



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Использование спутниковой съёмки при анализе
фёнового эффекта»

Исполнитель **Кокорина Дарья Алексеевна**
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(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)

«25» мая 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	5
1	ФЕНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ	7
1.1	История исследований	7
1.2	Классификация	9
1.3	Динамика	11
1.4	Механизмы образования	13
1.4.1	Конденсация и осадки	14
1.4.2	Опускание воздуха	14
1.4.3	Турбулентное перемешивание	15
1.4.4	Радиационное нагревание	15
1.5	Влияние фенов на режим тепла, влаги и облачности	15
1.6	Прогноз фенов	17
1.6.1	Вероятностные методы	18
1.6.2	Модельные прогнозы	19
1.6.3	Открытые проблемы прогнозирования	20
1.7	Климатология фена	20
1.8	Географическое распределение фенов по всему земному шару	22
1.8.1	Фены в Европе	22
1.8.2	Фены в Северной и Южной Америке	24
1.8.3	Фены в Гренландии	24
1.8.4	Фены в Азии	25
1.8.5	Фены в Австралии	28
1.8.6	Фены в Африке	28
1.8.7	Фены в Антарктиде	29
1.9	Географическое распределение фенов по территории России	30
1.10	Воздействие фена на общество	31

1.10.1	Влияние на местный климат	31
1.10.2	Качество воздуха	32
1.10.3	Пожары и дорожно-транспортные происшествия	33
1.10.4	Биометеорологические эффекты	34
2	МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ФЕНОВОГО ЭФФЕКТА	36
2.1	Спутниковые данные	36
2.1.1	Структура облачности на спутниковых снимках	36
2.1.2	Спутники Aqua и Terra	38
2.2	Данные инструментальных измерений	39
2.3	Данные реанализа	41
2.4	Данные радиозондирования	42
2.5	Ключевые параметры феновых ветров в Альпах	44
2.5.1	Южный фен	44
2.5.2	Северный фен	46
3	АНАЛИЗ ФЕНОВЫХ ВЕТРОВ В АЛЬПАХ	48
3.1	Анализ случая Северного фена в Альпах	49
3.2	Анализ случая Южного фена в Альпах	62
3.3	Расчет чисел Фруда	73
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	79
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б	

ВВЕДЕНИЕ

Ветер фен представляет собой комплексное метеорологическое явление. Он возникает вследствие нисходящего движения с подветренной стороны горного хребта, когда воздушный поток ориентирован относительно горного хребта перпендикулярно. Феновый ветер приводит к резкому нагреванию воздуха и понижению относительной влажности на подветренной стороне горного хребта, также фен может вызывать на подветренной стороне уменьшение плотности воздуха, вертикальной видимости, вертикальной мощности облаков и повышение дальности видимости. В отдельных случаях феновый эффект вызывает повышение скорости ветра на подветренной стороне, а также увеличение мощности и степени покрытия облачностью, уменьшение дальности видимости и увеличение количества осадков на наветренной стороне горного хребта.

Фен влияет на многие аспекты жизни людей. Он может оказывать положительное воздействие на развитие сельского хозяйства, когда некоторые горные районы не пригодные для проведения сельскохозяйственных работ, становятся идеальными для выращивания культур под влиянием теплых воздушных масс. Но также, феновый ветер может оказывать и отрицательное воздействие на сельское хозяйство, когда происходят резкие перепады температур и осушается почва. Ветер может принимать ураганную силу и губить урожай. Фен оказывает отрицательное воздействие не только на отрасли народного хозяйства. Он также может вызвать сход снежных лавин, стать причиной распространений пожаров, аварий на железных, автомобильных и канатных дорогах. Феновый ветер является опасным фактором для полетов на самолете и других воздушных перелетов. Большое количество исследований посвящено биометеорологическим последствиям феновых ветров.

Фен – сложнопредсказуемое явление, на данный момент все то количество получаемой информации не может обеспечить точный прогноз явления. До сих

пор нет общепринятой теории фена, но есть большое количество гипотез его возникновения. Анализ фенового эффекта с использованием спутниковой съемки может помочь приблизиться к точному описанию такого сложного метеорологического явления.

Целью работы являлся анализ условий формирования и действия фенового ветра.

Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Сформировать архив спутниковых изображений случаев фенового ветра;
2. Составить архив карт данных реанализа с различными метеорологическими величинами;
3. Рассчитать ряд параметров, используемых для определения условия формирования фенового ветра;
4. Произвести сравнение между данными аэрологического зондирования и инструментальных измерений на станциях с наветренной и подветренной стороны.

