются в вышележащие слои атмосферы.

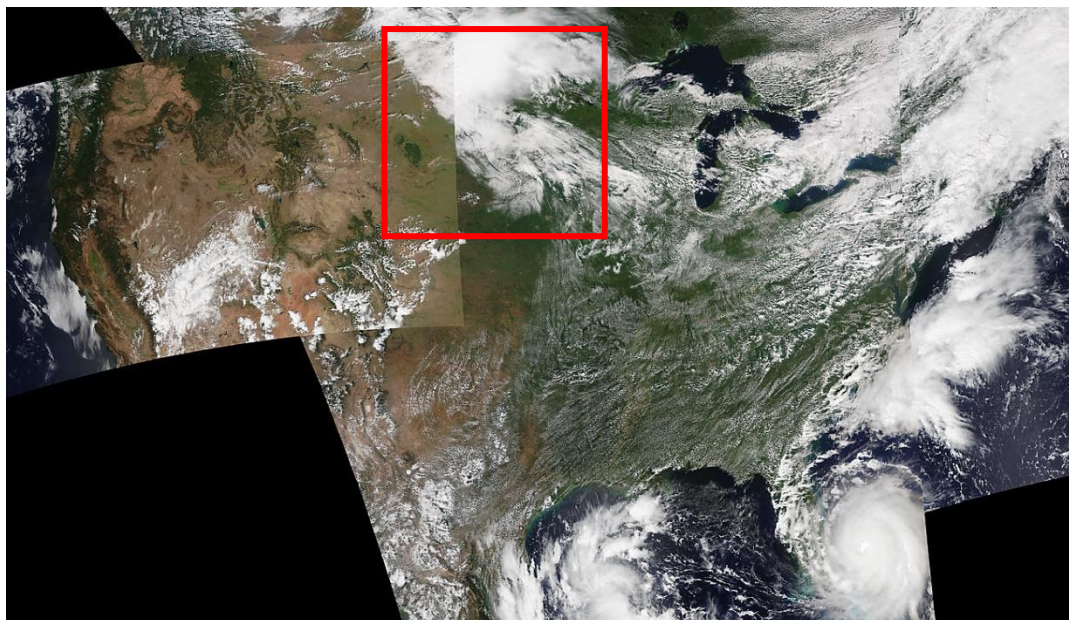
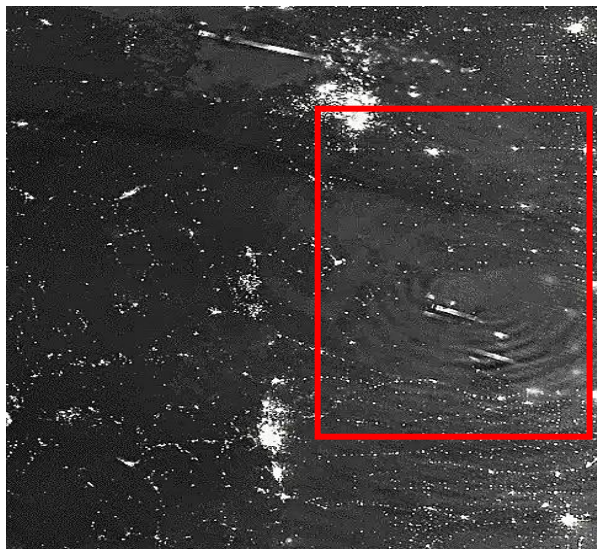
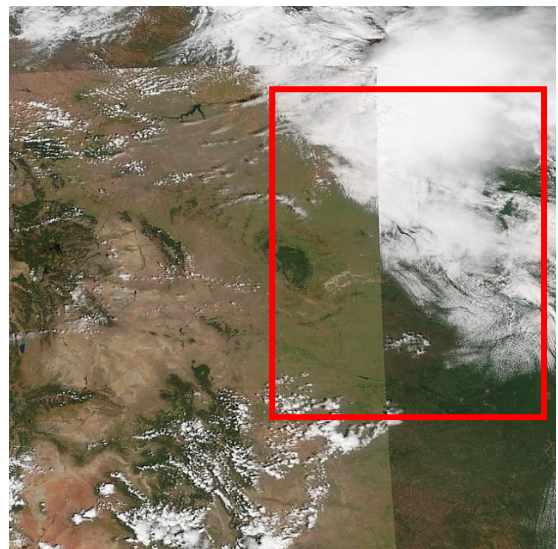


Рисунок 3.1.2. Снимок Северной Америки (США) со спутника NOAA-20 в канале ВД 02.09.2019

На рисунке 3.1.3 а и б представлен увеличенные фрагменты спутникового снимка с ВГВ в канале DNB и ВД.



а



б

Рисунок 3.1.3. (а)-снимок над Северной Дакотой (США) со спутника NOAA-20 в канале DNB 02.09.2019, (б)-снимок над Северной Дакотой (США) со спутника NOAA-20 в канале ВД 02.09.2019.

Наличие струйных течений на снимке с наложенными изотамих (рисунок 3.1.4) играет здесь важную роль, в силу того что они задают направление движений волн. В данном случае струйное течение распространяется с севера на юг, подобно ВГВ на снимке, что также подтверждает взаимодействие тропосферных и стратосферных процессов.

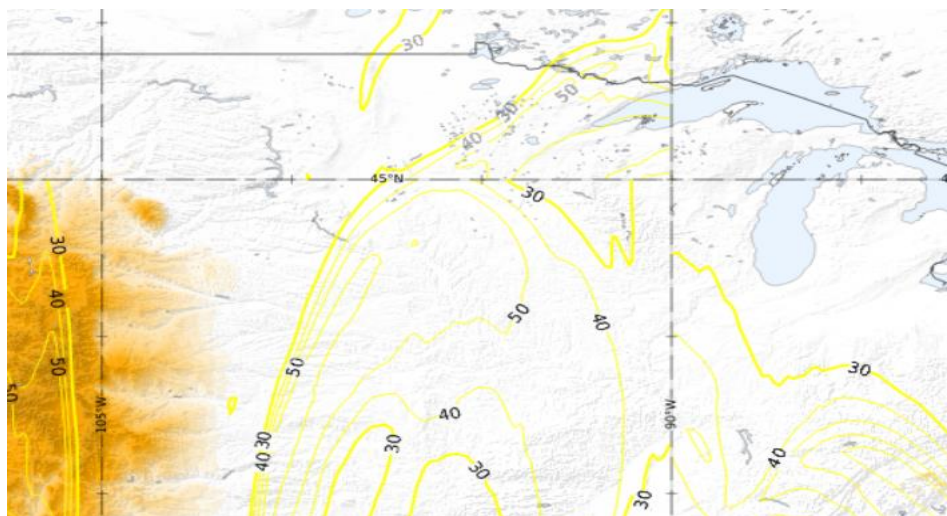


Рисунок 3.1.4. Изотамы на 300 гПа 02.09.2019 в 09 UTC

Анализируя данные за 2 сентября 2019 года за 09 UTC, на рисунке 3.1.5, где Height PV=1.5, можно увидеть, что высота тропопаузы в данном месте незначительно понижается, так как значение давления повышается и составляет 200-250 гПа над областью образования ВГВ.

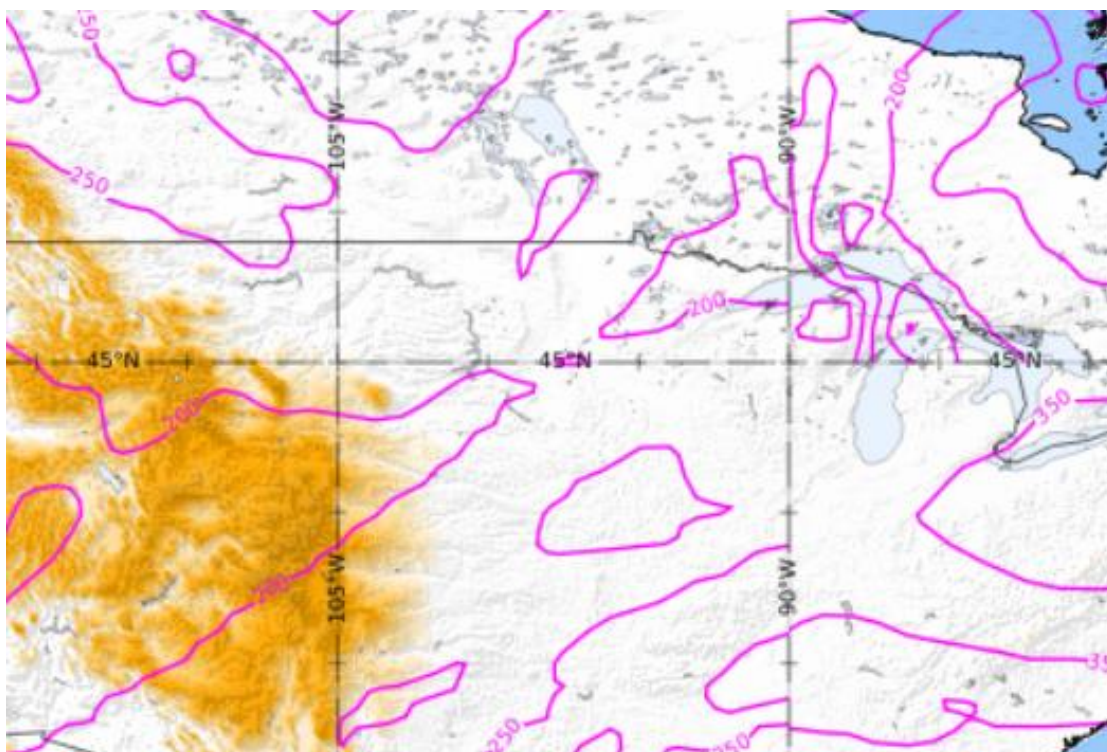


Рисунок 3.1.5. Высота тропопаузы (Height PV=1.5) 02.09.2019 в 09 UTC

Значения вертикальной скорости (параметр омега) на уровне 700 гПа на рисунке 3.1.6 составляют -1 Па/с, что свидетельствует о нисходящем потоке.

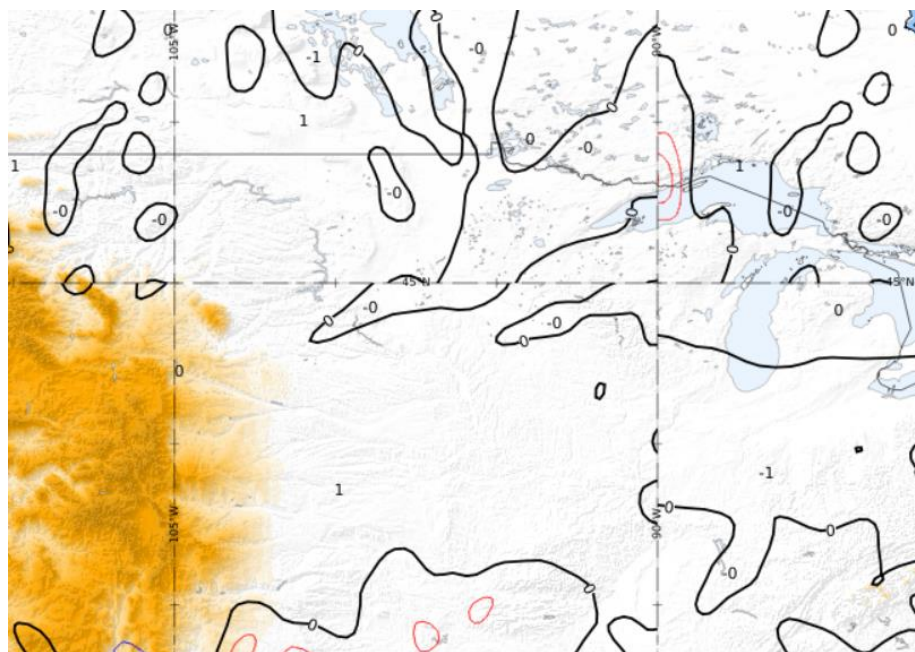


Рисунок 3.1.6. Омега на уровне 700 гПа 02.09.2019 в 09 UTC

На картах адвекции циклонической завихренности изображенном на рисунке 3.1.7 на уровне 700 гПа, красные изолинии обозначают зоны положительной циклонической адвекции завихренности, а замкнутые линии формируют зоны наиболее интенсивного подъема воздуха.

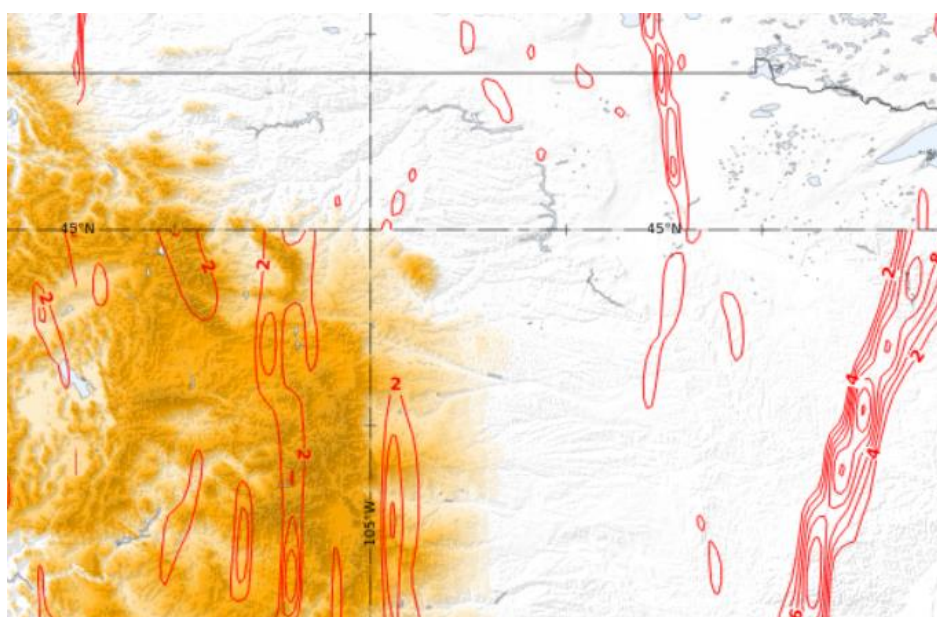


Рисунок 3.1.7. CVA на 700 гПа 02.09.2019 в 09 UTC

Положительные значения дивергенции (рисунок 3.1.8) и отрицательные значения омеги свидетельствуют о конвективном процессе в данном районе.