Данная работа состоит из трех глав.

В первой главе рассматривались механизмы образования фенов, его влияние на режим погоды, географическое распределение, а также воздействие на общество.

Во второй главе рассматривались методы и инструменты, доступные для выявления и анализа фенового ветра.

В третьей главе был произведен комплексный анализ двух случаев Северного и Южного фена в Альпах. Особое внимание было уделено анализу фенового ветра по спутниковым снимкам в канале водяного пара.

1. ФЕНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ

В настоящее время невозможно игнорировать то влияние, которое потепление, происходящее у подножья гор, известное как феновый эффект, оказывает на общество и окружающую среду [17]. Местные ветры фены играют важную роль в формировании климата и всех природных процессов, происходящих в горных массивах по всему земному шару. Фен – это комплексное метеорологическое явление, предопределенное взаимодействием общей циркуляции атмосферы и орографии местности. Более сухой и теплый климат отдельных горных районов связан именно с фенами. При действии фена наблюдается своеобразный режим ветра, облачности и осадков [14].

1.1 История исследований фена

Феном называется сильный, сухой и теплый ветер, который образуется на подветренной стороне гор, когда воздушные потоки пересекают горную цепь. Этот ветер характеризуется повышением температуры и понижением влажности [8].

Данное определение лишь пытается описать сложное и разнообразное метеорологическое явление [32]. На протяжении многих десятилетий фен был выдающимся примером для объяснения термодинамических процессов и роли скрытого тепла [17]. В общем, это определение верное, но оно не раскрывает основное качество фена – данный ветер проявляет себя по-разному даже в одной горной системе, не говоря даже про все остальные случаи в мире.

Ветер с описанными свойствами наблюдаются практически во всех горных районах земного шара, он может возникать даже в случаях, когда относительной превышение может составлять лишь несколько сот метров [8]. Во многих районах он имеет свои собственные названия, например: Ливас в Динарском

нагорье, Чинук – Скалистые горы, Зонда – Анды, Санта Ана – Кордильеры и так далее. Но чаще всего в литературе используют слово «фен», так как наиболее изучены эти ветры в Альпах, где «феном» принято было называть южные теплые и сухие горные ветры, которые вызывали оттепель на северных склонах. Поскольку позже этот термин был заимствован и для случаев в других горных системах, в Альпийском регионе ветер стали определять как «Альпийский фен». Само слово «фен», скорее всего готского происхождения (fon – огонь) [1].

Фен начал интересовать метеорологов по всему миру с давних времен. Его изучают уже более 150 лет. Первый прорыв в изучении явления произошел в 1866 году, когда австрийский метеоролог Юлиус Ганн смог доказать, что на повышение температуры во время фена влияют термодинамические эффекты [24], но он не исследовал динамику, то есть причины и условия, при которых осуществляется переваливание воздуха через препятствие [32]. До этого многие авторы считали, что причиной образования фенов в Альпах служит приток воздуха из Сахары, фены Западного Закавказья приписывались ветрам из пустынь Средней Азии, американский чинук объяснялся влиянием теплого течения Куроисио, а аргентинская зонда – деятельностью вулканов [1].

Позднее было выдвинуто большое количество гипотез о происхождении нисходящего потока. Но несмотря на многие десятилетия исследований, некоторые вопросы до сих пор остаются без ответа. Прежде всего, остается проблемой точный прогноз прорыва фена во многих долинах Альп. Еще в начале 1980-х годов в Швейцарском метеорологическом институте все еще преобладало мнение, что фен непредсказуем [32].

В настоящее время исследования значительно продвинулись. Современные способы изучения явления включают анализ спутниковых данных, использование данных, полученных с радиозондов и самые популярные исследования на данный момент производят при помощи компьютерного моделирования. Все исследования нацелены на изучение влияния фенового ветра на погоду и климат в отдельных горных районах. Также оценивается влияние фена на сельское хозяйство, опасные лавинные ситуации и

распространение лесных пожаров под действием данного ветра. Специалисты по биометеорологии изучают связь явления и ухудшения состояния здоровья человека.

На сегодняшний день такое метеорологическое явление как ветер фен остается одним из самых интересных и сложных в метеорологии.

1.2 Классификация фенов

В общем, фены можно классифицировать по многим различным критериям, таких как: географическое положение – Альпийский фен (Альпийский регион), чинук (Скалистые горы, Северная Америка) и Санта-Ана (Южная Калифорния); температурные характеристики – теплый фен (характеризуется повышением температуры на подветренной стороне горного хребта) и холодный фен (менее распространен, довольно редкий, он возникает когда холодный воздух опускается в долину, вытесняя при этом более сухой воздух); последствия – сухой фен (приводит к значительному понижению влажности, может вызвать пожары, сход лавин и нанести ущерб сельскому хозяйству), влажный фен (встречается редко, приводит к образованию облачности и выпадению осадков на подветренной стороне горного хребта), время года – зимний фен (приводит к аномально теплой погоде зимой и быстрому снеготаянию), летний фен (связан с засухами).

В настоящее время, классификация основывается на физических характеристиках фенов и механизмах их формирования [28]:

- Механические фены – возникают вследствие механического движения воздуха через препятствие без значительного изменения температуры. Могут возникать, когда воздушные массы вынуждены обтекать горный хребет;

- Орографические фены – возникают, когда влажные воздушные массы поднимаются по наветренной стороне горы, охлаждаются, может происходить

выпадение осадков. После пересечения хребта воздух опускаясь нагревается и высушивается;

- Термодинамические фены – возникают из-за адиабатического нагрева спускающегося воздуха. При спуске воздух сжимается и нагревается, что приводит к повышению температуры и понижению относительной влажности;

- Гибридные фены – возникают в сложных топографических условиях, при которых воздушные массы испытывают как механическое воздействие, так и адиабатический нагрев.

- Сезонные фены – классифицируются по наиболее частому возникновению в определенный сезон года;

- Фены по направлению ветра – могут возникать в одной горной системе и иметь разные характеристики.

Также существует классификация фенов по спутниковым снимкам. Она может использоваться для анализа и выявления событий с феном [8]:

- Свободный двусторонний фен – возникает вследствие общего опускания воздуха в антициклоне при отсутствии хорошо выраженного воздушного потока, нормального к горному хребту, по обе стороны которого проявляется нисходящее движение воздуха.

- Односторонний свободный фен – возникает при условии существования на наветренной стороне «мертвого» воздуха (слой холодного воздуха с инверсией ниже горного хребта), выше которой расположен однородный воздушный поток, скользящий над горным хребтом и затем опускающийся с подветренной стороны. При отсутствии хорошо выраженного воздушного потока фен может возникнуть за счет опускания воздуха с одной стороны горного хребта.

- Фен пограничного слоя (возможен только с одной стороны гор)– над горным хребтом располагается инверсия или изотермия, ограничивающая сверху слой холодного воздуха как с наветренной, так и с подветренной стороны. В начальной стадии инверсия может находиться лишь с наветренной стороны и располагаться ниже гребня хребта. По мере накопления холодного воздуха перед

препятствием граница инверсии поднимается над горами, и начинается перетекание воздуха через хребет. Вследствие ограничивающего действия инверсии часто возникает «критический потолок» с очень большими скоростями ветра. Этот тип фена встречается чаще над невысокими горами.

- Тропосферный фен – происходит влажноадиабатический подъем воздуха на наветренной стороне, который сопровождается образованием облачности и осадков, и сухоадиабатическом опусканием с подветренной стороны, которое сопровождается высушиванием воздуха и усилением ветра («феновая буря»).

Классификация фенов по спутниковым изображениям не очень распространена, но она может быть полезной при анализе явления в сочетании с множеством других метеорологических данных, для того чтобы получить более полную картину воздействия феновых ветров на погоду.

1.3 Динамика фенов

Процессы возникновения и развития фенов в различных физико-географических районах, несмотря на их несомненную индивидуальность, имеют некоторые общие черты.

Весьма важным является вопрос о причинах опускания воздуха при фенах. Почему воздух опускается, а не просто остается на той же высоте? Этот вопрос более оправдан тем, что потенциальная температура воздуха в большинстве случаев выше, то есть имеется устойчивая стратификация. Кажется, что не существует общепринятой теории. Но вот несколько теорий об опускании воздуха при фене с подветренной стороны (по Штайнакеру, 2006):

- 1) Теория вертикального стремления Штрайффа-Беккера;
- 2) Теория горизонтального стремления Вон Фикера и Биллвиллера;
- 3) Вынужденное движение вниз по склону, вызванное подветренными волнами Лира и Кени;
- 4) Теория «водопада» Россмана;
- 5) Теория соленоида Фрейя;

б) Теория гидравлического прыжка Швейцера [32].