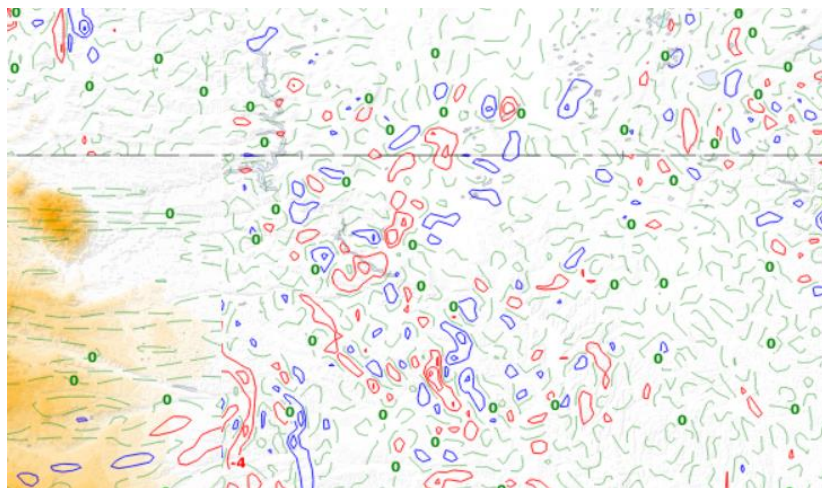


Рисунок 3.1.8. Дивергенция на 700 гПа 02.09.2019 в 09 UTC

При этом индекс Шовальтера (рисунок 3.1.9) показывает вероятность развития гроз и конвективной неустойчивости, где его значение над исследуемой областью равно 0, а пороговое значение равное трем служит предиктором начала формирования возможной грозовой активности, что подтверждает факт образования ее образования над данным районом.

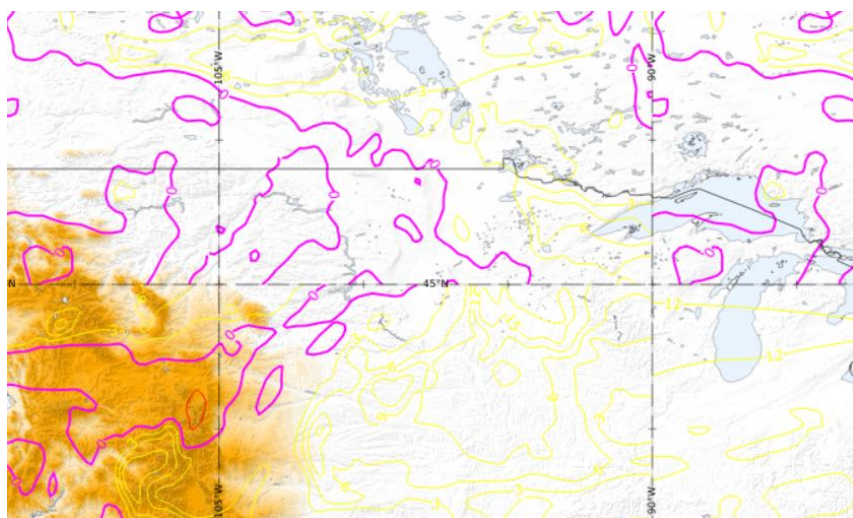


Рисунок 3.1.9. Индекс Шовальтера 02.09.2019 в 09 UTC

По данным аэрологической диаграммы (Рисунок 3.1.10) атмосфера устойчива из-за инверсии в нижних слоях, что блокирует развитие конвекции и исключает грозы. На высотах 3-5 км наблюдается насыщение влагой и формирование облачности среднего яруса. Ветровой режим характеризуется сдвигом направления с высотой и усилением скорости, создавая условия для умеренной турбулентности.

Station 72558 at 09 UTC 02 Sep 2019
VALLEY, NE., USA
Latitude: 41.320 Longitude: -96.366

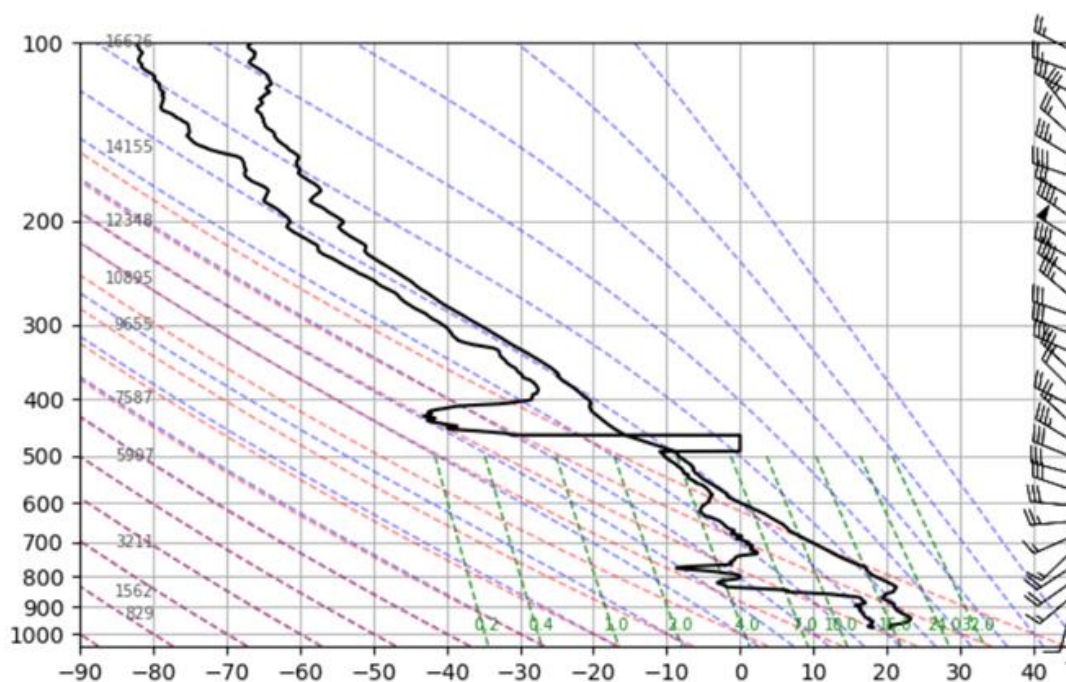


Рисунок 3.1.10. Аэрологическая диаграмма 02.09.2019 в 09 UTC

Таким образом, генерация ВГВ над Южной Дакотой 2 сентября 2019 года была обусловлена наличием мезомасштабной конвективной системы, что привело к формированию ярких concentрических гравитационных волн, наблюдаемых в канале DNB.

3.2 Техас 28 октября 2022 г.

28 октября 2022 над штатом Техас (США) на спутнике NOAA-20 прибора VIIRS в канале DNB были зафиксированы внутренние гравитационные волны. На рисунке 3.2.1. за над штатом Канзас (США) сформировались волновые структуры в форме концентрических кругов в канале DNB за 27.10.2022 и на рисунке 3.2.2. видно, что они за сутки сместились южнее вблизи штата Техас, стали более контрастными и ярко выраженными на темном фоне, но слегка деформировались, вероятно, из-за воздействия на них внешних факторов.

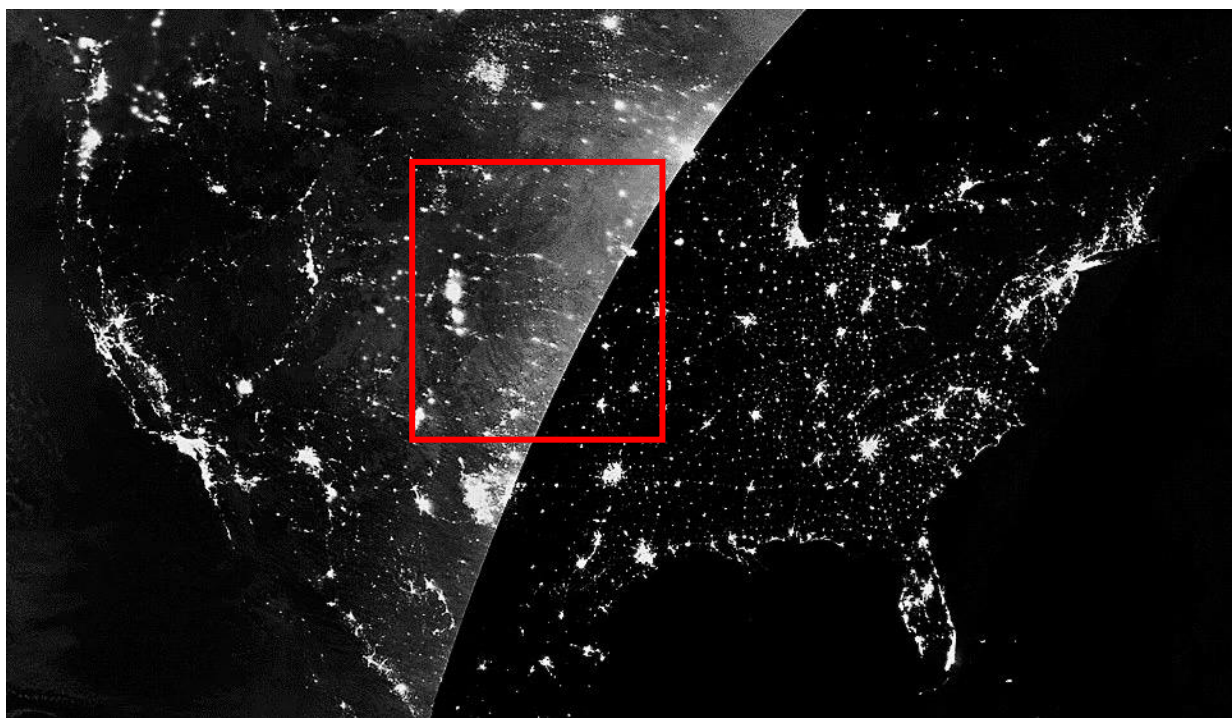


Рисунок 3.2.1. Снимок Северной Америки (США) со спутника NOAA-20 в канале DNB 27.10.2022

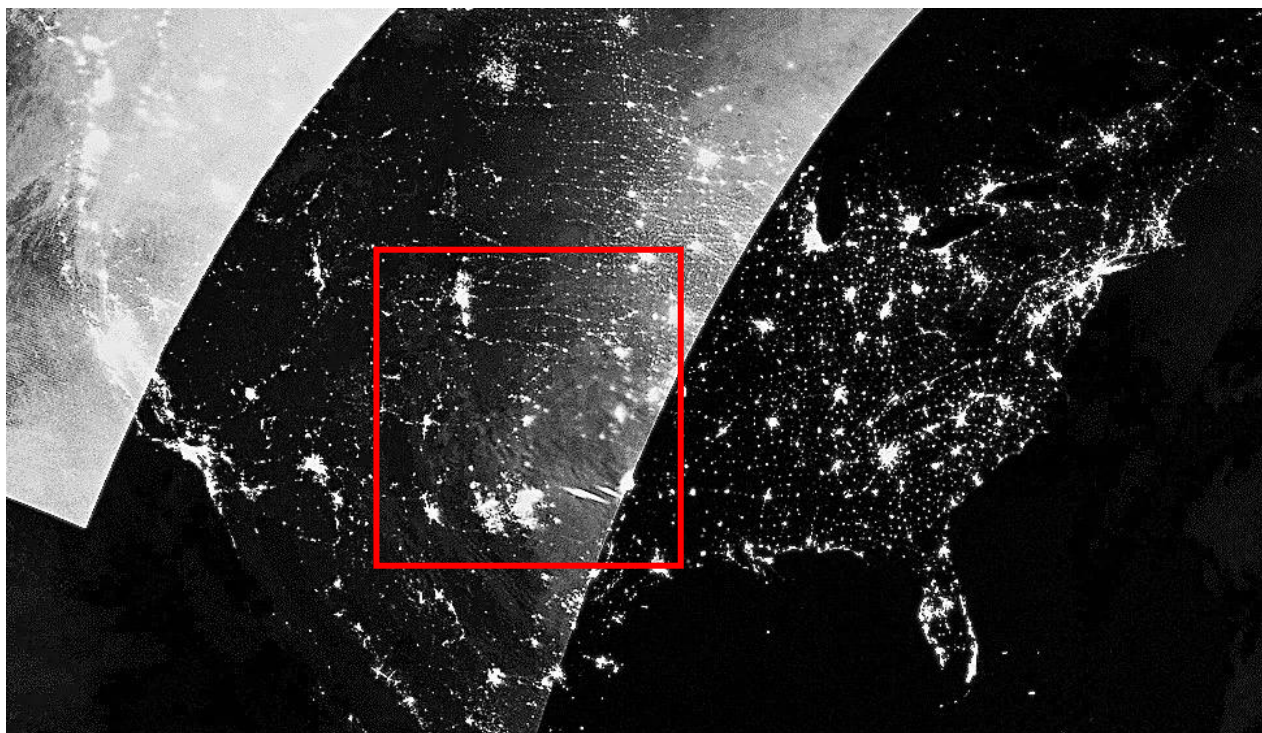


Рисунок 3.2.2. Снимок Северной Америки (США) со спутника NOAA-20 в канале DNB 28.10.2022

Анализ спутниковых снимков за 27-28 октября в ВД (рисунок 3.2.3. и рисунок 3.2.4.), полученных в видимом диапазоне, позволяет детализировано проследить динамику развития и формирования конвективных процессов.

На данном снимке также мы видим волокнистую текстуру (27.10.2022), которая формируется в области фронта, а затем только к 28.10.2022 начинает формировать вихревое циклоническое движение, приобретая матовую текстуру, образуя отличимую индивидуальную форму образующейся барической депрессии, а наличие теней, которые отбрасывает облачность, помогают увидеть структуру формирующегося циклона.

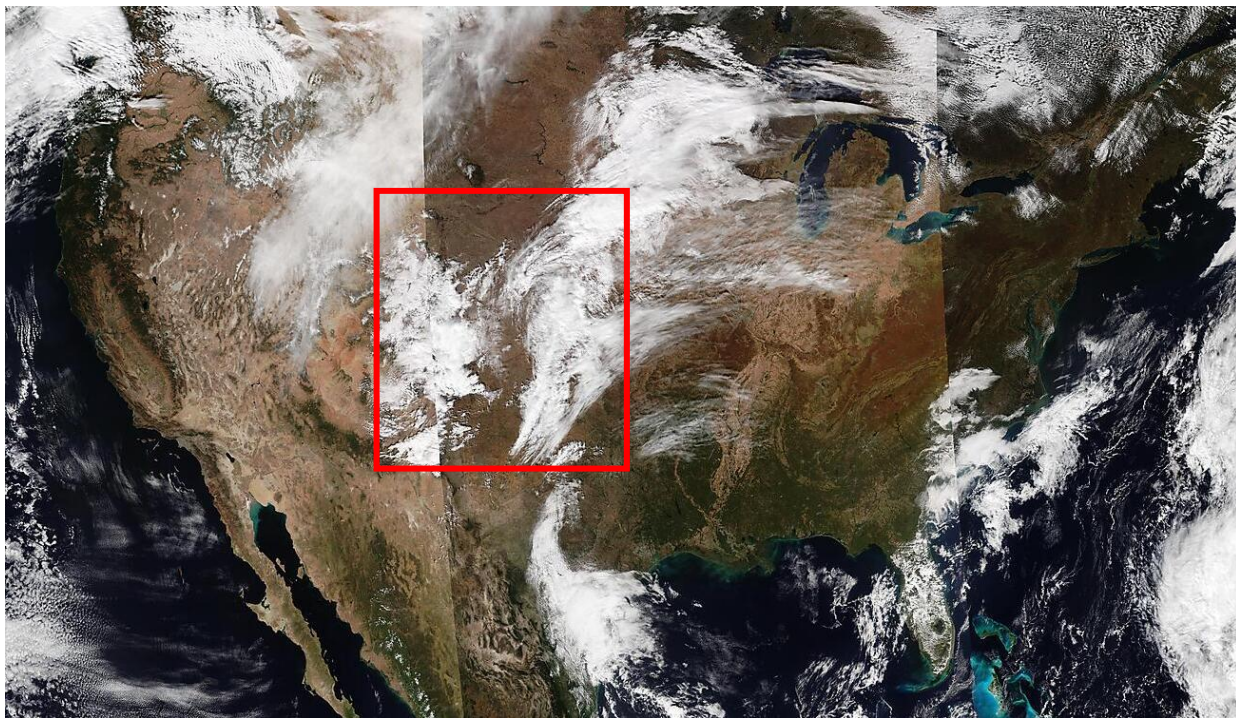


Рисунок 3.2.3. Снимок Северной Америки (США) со спутника NOAA-20
в канале ВД 27.10.2022

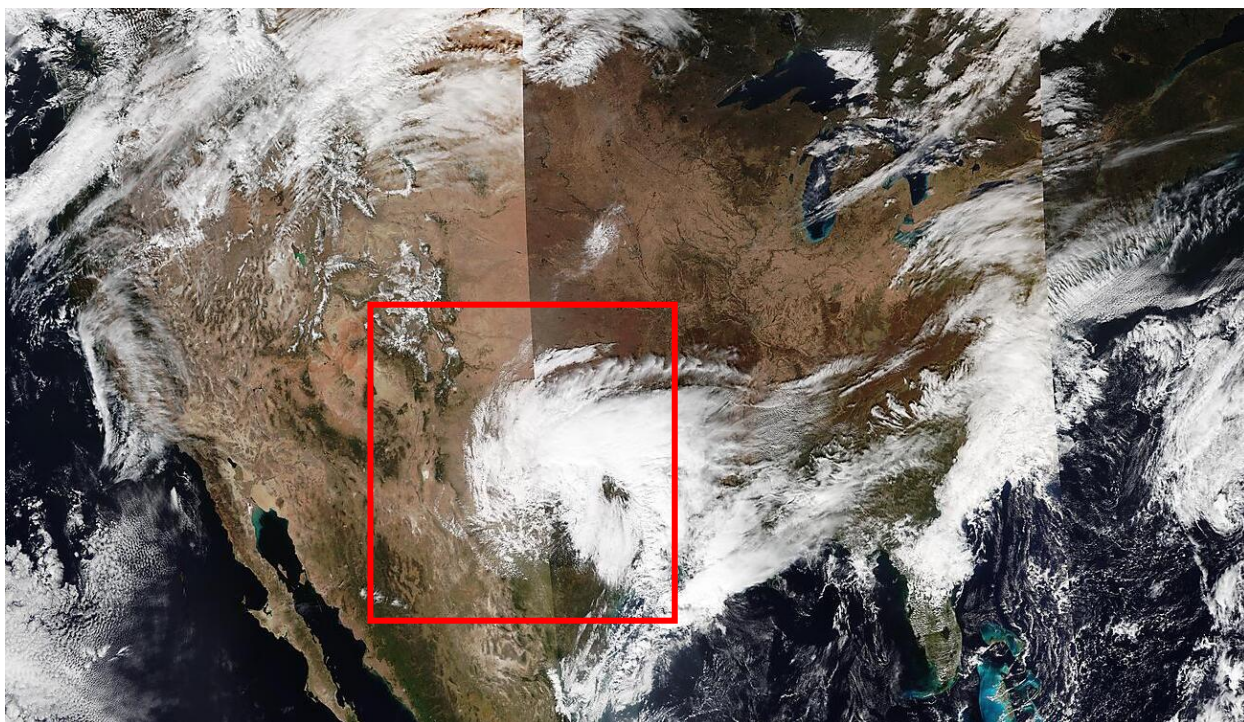
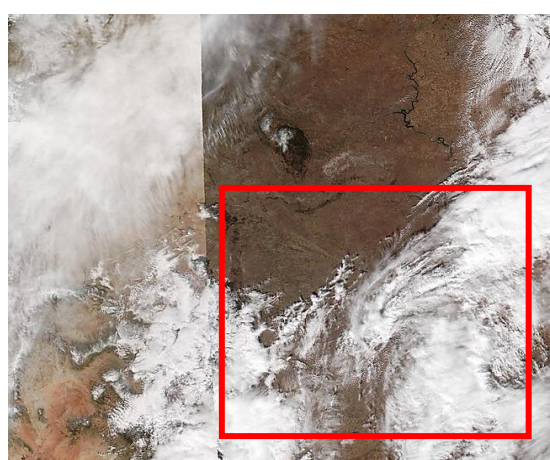
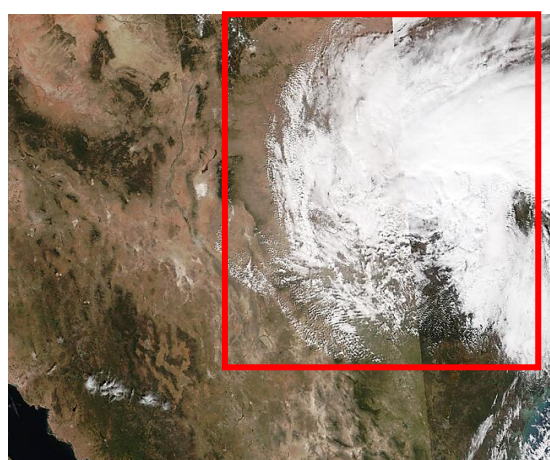


Рисунок 3.2.4. Снимок Северной Америки (США) со спутника NOAA-20
в канале ВД 28.10.2022

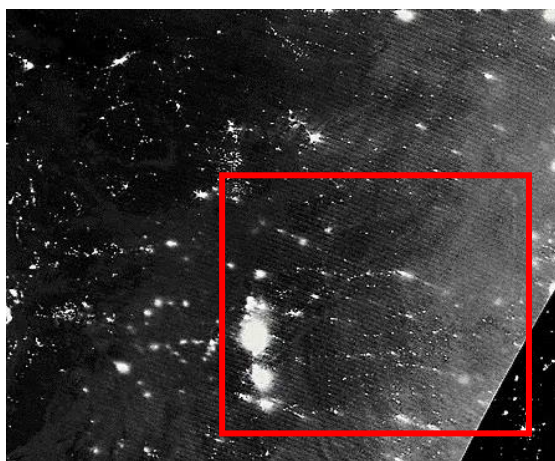
На серии снимков (Рисунок 3.2.5.) можно наблюдать увеличенные фрагменты данных спутниковых снимков с ВГВ для детализированного анализа. Спутниковые снимки за 27-28 октября в ВД позволяют детализировано проследить динамику развития и формирования конвективных процессов, где мощный восходящий поток внутри облака, генерирует возмущения, которые распространяются в вышележащие слои атмосферы, в том числе мезосферы, как это видно на снимке DNB.



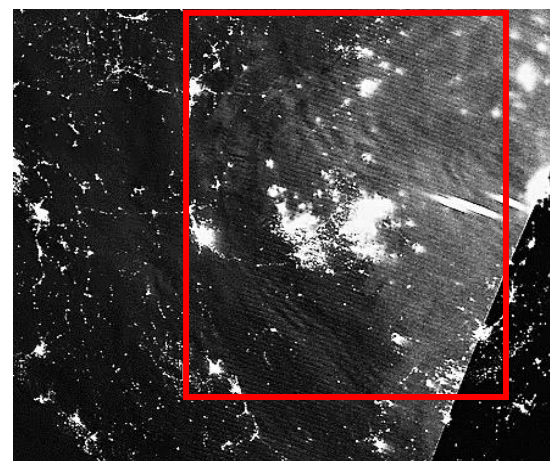
а



б



в



г

Рисунок 3.2.5. (а) - снимок со спутника NOAA-20 в канале ВД 27.10.2022, (б) - снимок со спутника NOAA-20 в канале ВД 28.10.2022, (в) - снимок со спутника NOAA-20 в канале DNB 27.10.2022, (г) - снимок со спутника NOAA-20 в канале DNB 28.10.2022.

Анализируя данные с сайта Eumetrain.org за 28.10.2022 за 09 UTC (время было взято самое ближайшее с учётом того, что снимки в DNB были сделаны спутником NOAA-20 в 08:45 UTC, по данным с сайта NASA), можем наблюдать за условиями формирования данной облачности, так на рисунке 3.2.6 в ИК диапазоне наблюдаемая область мощной конвекции выглядит ярко белым цветом, что является следствием контрастов температур между соседними располагающимися облачностью и позволяет сделать вывод о том что данные облака являются оптически более плотными, высокоразвитыми и мощными, а четкие края на снимке указывают на активное развитие облачной системы.

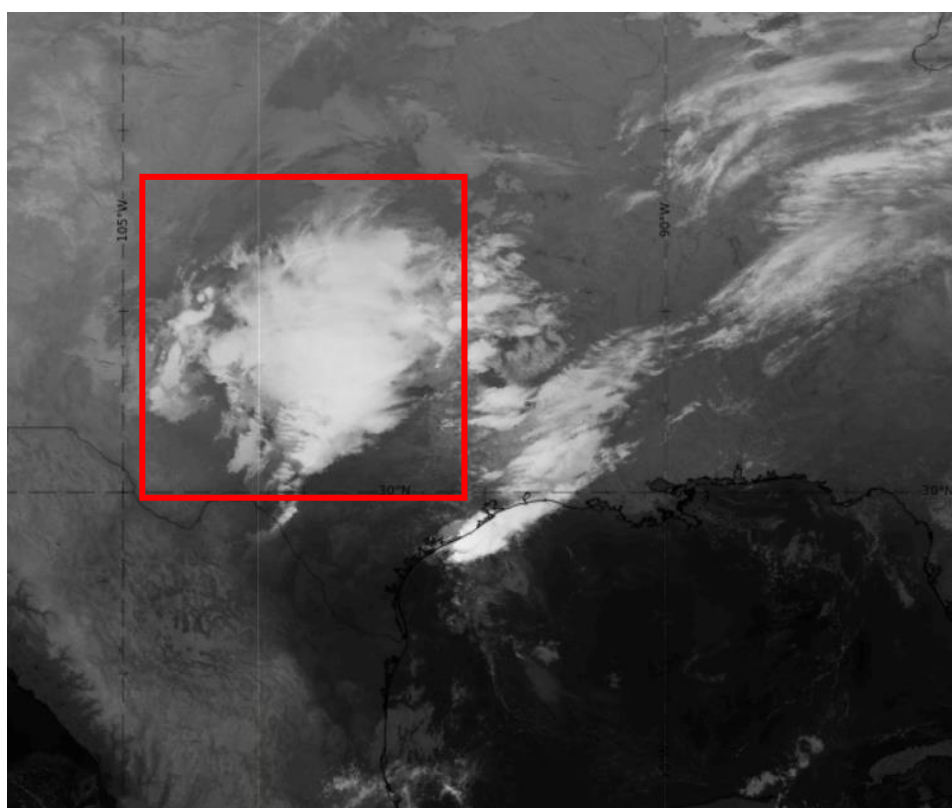


Рисунок 3.2.6. Снимок в ИК диапазоне 10.3 28.10.2022 в 09 UTC

В подтверждение к этому служит снимок Night Microphysics RGB (Рисунок 3.2.7), где данная область вертикального развития различима ярко-красным цветом. Такой цвет является индикатором оптической толщины облака, что в

данном случае свидетельствует о том, что облака являются оптически плотными, высокоразвитыми и сильными конвективными образованиями.