Очень часто фен может создавать волны. Волновые движения в атмосфере возникают при натекании достаточно сильного и мощного потока на препятствие. При определенных условиях (не слишком большая скорость ветра и устойчивая стратификация) за препятствием образуется волна. Горные волны создают системы восходящих и нисходящих токов. [20]

Существует два типа связанных с явлением волн: подветренные и гравитационные.

Подветренные волны или просто горные волны – это атмосферные стационарные волны с длиной волны порядка средней ширины горного хребта. Схема образования представлена на рисунке 1.3.1. Из-за адиабатического расширения на гребнях волн могут возникать линзовидные облака (кучевые чечевицеобразные или высококучевые чечевицеобразные облака) (рисунок 1.3.2).

Гравитационные волны создаются сдвигом на границе между потоком фена и холодной воздушной массой, то есть на границе раздела двух воздушных масс. Механизм аналогичен тому, с помощью которого ветер вызывает волны на озере. Волны наблюдаются очень редко, только при наличии сильной дымки или тумана в холодной воздушной массе. Эти волны вызывают небольшие колебания давления (0,1-1 гПа) и в зависимости от вертикального профиля температуры и ветра их период несколько больше периода Брента-Вяйсяля. [24]

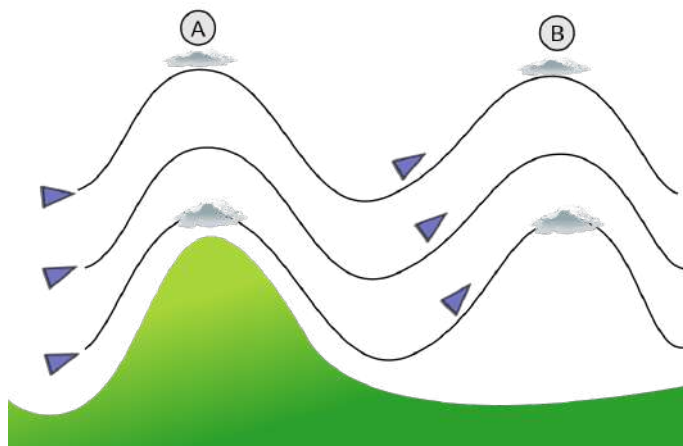


Рисунок 1.3.1 – Ветер движется к горе и происходит первое колебание (А), за которым следуют новые волны. Следующие волны имеют меньшую амплитуду из-за естественного затухания. Чечевицеобразные облака, которые остаются над вершинами потоков (А) и (Б) будут казаться неподвижными несмотря на сильный ветер.



Рисунок 1.3.2 – Фотография лентикулярных облаков над Альпами

1.4 Механизмы образования фена

Предполагается, что существует четыре механизма образования фенов, но эти механизмы сложно отследить. Они часто действуют вместе, но в зависимости от метеорологических условий, высоты, размера и расположения горного хребта вклад каждого механизма может отличаться [35]. Четыре механизма, которые могут создавать феновый ветер представлены на рисунке 1.4.