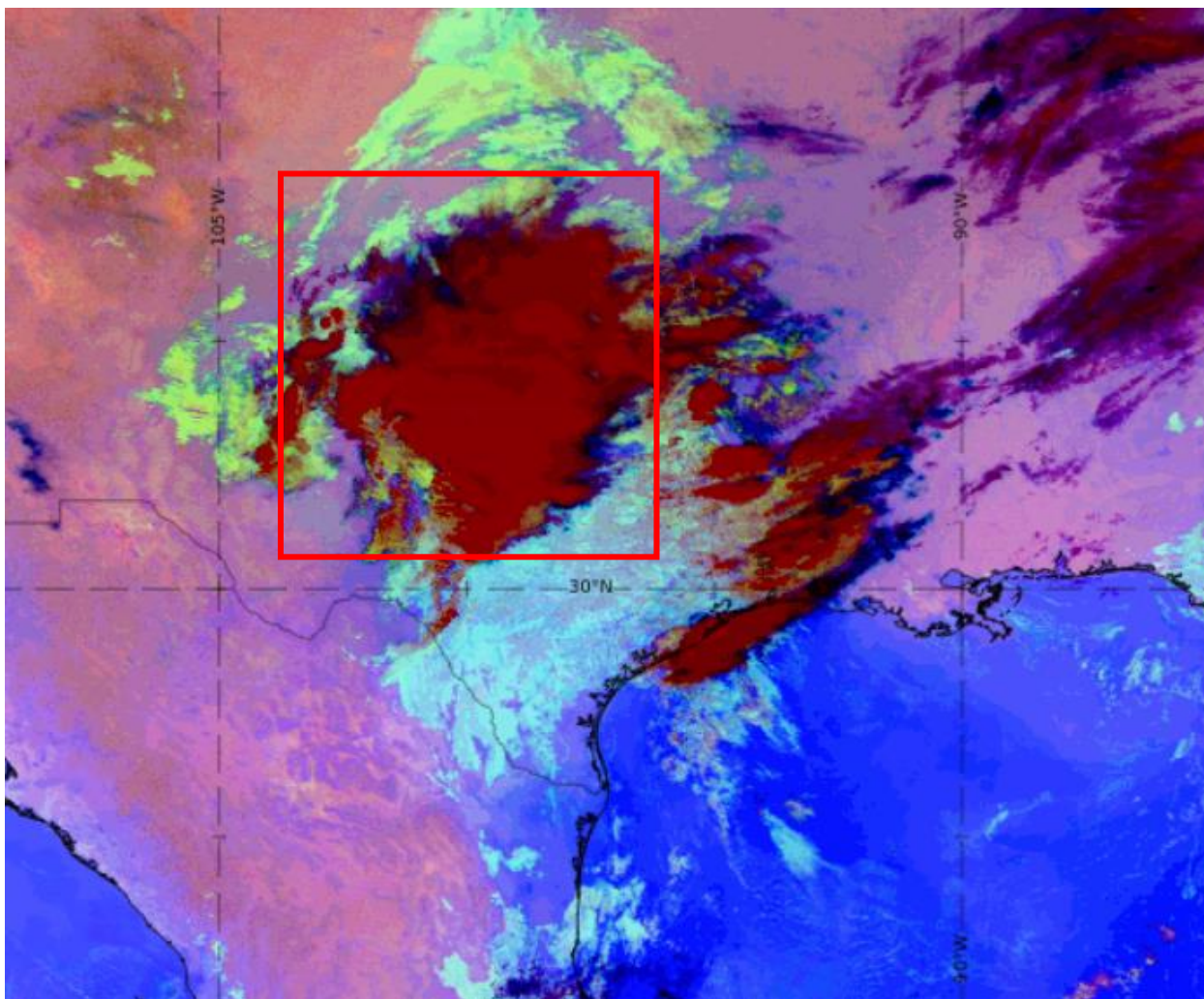


Рисунок 3.2.7. Night Microphysics RGB 28.10.2022 в 09 UTC

Ключевую роль в развитии такой облачности внесла область пониженного давления и сформировавшийся циклон (Рисунок 3.2.8). Данное барическое образование заложило основу для развития неустойчивости в атмосфере и позволила образовать восходящие потоки воздуха.

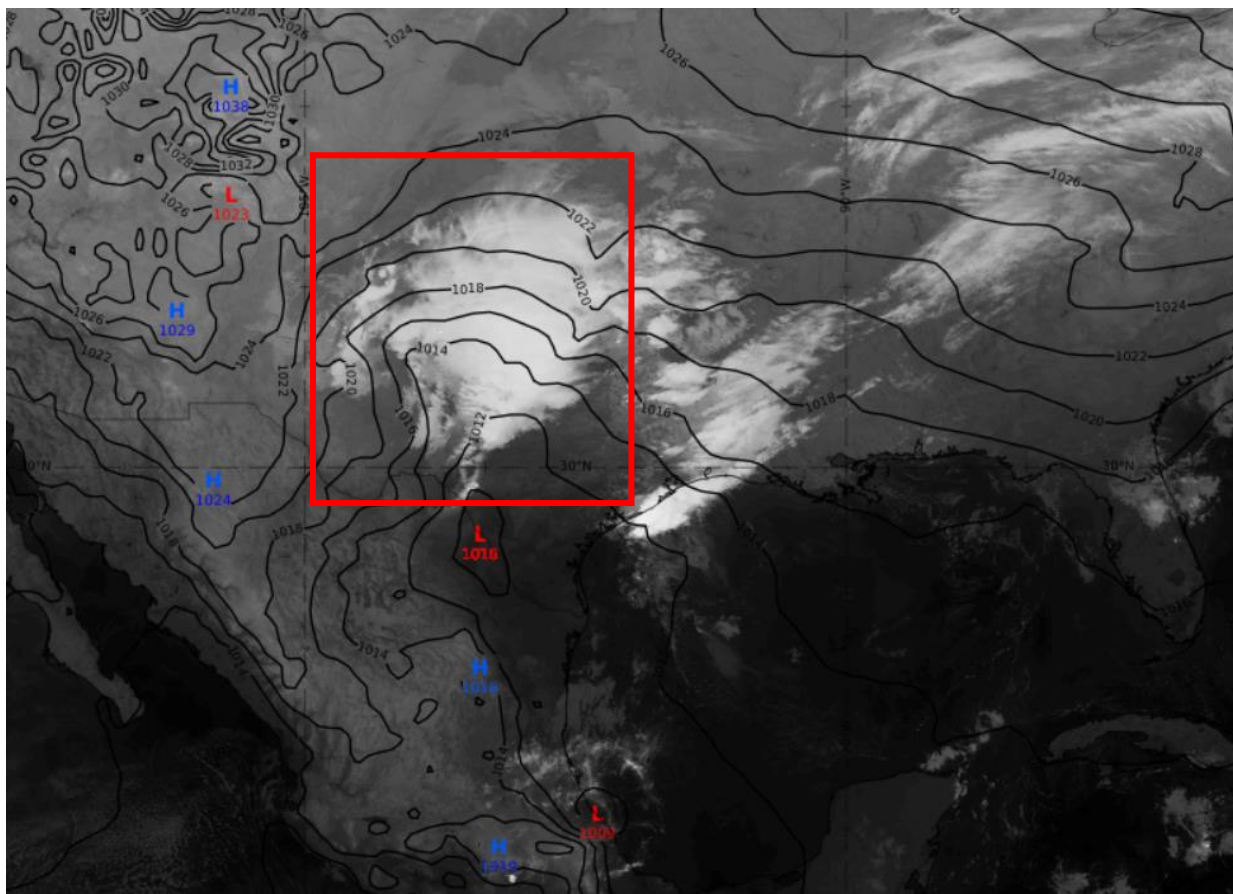


Рисунок 3.2.8. Барическое поле на высоте уровня моря на снимке в ИК
диапазоне 28.10.2022 в 09 UTC

Наличию струйных течений свидетельствует схождение ветров в поле ветра на 300 гПа на рисунке 3.2.9 и наличие струйных течений на снимке с изотаксами (рисунок 3.2.10), где желтым выделены скорости ветра от 30 м/с и более, где над областью нашего исследования максимальная изолиния пересекает отметку в 50 м/с. Струйные течения при развитии ВГВ играют важную роль, т.к. они задают направление движений волн, перенося их на большие расстояния, а также определяет характер их распределения и движения.

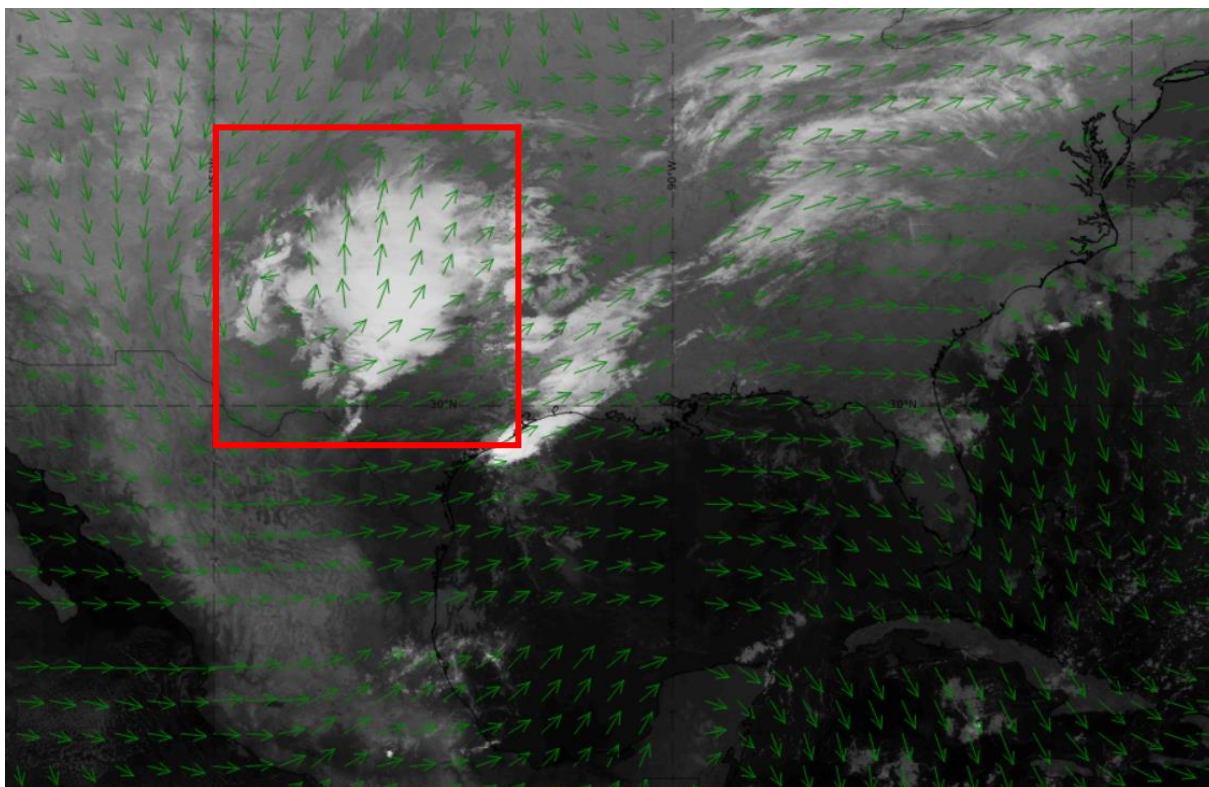


Рисунок 3.2.9. Поле ветра на снимке в ИК диапазоне на 300 гПа 28.10.2022 в 09 UTC

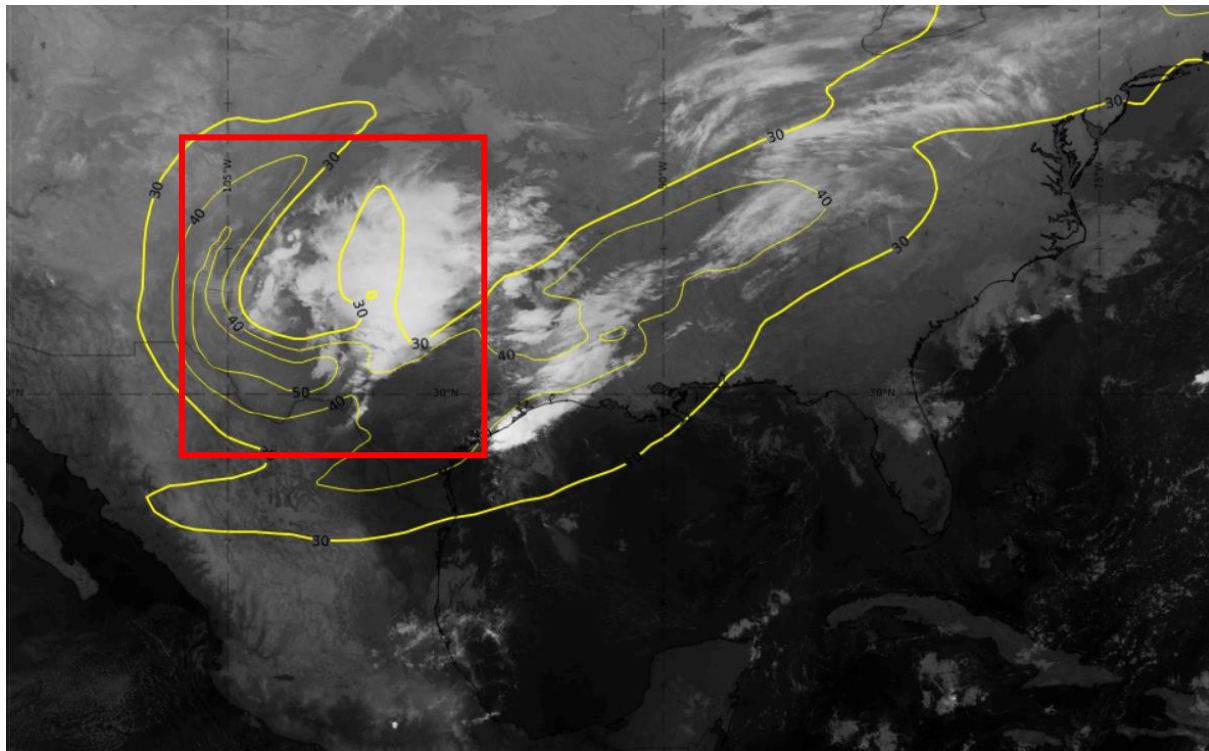


Рисунок 3.2.10. Изотахи на снимке в ИК диапазоне на 300 гПа 28.10.2022 в 09 UTC

Анализ снимка за 28 октября Height PV=1.5 с высотой тропопаузы (рисунок 3.2.11), позволяет увидеть понижение высоты тропопаузы и образование ложбины в рассматриваемой зоне, а также сгущение замкнутых изолиний указывает на наличие складки тропопаузы, где сам процесс формирования складки тропопаузы в зонах сильных струйных течений (на рисунке их можно различить длинными изолиниями) и фронтальных разделов генерирует ВГВ, поскольку сопровождается резкими горизонтальными и вертикальными градиентами ветра и температуры, а также выраженными восходящими и нисходящими потоками.