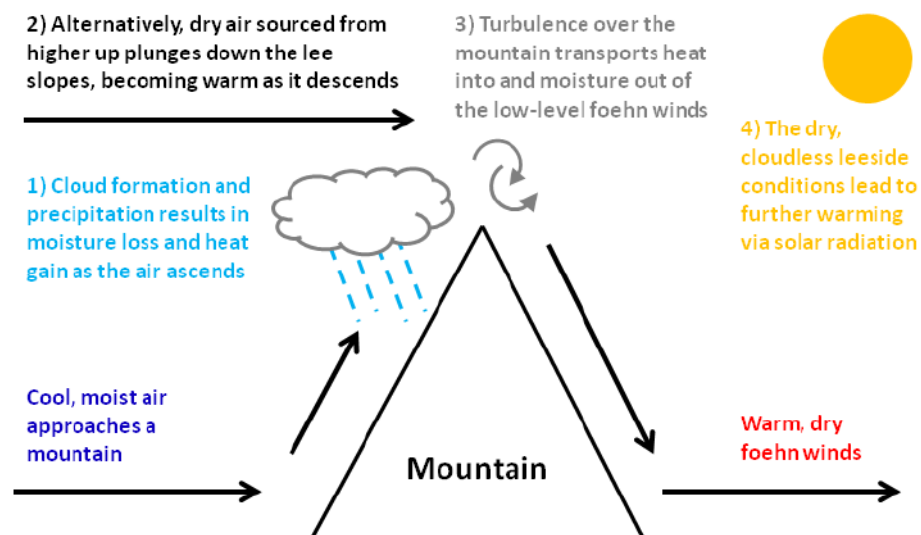


Рисунок 1.4 – Четыре механизма, которые вызывают фен

1.4.1 Конденсация и осадки

Это самое популярное объяснение возникновения фена, оно было открыто еще в 1835 году Эспи, но заслуга разработки теории принадлежит Ганну (1866). Юлиус Ганн показал, что влажный воздух вынужденно поднимается по наветренному склону и остывает, из-за охлаждения воздух теряет способность сдерживать влагу, которая конденсируется и выпадает в виде осадков. Поскольку вода меняет свое фазовое состояние при перетекании через хребет во время процесса выделяется скрытое тепло. Прирост тепла необратим из-за осадков, что приводит к созданию теплых и сухих условий с подветренной стороны при опускании воздушной массы. Однако, существуют и явления фена, при которых нет осадков, а это означает, что существуют и другие механизмы.

1.4.2 Опускание воздуха

Сухой воздух также может поступать из более высоких, потенциально более теплых и сухих высот. Это происходит в том случае, когда холодный и влажный воздух с нижних уровней перекрывается горным барьером (это может происходить, когда ветры недостаточно сильные). В этом случае более сухой

воздух опускается по склону горы вниз. Это называется изентропической просадкой. Опускающийся воздух становится более теплым и сухим после сжатия из-за увеличения давления на более низких высотах [9].

1.4.3 Турбулентное перемешивание

Когда воздух проходит через линию гор возникает турбулентность, из-за которой происходит перемешивание воздуха по вертикали. Перемешивание вызывает нагрев и осушение воздушного потока на низком уровне.

До сих пор этот механизм не вызывает особого интереса в связи с проблемой понимания фенового потепления воздуха.

1.4.4 Радиационное нагревание

Последний механизм обусловлен дождевыми теньями, которые наблюдаются в условиях действия фена. Дождевые тени возникают с подветренной стороны и приносят ясную и солнечную погоду. Это приводит к радиационному потеплению, поскольку нет облаков, блокирующих солнечный свет.

Учет всех четырех механизмов все также не позволяет прийти к общей теории фена и она до сих пор остается неустановленной.

1.5 Влияние фенов на режим тепла, влаги и облачности

Само определение фенов как теплых и сухих ветров уже говорит о режиме погоды, который устанавливается во время его действия. Во многих горных районах Земли зарегистрированы случаи очень резкого понижения влажности и повышения температуры [1].

Например, 28 февраля 1916 года недалеко от Батуми приход фена вечеров вызвал повышение температуры по сравнению с дневным сроком на 14,4°C и

понижением относительной влажности на 79%. Фен, дувший вечером 21 мая 1914 года в Астаре, достиг скорости 40 м/с, повысил температуру на 9,8 °С и понизил относительную влажность на 68% в Кутаиси 13-16 декабря 1954 года, когда восточный ветер достигал 34-38 м/с, температура повысилась до 17,5 °С, а относительная влажность опустилась до 8%. В Ломе, Монтана, 15 января 1977 года был установлен рекорд по изменению температуры за 24 часа. Температура воздуха поднялась на 57 градусов – с -48 °С до 9 °С.

Интересно, что 24 марта 2015 года, когда был установлен рекорд температуры для «антарктического континента», который составлял 17,5 °С было доказано воздействие фена Антарктическом полуострове [19].

При оценке температурного эффекта феновых ветров следует учитывать, что он определяется общеклиматическим фоном и по-разному проявляется в зависимости от широты и сезона, а также высоты гор. Эта особенность приводит к спору о «космополитизме» фенов. Идея «космополитизма» фенов была выдвинута еще Венгером, который утверждал, что фены могут быть всюду, где есть горы и есть переваливание воздуха через них [1]. Действительно, нет теоретических оснований отрицать возможность образования фенов в любом районе земного шара. Однако проявляется этот ветер везде по-разному. В полярных территориях, таких как Новая Земля, Гренландия, Исландия, отмечаются максимальные температурные эффекты, при которых температура может изменяться на 20-30°С в час [34].