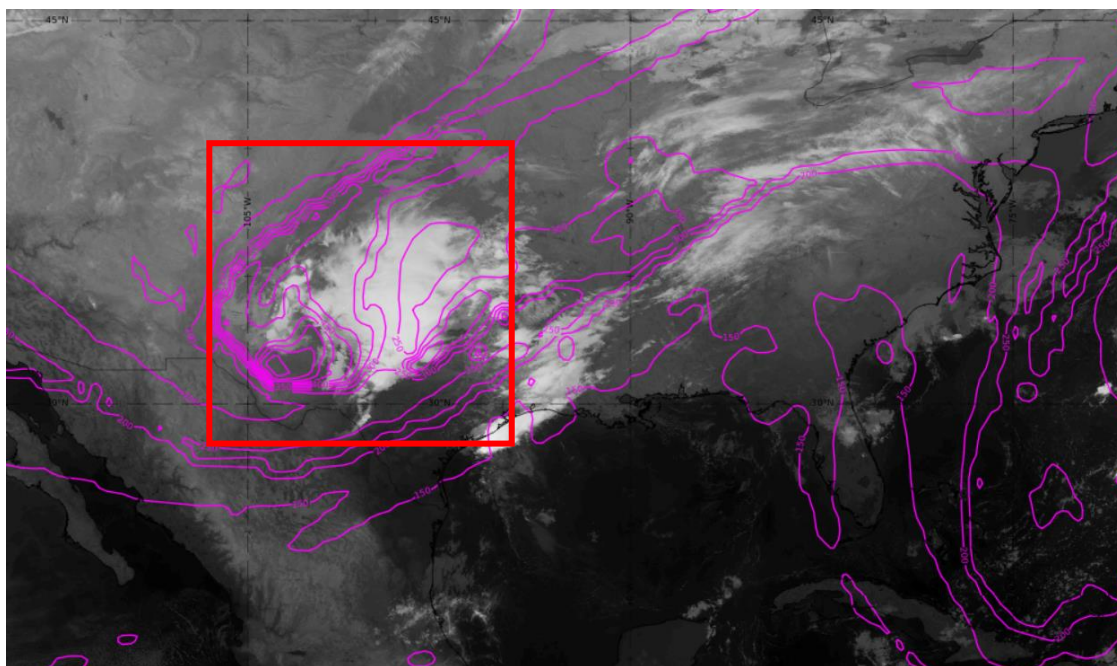


Рисунок 3.2.11. Высота тропопаузы (Height PV=1.5) на снимке в ИК диапазоне 28.10.2022 в 09 UTC

Отрицательные значения омеги на рисунке 3.2.12 также указывают на восходящие движения воздуха и в нашем случае значения составляют от -2 до -3 Па/с, что указывает нам на характерные мезомасштабные подъемы с высотным циклоном.

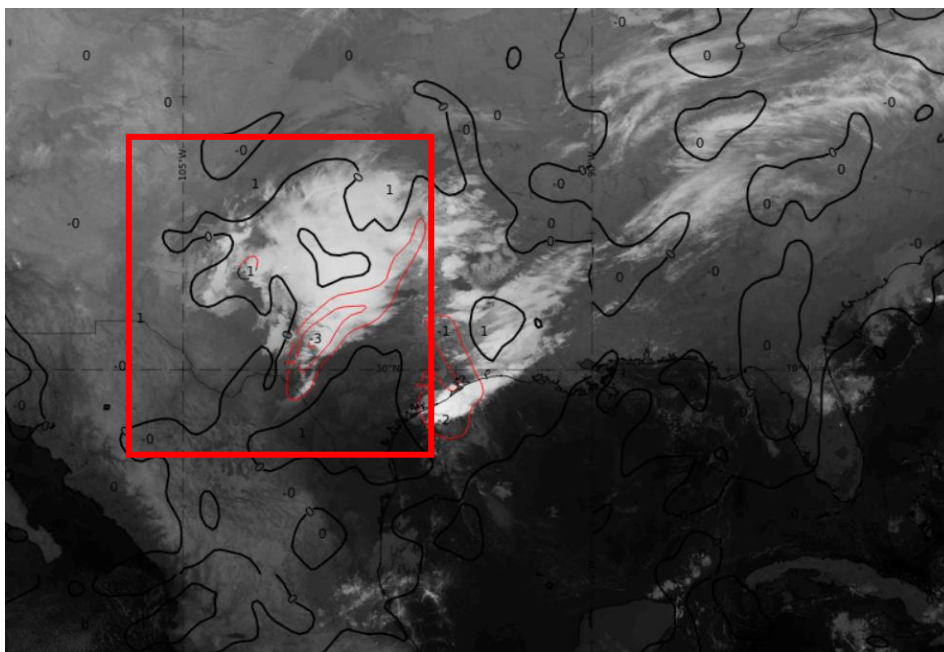


Рисунок 3.2.12. Омега на снимке в ИК диапазоне на уровне 700 гПа 28.10.2022
в 09 UTC

На картах адвекции циклонической завихренности (Рисунок 3.2.13 - CVA) за 28.10.2022 в 09 UTC на уровне 700 гПа, красные изолинии указывают на зоны положительной адвекции вихря и образование циклона, а замкнутые линии указывают на область с интенсивным подъемом воздуха.

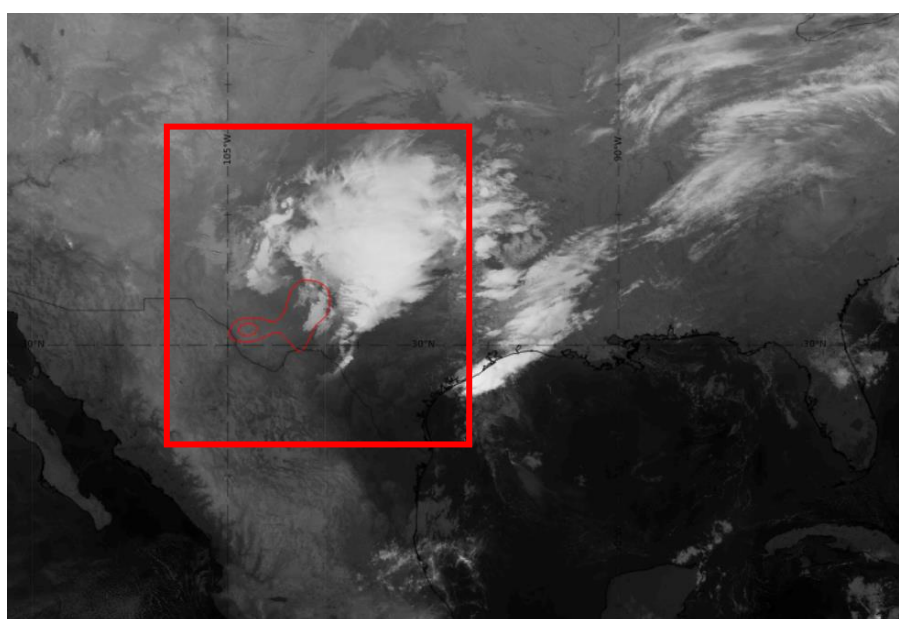


Рисунок 3.2.13. CVA на снимке в ИК диапазоне на 700 гПа 28.10.2022 в 09 UTC

Значения дивергенции на уровне 700 гПа на рисунке 3.2.14 имеют положительные значения, которые свидетельствуют об образовании конвекции в данном месте.

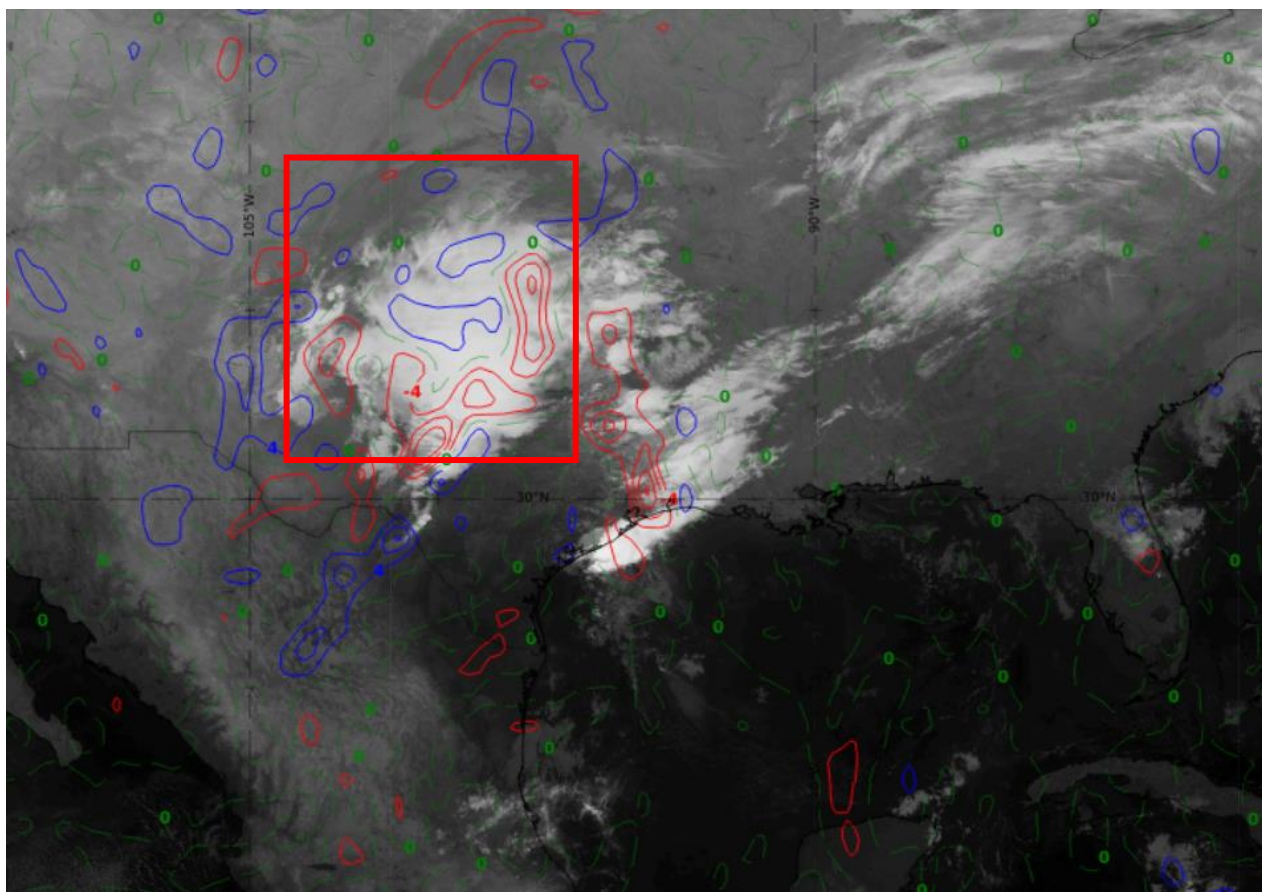


Рисунок 3.2.14. Дивергенция на снимке в ИК диапазоне на 700 гПа 28.10.2022 в 09 UTC

Индекс Шовальтера на рисунке 3.2.15 показывает вероятность развития гроз и конвективной неустойчивости атмосферы, где его пороговое значение равно нулю, как в нашем случае, которое является граничным значением и является предиктором начала формирования возможной грозовой активности.

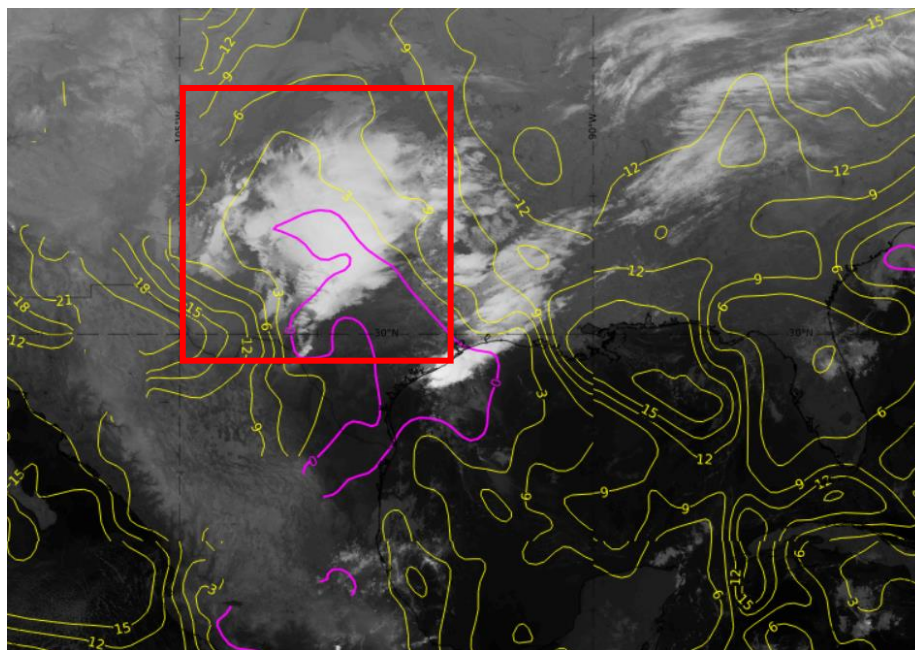


Рисунок 3.2.15. Индекс Шовальтера на снимке в ИК диапазоне 28.10.2022 в 09 UTC

Сходимость линий тока на рисунке 3.2.16 указывает на очевидную выраженную сходимость воздушных потоков и указывает на наличие мощной завихренности.

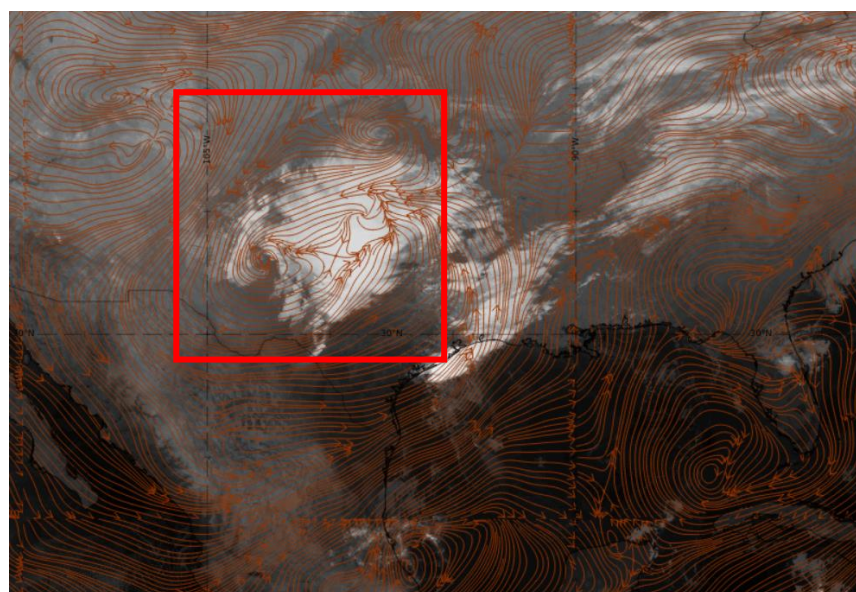


Рисунок 3.2.16. Линии тока на снимке в ИК диапазоне на 700 гПа 28.10.2022 в 09 UTC

По данным аэрологической диаграммы (Рисунок 3.2.17.) атмосфера неустойчивая, температурная кривая приближается с линией точки росы создают условия для активной конвекции и развития кучево-дождевой облачности. У поверхности воздух сухой, но с высотой быстро насыщается влагой. Ветровой режим характеризуется сдвигом направления и усилением скорости с высотой, что усиливает турбулентность.

Station 72261 at 09 UTC 28 Oct 2022
DEL RIO/INT., TX., USA
Latitude: 29.374 Longitude: -100.918

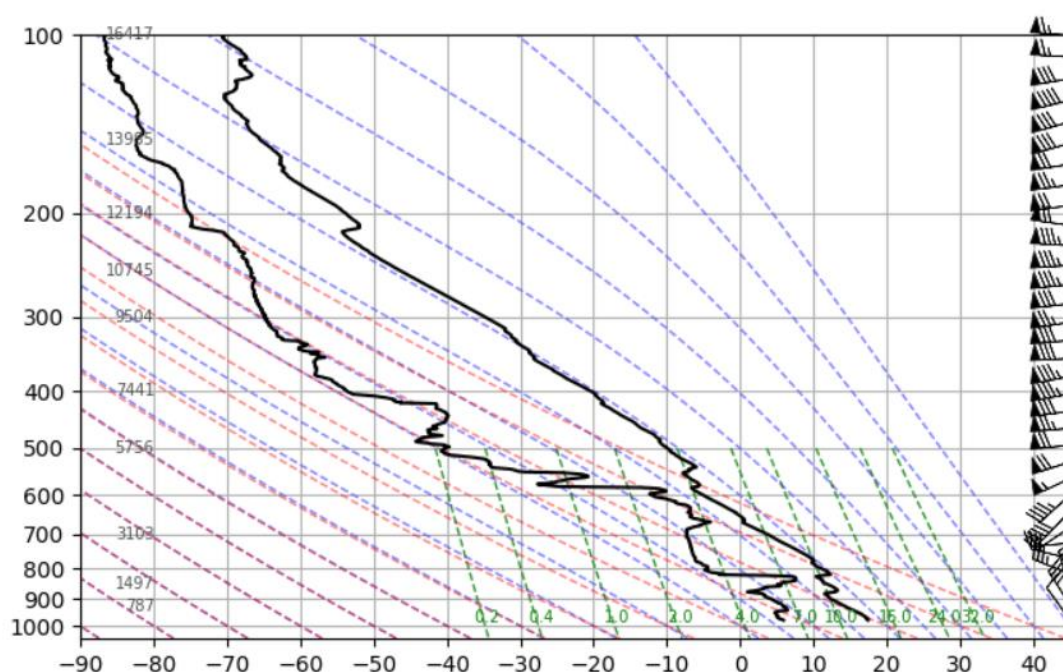


Рисунок 3.2.17. Аэрологическая диаграмма 28.10.2022 в 09 UTC

Таким образом, генерация ВГВ над Техасом 28 октября 2022 г. была обусловлена сочетанием мощной развивающейся конвекции, наличием струйных течений, сходимостью линий тока, положительной дивергенции и отрицательным значением омеги.

3.3 Северо-Западная часть США 14 октября 2020 г.

14 октября 2020 года над Северо-Западной частью США на спутнике NOAA-20 с помощью прибора VIIRS в канале DNB также были зафиксированы внутренние гравитационные волны (рисунок 3.3.1). Рассматривая рисунок 3.3.2, можно увидеть, что над исследуемой территорией наблюдается зернистая текстура, с выраженной линейной структурой, формирующей развивающуюся кучевую облачность, тени между рядами облачной системы, контрастируя с поверхностью земной поверхности, указывают на направление движения облаков, что совпадает с траекторией распространения ВГВ на снимке DNB.

Также стоит выделить рельеф в данном месте и выделить орографический фактор как один из факторов формирования облачности и распространению ВГВ, так как они способны вызвать мощные вертикальные возмущения в воздушном потоке, которые при больших значениях ветра и пересечениях горных массивов способны генерировать волновые возмущения и распространяться вертикально на десятки километров вплоть до мезосферы.

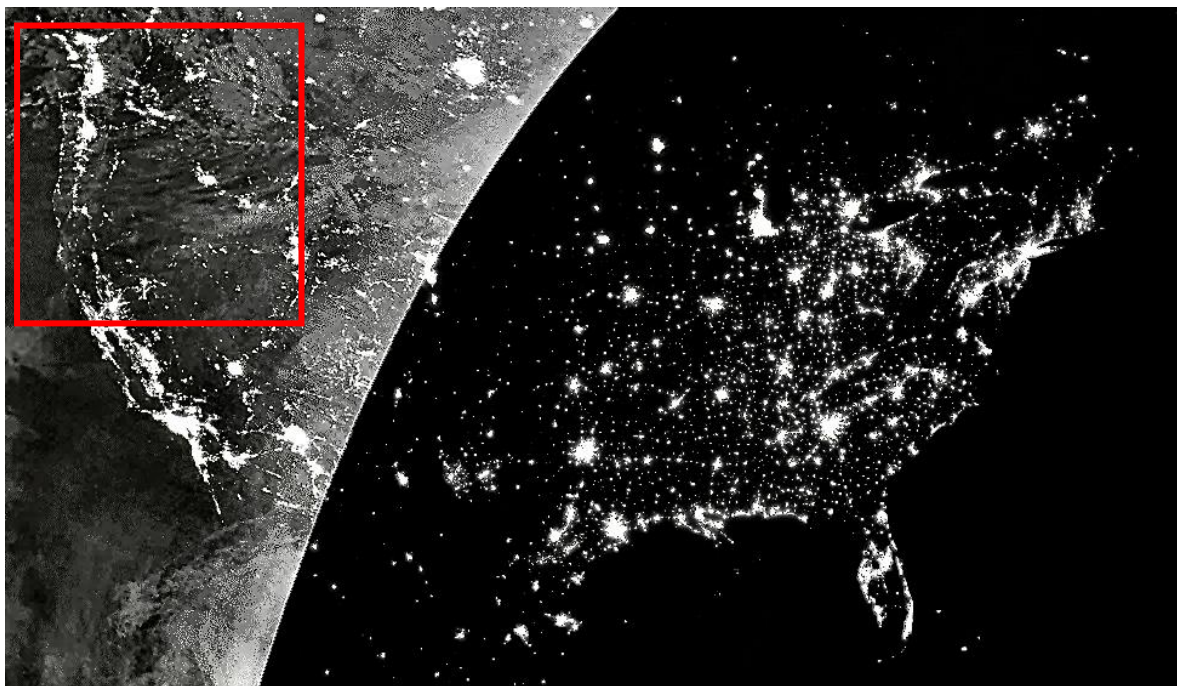


Рисунок 3.3.1. Снимок Северной Америки (США) со спутника NOAA-20 в канале DNB 14.10.2020 г.

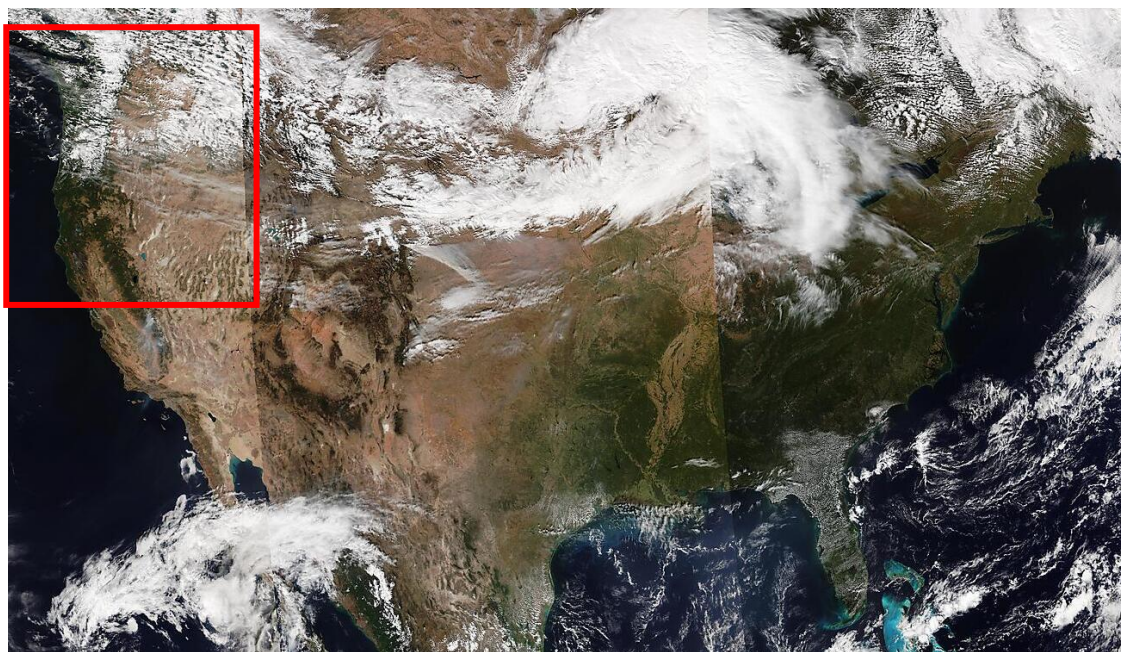
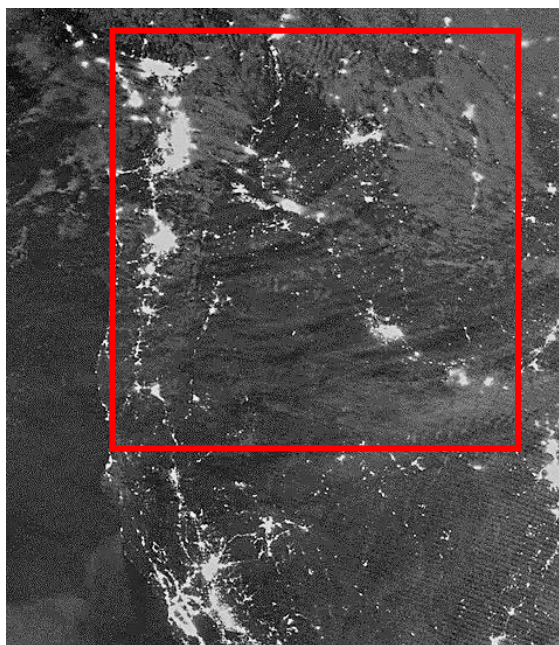
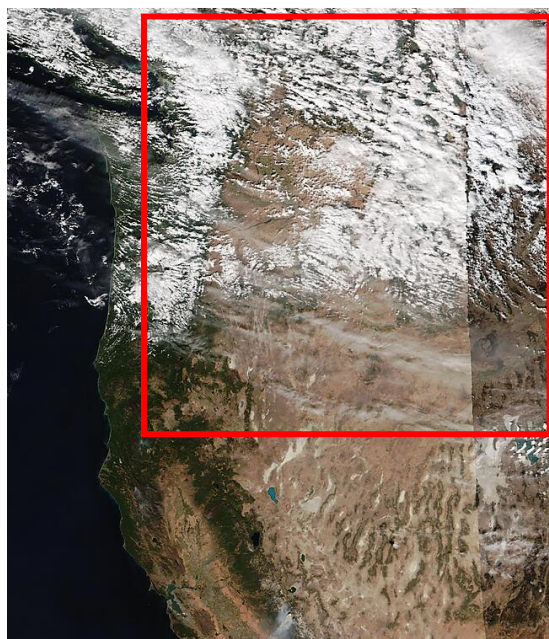


Рисунок 3.3.2. Снимок Северной Америки (США) со спутника NOAA-20 в канале ВД 14.10.2020 г.

Рисунок 3.3.3 а и б представляет собой увеличенные фрагменты спутникового снимка с ВГВ.



а



б

Рисунок 3.3.3. (а)-снимок над Северо-Западной частью США со спутника NOAA-20 в канале DNB 14.10.2020, (б)-снимок над Северо-Западной частью США со спутника NOAA-20 в канале ВД 14.10.2020.

Анализ метеорологических параметров с сайта Eumetrain позволяет выявить ключевые факторы, подтверждающие формированию ВГВ. На снимке с изотопами (Рисунок 3.3.4) наблюдается наличие струйных течений со значениями скорости ветра в 30 м/с, которые распространялись вдоль направления, совпадающего с ориентацией распространения рассматриваемых возмущений на снимке DNB.

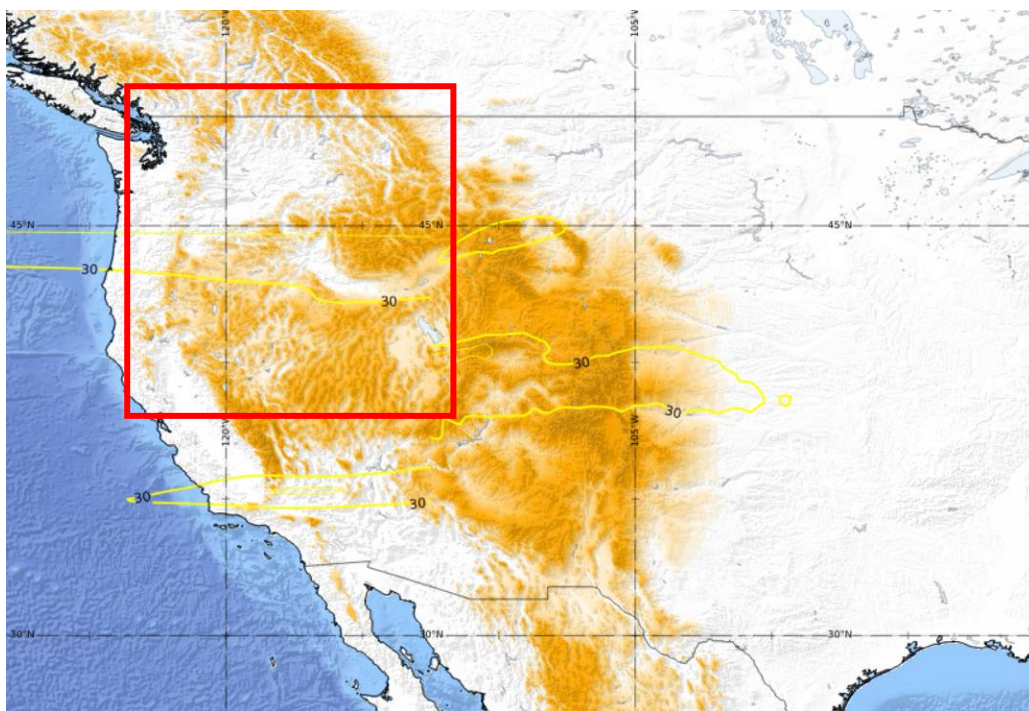


Рисунок 3.3.4. Изотохи на уровне 300 гПа 14.10.2020 в 09 UTC

На карте Height PV=1.5 видно, что значение изолиний повышается над исследуемой областью по сравнению с остальной частью снимка, соответственно значение высоты тропопаузы (Рисунок 3.3.5) понижается, что напрямую могло способствовать более благоприятным условиям для вертикального распространения волновых возмущений в вышележащие слои атмосферы.