В умеренных же широтах наибольшие температурные эффекты проявляются зимой и наименьшие – летом. В теплых районах и в теплые сезоны фены иногда сопровождаются даже понижением температуры. К понижению температуры воздуха может привести опускание неустойчивого стратифицированного воздуха. Существенную роль в образовании такого эффекта может сыграть большое оледенение на высоте снеговой линии и выше, при котором нижние слои переваливающего воздуха могут сильно охладиться. При этом фен будет проявляться только в резком падении влажности [25].

Приход фена на метеорологические станции с подветренной стороны препятствий сопровождается, как правило, размыванием облачности и установлением ясной погоды. Некоторые исследователи отмечают также исключительную прозрачность воздуха. В ряде случаев горы во время фенов приобретают голубую, синюю и даже фиолетовую окраску, что указывает на сдвиг максимума рассеянной радиации в сторону коротких волн. Такой характер рассеяния света свидетельствует о большой чистоте и сухости воздуха на подветренной стороне [1].

Действие фенового ветра часто сопровождается отдельными облаками или облачными системами, которые образуются в результате взаимодействия воздушных потоков с горным хребтом.

В зависимости от облакообразующих процессов можно выделить два типа облачности, наблюдаемой при фенах. К первому типу относится облачная стена или облачный вал. Этот тип облачности связан с переваливанием части облаков с наветренной стороны горного хребта на подветренную. Ко второму типу относятся чечевицеобразные облака, которые часто наблюдаются при фене, но связаны они с волновыми процессами [15].

Описанное влияние фенов на режим температуры, влажности и облачности может иметь как положительные, так и отрицательные последствия для местного климата, сельского хозяйства и самочувствия людей.

1.6 Прогноз фенов

Своеобразие погоды при фенах требует учета их влияния на режим погоды в горных регионах. [14] Прогнозирование фенов опирается на три столпа: 1) вероятностные методы, основанные на нескольких наблюдаемых или прогнозируемых параметрах, 2) на результатах модели и 3) на навыках опытных прогнозистов. [34]

1.6.1 Вероятностные методы

Прогнозирование фена означает предсказание мезомасштабного явления на основе синоптической ситуации. Такие прогнозы основаны, прежде всего, на поле давления.

В Швейцарии Видмер еще в 1966 году разработал «тест Фена», который был усовершенствован и упрощен Курвуалье и Гутерманном (1971). До сих пор синоптики используют этот тест для прогноза. Для расчета индекса используются различия геопотенциала на высотах 850 и 500 гПа. Результатом расчета является безразмерная величина – индекс. Чем мощнее фен, тем выше этот показатель [22]. На рисунке 1.6.1 дан пример индекса Видмера и его потенциала для прогнозирования случая фена в октябре 2022 года. Здесь использованы данные прогноза ECMWF на 10 дней.

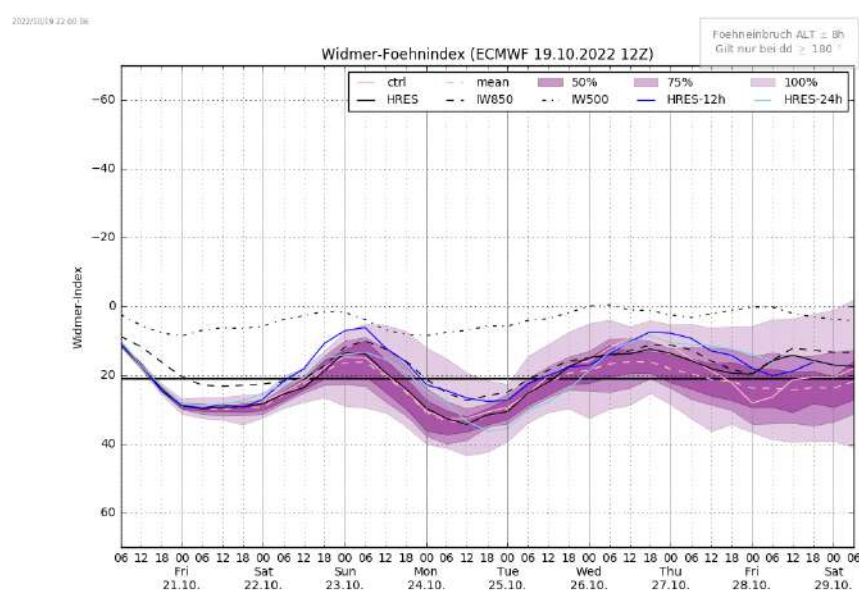


Рисунок 1.6.1 – Индекс Видмера, используемый в настоящее время в оперативной эксплуатации. Показаны среднее значение по ансамблю, квантили 50%, 75% и 100%, контрольный прогон (ctrl), а также текущий детерминированный прогон (HRES) и детерминированный прогон 12 и 24 часа назад (HRES-12, HRES-24 часа). Кроме того, вводятся индексы 850 гПа (IW850) и 500 гПа (IW500).