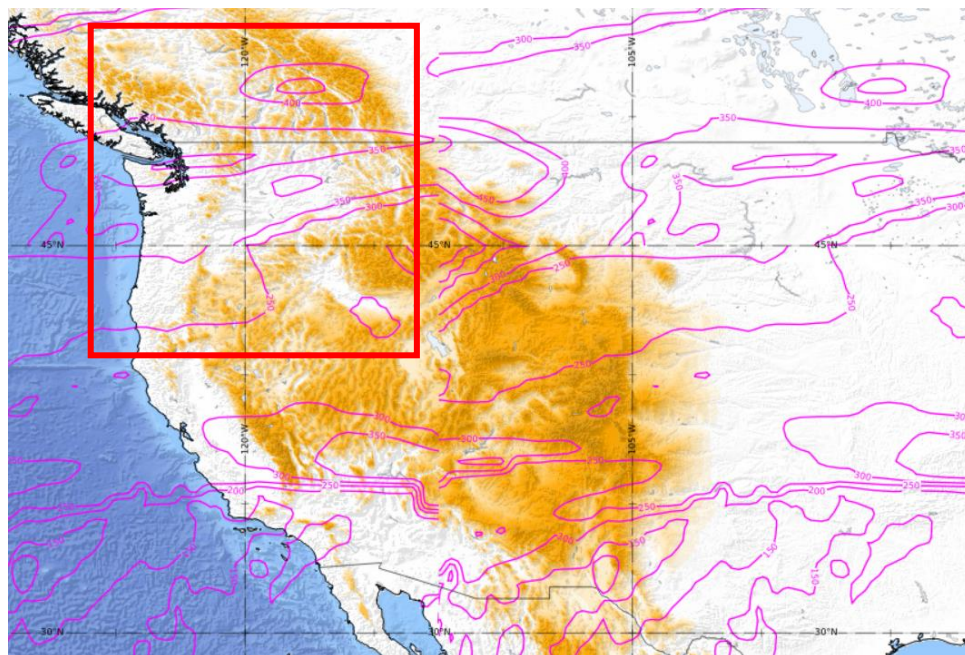


Рисунок 3.3.5. Высота тропопаузы (Height PV=1.5) 14.10.2020 в 09 UTC

Поле вертикальной скорости (омега) на уровне 700 гПа (Рисунок 3.3.6) характеризовалось значением -1 Па/с на территории исследования, а за пределами значение равно нулю.

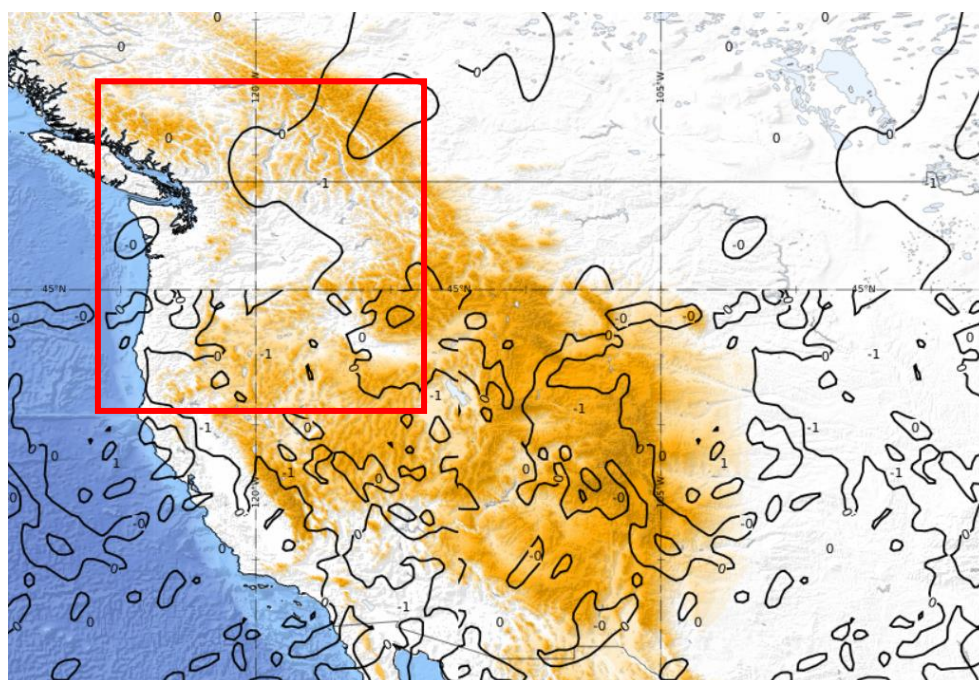


Рисунок 3.3.6. Показатель Омега на уровне 700 гПа 14.10.2020 в 09 UTC

В подтверждение этому служит карта адвекции циклонической завихренности за 14 октября 2020 года (Рисунок 3.3.7), на которой можно зафиксировать отсутствие значений над нашей территорией, что свидетельствует о том, что циклонической завихренности не наблюдалось за этот срок.

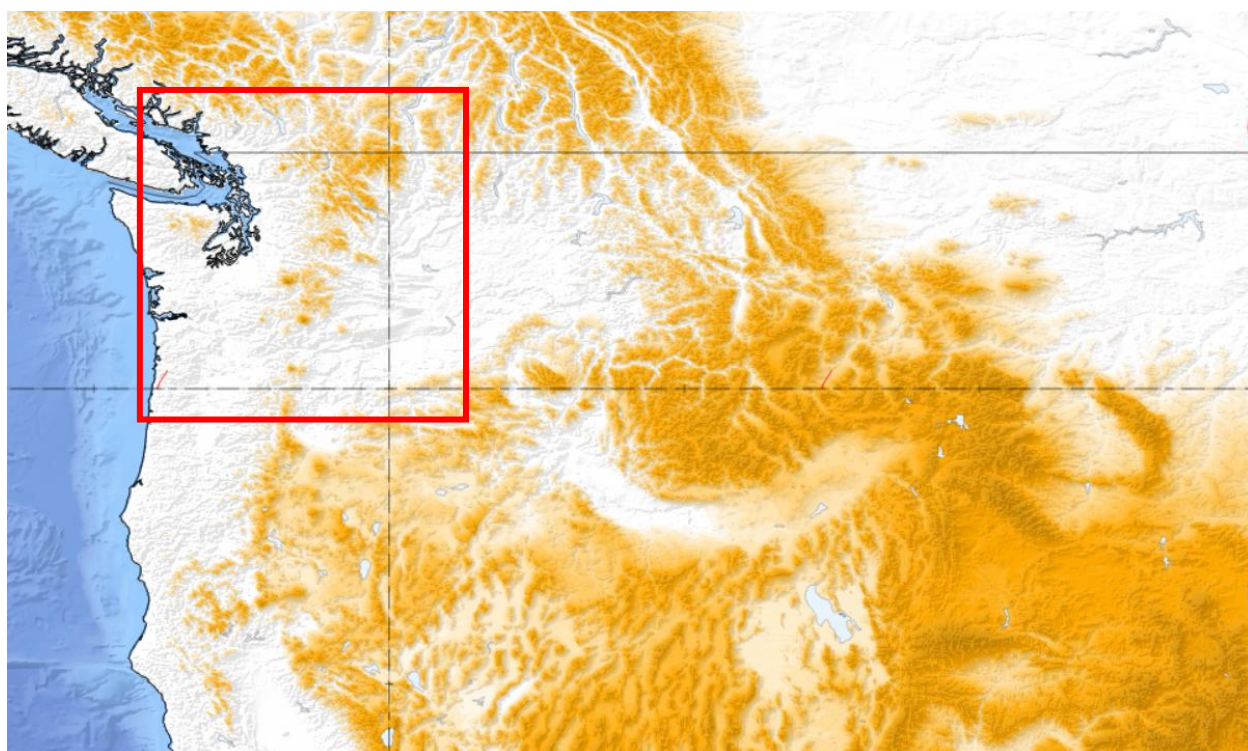


Рисунок 3.3.7. CVA на уровне 700 гПа 14.10.2020 в 09 UTC

На рисунке 3.3.8 представлено поле дивергенции на уровне 700 гПа, где чередуются положительные и отрицательные значения (нисходящие и восходящие потоки), но преобладают положительные, что свидетельствует о развивающихся конвективных процессах, характерных для неустойчивого состояния атмосферы, а также о сходимости и расходимости потоков отсутствия циклонической и антициклонической направления движения воздушных потоков на поверхности 700 гПа в данном месте исследования.

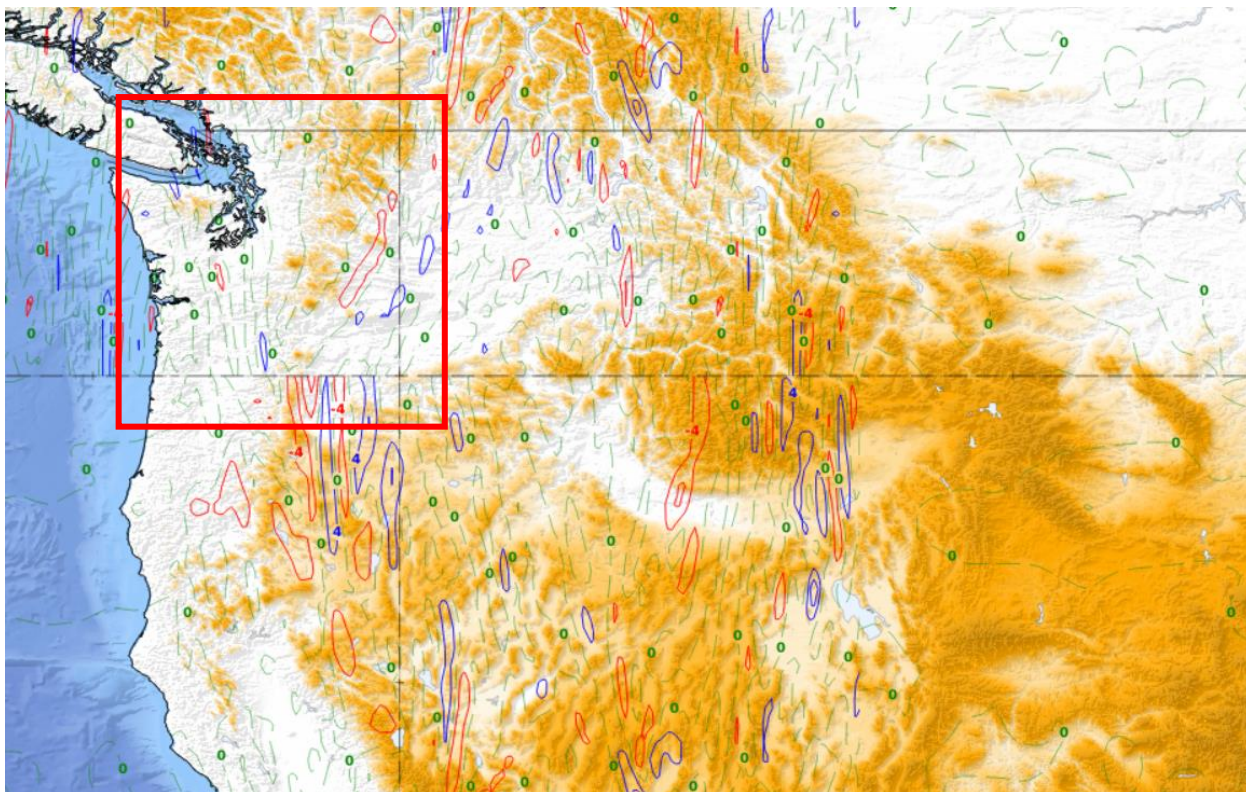


Рисунок 3.3.8. Дивергенция на уровне 700 гПа 14.10.2020 в 09 UTC

Индекс Шовальтера показывает, что чем более отрицательным является его значение, тем выше вероятность развития гроз и мощной конвекции, рассматривая данный индекс для нашего случая (Рисунок 3.3.9), можно отметить, что его значения были ниже нуля на большей части территории на высоте 3000 м (700 гПа), и минимальное значение составило -3.

Значение данного индекса что указывает на возможное начало формирования грозовой активности, а также неустойчивое состояние атмосферы.