Индекс Видмера падает ниже предела фена в четверг в 15 часов, это означает, что фен начинается в Альтдорфе за 8 часов до или после. Индекс служит методом оценки и его нужно использовать с осторожностью.

Дрексель и Майр в 2008 году разработали объективный вероятностный метод прогнозирования фена в долине Випп (Инсбрук) на основе результатов модели ECMWF. В качестве предикторов они используют межбарьерные перепады давления и изоэнтропический спуск. [34]

1.6.2 Модельные прогнозы

Для прогноза фенового ветра используются различные глобальные и региональные численные модели. К используемым глобальным моделям относятся – модель GFS (Global Forecast System) и модель ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

К используемым региональным моделям относятся – модель WRF (Weather Research and Forecasting Model), которая может быть настроена для конкретных регионов и включает сложную топографию; модель COSMO (Consortium for Small-Scale Modeling), которая используется в Европе и особенно популярна среди метеорологических служб в Альпийском регионе. Она обладает высоким разрешением и способностью моделировать динамику воздуха в горных районах. В MeteoSwiss, например, с февраля 2008 года используется модель COSMO-2 с размером сетки 2,2 км; модель AROME (Application of Research to Operations at Mesoscale), разработанная Meteo-France, используется для краткосрочных прогнозов в Европе, включая Альпы. Обеспечивает высокую точность прогноза благодаря небольшому разрешению.

Также разрабатываются специализированные модели для прогноза фенового ветра, которые учитывают специфические характеристики региона. Эти модели могут быть основаны на более общих моделях, таких как WRF или COSMO, имеющие дополнительные настройки для феновых условий [35].

1.6.3 Открытые проблемы прогнозирования

На практике навыки опытных прогнозистов, которые знакомы с местными режимами погоды, по-прежнему являются незаменимым условием успешного прогноза. Опытный синоптик может точно предсказать насколько то или иное направление ветра может повлиять на появление или прекращение фена в определенной долине и как верно интерпретировать все полученные данные, чтобы прийти к правильному прогнозу. Но, с другой стороны, любой дополнительный инструмент может дать опору в виде первого приближения, которое в последствии складывается вместе с опытом и навыками [34].

Синоптик может использовать в настоящее время для успешного прогноза большое количество данных, таких как: синоптический анализ, данные радиозондирования, спутниковые данные, мезомасштабные модели, численные модели прогноза погоды (NWP), статистические модели, ансамблевые прогнозы и исследовательские модели конкретных регионов.

Фен является действительно сложной задачей для прогнозистов. Он может возникать внезапно и иметь значительные расхождения в данных по скорости и ветру между долинами и небольшими участками горной местности. Стандартные метеостанции и оборудования могут быть размещены на большом расстоянии, что затрудняет получение точных данных о погоде в масштабе, необходимом для горного региона. Высота также сильно влияет на температуру и влажность воздуха, что требует серьезной корректировки прогностических моделей.

Усовершенствованные модели, данные радиозондирования и спутниковые данные могут упростить сложную задачу прогнозирования феновых ветров.

1.7 Климатология фена

Климатология фена охватывает изучение его частоты, интенсивности, сезонности и влияние на климат и погоду в различных регионах мира [20].

Феновые ветры могут существенно влиять на местный климат, создавая условия для резкого повышения температуры и снижения влажности. Это может приводить к аномально теплым и сухим условиям в холодные сезоны.

Роль фенов в формировании климата горных регионов должна быть оценена, как очень большая. В первую очередь следует оценить отопляющую роль фенов. Только они могут обеспечить такую мягкость зимы, достаточно частые оттепели, сокращенную продолжительность устойчивых морозов. В районах действия фенового ветра значительно увеличена продолжительность безморозного периода. С фенами связаны экстремально высокие значения температур воздуха.