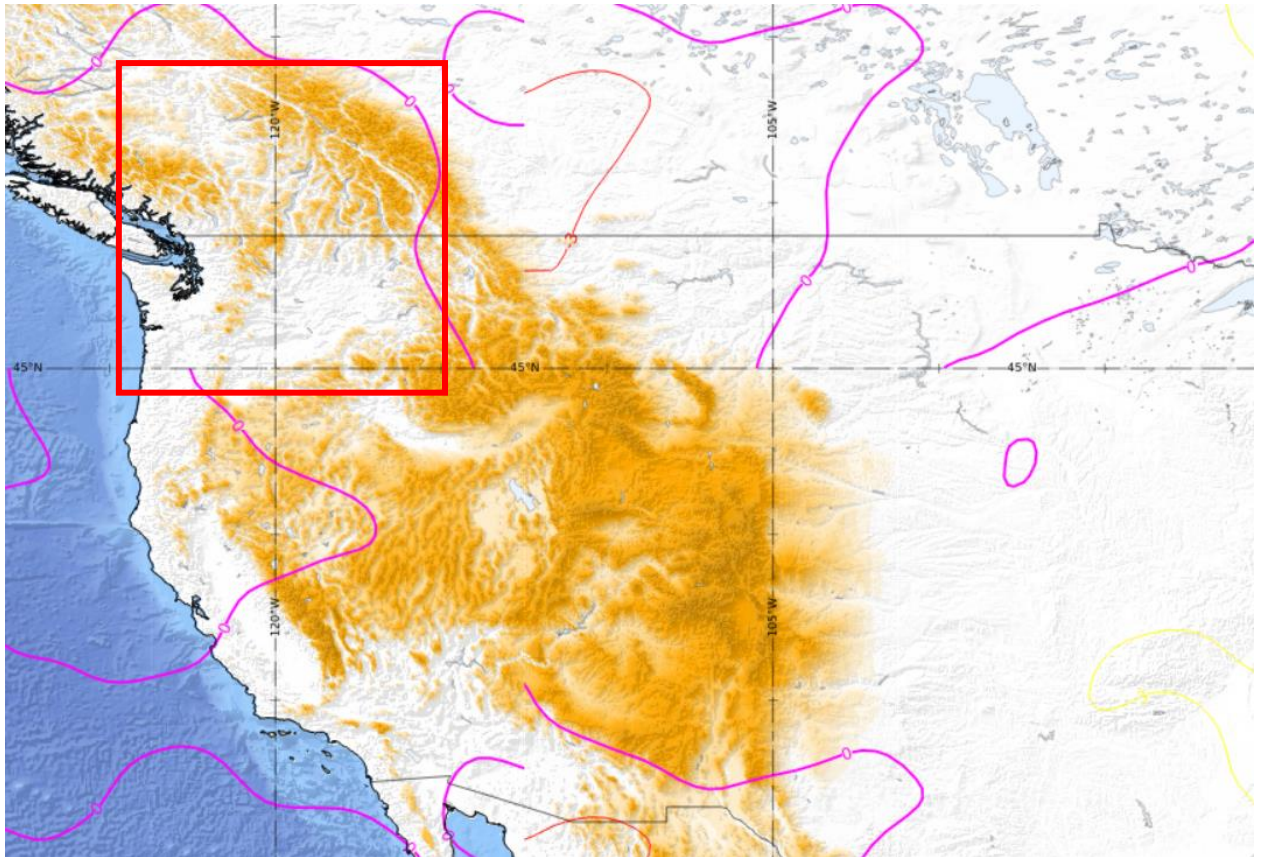


Рисунок 3.3.9. Индекс Шовальтера на уровне 700 гПа 14.10.2020 в 09 UTC

Ночью и в утренние часы холодный воздух стекает с гор и скапливается в долине. Это создает мощный слой холодного воздуха у земли, над которым располагается более теплый воздух.

На диаграмме это выражено резким изгибом кривой температуры вверх в нижних слоях (800-900 гПа), а атмосферный профиль демонстрирует выраженную статическую устойчивость с характерной температурной инверсией в приземном слое, также прослеживается умеренный сдвиг ветра с высотой.

Station 72786 at 09 UTC 14 Oct 2020

SPOKANE, WA., USA

Latitude: 47.682 Longitude: -117.627

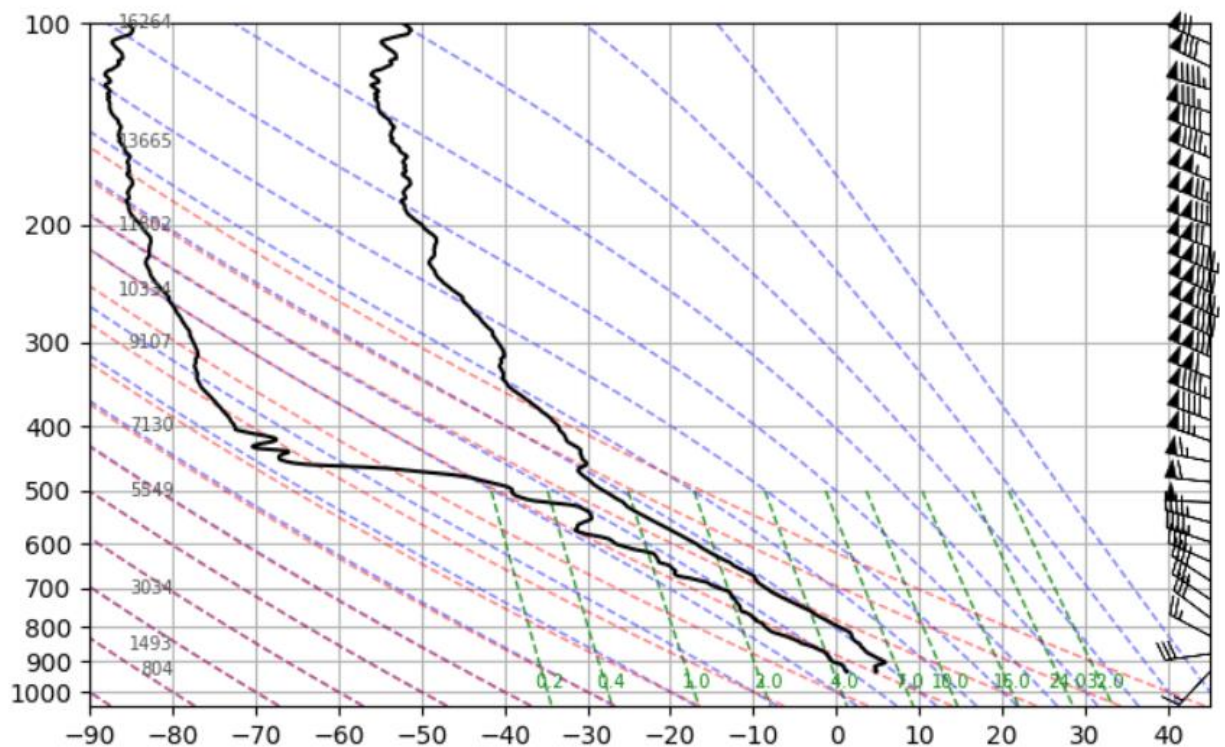


Рисунок 3.3.10. Аэрологическая диаграмма 14.10.2020 в 09 UTC

Таким образом, зафиксированные 14 октября 2020 года над Северо-Западной частью США внутренние гравитационные волны были сформированы восходящими движениями и наличием конвекции в данном месте, а также орографией над данной областью, в отличие от предыдущих случаев, где волны были связаны циклонической активностью, над Северо-Западом США в этот период не наблюдалось крупных барических образований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена анализу гравитационных волн в мезосфере по данным спутниковой съемки. В ходе выполнения работы был проведен анализ спутниковых данных для выявления ВГВ в мезосфере по спутнику VIIRS NOAA-20 в канале Day/Night Band. В теоретической части были рассмотрено строение и динамика средней атмосферы, с центром внимания на гравитационные волны, их роль в формировании переносов энергии и импульса в атмосфере, были изучены особенности распространения ВГВ, наличие источников, стимулирующих их развитие и распространение, что подтверждает возможность использования спутниковых данных для оценки формирования внутренних гравитационных волн в мезосфере.

В практической части, были выявлены гравитационные волны для трех выбранных регионов Северной Америки в США: Южная Дакота 02 сентября 2019 г., Техас 28 октября 2022 г. и Северо-Западная часть США 14 октября 2020 г., для которых были определены характер их формирования и изменения в пространстве.

На основе этого были получены следующие выводы:

1. В зависимости от динамических условий волны могут сохранять чёткую форму в течение нескольких часов и образовываться благодаря развивающейся барической депрессии (случай над Техасом) или формироваться локальными конвективными процессами при отсутствии крупных барических образований (случай над Северо-Западом США), а также образовываться из-за влияния образования крупной конвективной облачности с грозовой деятельностью (случай в Дакоте).
2. Сопоставление выявленных ВГВ с метеорологическими параметрами (индекса Шовальтера, вертикальной скорости омега, поля дивергенции, адвекции циклонической завихренности) позволило установить связь

между генерацией гравитационных волн, распространяющихся до высот мезосферы, и конкретными атмосферными процессами.

3. Спутник NOAA-20 с прибором VIIRS и его каналом Day/Night Band является эффективным инструментом для обнаружения ВГВ в мезосфере. В силу того, что канал DNB имеет высокую чувствительности к свечению атмосферы, это дает возможность фиксировать волновые структуры в виде концентрических кругов даже в ночное время. Сравнение с Suomi NPP показало, что NOAA-20 даёт более чёткие и контрастные изображения для нашего случая, что повлияло на выбор в качестве основного источника данных.
4. Ограниченная доступность спутниковых снимков и метеорологических полей на порталах VIIRS Today и Eumetrain не снизила качество полученных результатов, но повлияло на отбор снимков в силу отсутствия необходимых данных.

Таким образом, цель работы достигнута и на основе полученных и проанализированных данных можно сделать вывод о том что спутниковая съёмка в канале DNB позволяет зафиксировать ВГВ в мезосфере для последующего анализа, при этом комплексный подход, сочетающий визуальную интерпретацию спутниковых снимков и анализ динамических полей (дивергенция, CVA, омега, индекс Шовальтера), позволяет не только фиксировать факт волновой активности, но и устанавливать её причины, к которым можно отнести синоптические и орографические источники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков К.Ю., Федосеева Н.В., Смирнова А. И., Лопуха В.О., Кузнецов А.Д. Обработка и анализ цифровых архивов метеорологических данных удаленного доступа. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2021. – 68 с.
2. Гаврилов Н. М. Тепловой эффект внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере, Изв. АН СССР Физ. атмосф. и океана., 1974. Т. 10, № 1, С. 83–84.
3. Гидродинамика океана и атмосферы : пер. с англ. / Эккарт К. ; ред. пер. Обухов А. М. ; пер. Дикий Л. А., Успенский П. Н. - М. ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2004. - 327 с. - Библиогр. в конце гл. - ISBN 5-93972-321-7.
4. Дробжева Я.В. Перенос энергии и количества движения акустическими волнами в атмосфере.[Текст]: учебное пособие /Дробжева. – СПб.: Адмирал, 2016. – 112 с.
5. Исаева А. Д., Матин Д. С., Синичкин А. Н., Фролов А. С. Внутренние гравитационные волны в атмосфере. 2016
6. Мордосова О. В., Колтовской И. И. Исследование внутренних гравитационных волн инфракрасной камерой всего неба над территорией Якутии // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 40. № 3. С. 228-239. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-227-238
7. О. В. Лапина, О. Д. Рейнгеверд. Художник И. Г. Архипов. Художественный редактор Б. А. Бураков. Технический редактор Н. Ф. Грачева. Корректор Л. Б. Емельянова. Атмосфера. 1991
8. Переведенцев, Ю. П. Теория общей циркуляции атмосферы [Текст] : учебное пособие /Ю. П. Переведенцев, И. И. Мохов, А. В. Елисеев. - Казань: Казан. гос. ун-т, 2013 - 223 с.
9. Погорельцев, Александр Иванович. Взаимодействие волн глобального масштаба в средней атмосфере и их влияние на среднезональную

циркуляцию: автореферат дис. ... доктора физико-математических наук : 25.00.29 / С.-Петерб. гос. ун-т. — Санкт-Петербург, 2003. — 30 с..

10. Федосеева Н.В., Симакина Т.Е., Соловых А.Д. Условия формирования орографических атмосферных волн // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 177. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a

11. Федосеева, Н. В. Исследование волновых процессов на спутниковых снимках с использованием фильтра Габора / Н. В. Федосеева, Т. Е. Симакина, М. Ю. Делиева // Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях : Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 07 апреля 2023 года / Под редакцией И.В. Зайцевой. – Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2023. – С. 324-330.

12. FindData / [Электронный ресурс] // NASA LAADS DAAC : [сайт]. — URL: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/> (дата обращения: 17.05.2026).

13. FSNRAD_L2_VIIRS_CRIS_SNPP / [Электронный ресурс] // NASA LAADS DAAC : [сайт]. — URL: https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/FSNRAD_L2_VIIRS_CRIS_SNPP (дата обращения: 17.05.2026).

14. Gill, Adrian E. Atmosphere-Ocean Dynamics, International Geophysics Series, Volume 30, Academic Press, 1982. 378-380.

15. Hozumi Y. Geographical and Seasonal Variations of Gravity Wave Activities in the Upper Mesosphere Measured by Space-Borne Imaging of Molecular Oxygen Nightglow / Y. Hozumi, A. Saito, T. Sakanoi [et al.] // Earth, Planets and Space. – 2024. – Vol. 76, No. 1. – P. 73. – DOI 10.1186/s40623-024-01993-x.

16. Lai C., Yue J., Xu J., Straka W. C., Miller S. D., Liu X. Suomi NPP VIIRS/DNB imagery of nightglow gravity waves from various sources over China // *Advances in Space Research*. — 2017. — Vol. 59, No. 8. — P. 1951–1961. — DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.041.
17. Miller, S. D., Straka III, W. C., Mills, S. P., et al., 2013. Illuminating the capabilities of the Suomi NPP VIIRS day/night band. *Remote Sens.* 5, 6717-6766.
18. Miller, S. D., Straka III, W. C., Yue J., et al., 2015. Upper atmospheric gravity wave details revealed in nightglow satellite imagery. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, E6728-E6735.
19. Miller, S.D.; Straka, W., III; Mills, S.P.; Elvidge, C.D.; Lee, T.F.; Solbrig, J.; Walther, A.; Heidinger, A.K.; Weiss, S.C. Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band. *Remote Sens.* 2013
20. Nappo C. J. *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves* / Academic Press, 2012, – 400 p
21. Online Weather Maps // Eumetrain URL: <https://eumetrain.org/> (дата обращения: 28.04.2026).
22. Sutherland B. R. *Internal gravity waves* / Cambridge University Press. 2010, – 394 p, doi.org/10.1017/CBO9780511780318
23. University of Wyoming Atmospheric Science Radiosonde Archive // Wyoming Weather Web URL: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml> (дата обращения: 03.05.2026).
24. VIIRS Today: USA Composite // VIIRS Today -- CIMSS/SSEC URL: <https://ge.ssec.wisc.edu/viirs-today/> (дата обращения: 15.03.2026)