Большое влияние фены оказывают и на ветровой режим. С фенами связаны, как правило, повышенные скорости ветра. В зимний период с ними связаны явления переноса снега поземком, а летом в засушливых районах возникают пыльные бури. В целом влияние фенов на климат в горных регионах в наиболее обжитых районах с развитым земледелием и животноводством можно считать благоприятным, лишь только в отдельные очень засушливые годы влияние фенового ветра может усугубить недостаток влаги и привести к неблагоприятным последствиям. [14]

Было установлено, что фены возникают в определенные сезоны года в зависимости от географического положения региона.

Статистический анализ показывает, что распространенность фена сильно варьируется за последние 140 лет не просматривается никакой тенденции (рисунок 1.7.1).

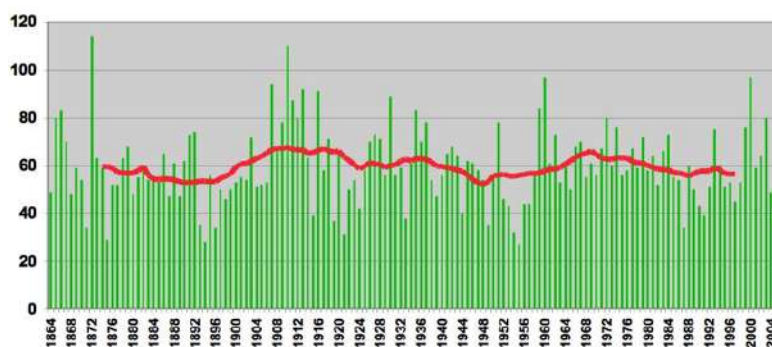


Рисунок 1.7.1 – Межгодовые изменения встречаемости фена на станции Альтдорф (Альпы). Красная линия представляет собой скользящее среднее значение за 20 лет.

1.8 Географическое распределение фенов по всему земному шару

1.8.1 Фены в Европе

Основные горные хребты Европы, ориентированные почти в широтном направлении (Пиренеи, Альпы, Динарское нагорье, Стара-Планина, Карпаты), являются хорошей преградой для перемещения воздушных масс и поэтому способствуют образованию феновых ветров на подветренных склонах.

Наиболее изученными в Европе являются альпийские фены. В Альпах они наблюдаются не только на северных склонах (в Швейцарии и Австрии) в случае Южного фена, но и на южных (в Италии) в случае Северного фена. При переваливании воздушных масс через Французские Альпы фены образуются как на восточных, так и на западных склонах, но их скорость и повторяемость во Франции значительно меньше, чем в Швейцарии и Австрии.

Фены в Итальянских Альпах наиболее часто наблюдаются в долине реки Адда – крупнейшей котловине широтного направления в горной системе Альп.

Одним из наиболее «феновых» мест в Альпах является Инсбрук. По статистике здесь наблюдается в среднем 75 дней в году, а колебания в отдельные годы составляет от 104 до 48 дней.

На юге Европы фены наблюдаются не только на склоне Альп, Динарское нагорье и Стара-Планина также способствуют образованию феновых ветров, которые в некоторых случаях могут достигать большой силы. На территории Болгарии феновые ветры эти ветры давно известны под названиями долняк, южняк и снегояд.

Наблюдаются фены и в Польше, где носят название хальных ветров. Основные районы их действия – Карпаты, Татры, Корконоше и Свентокшские горы.

Фены в Карпатах – довольно частое явление, зимой эти ветры наблюдаются одновременно и на южных, и на северных склонах. Тем не менее на южных склонах фены отмечаются чаще. Вследствие небольшой высоты горных перевалов отличительной особенностью фенов Карпат является наличие облачности на подветренных склонах. Наибольшая повторяемость феновых ветров отмечается с ноября по апрель.

На северных склонах Пиренейских гор и на северо-западных склонах гор южной части Французского массива и Корбьер часто наблюдаются фены, которые носят местные названия «Ветер Испании», «трамонта» и «отан».

На Средиземноморском побережье Европы часто наблюдается сухой и горячий ветер, который носит название «сирокко». Атласские горы способствуют образованию фенов, вызывающих повышение температуры воздушных масс до 50° и резкое уменьшение влажности. Сирокко может принести в сторону северного побережья Средиземноморского моря 1–2 млн. т пыли в год.

В Исландии фены отмечаются и в центральной, и в ледниковой части. Феновые ветры встречаются и в Скандинавии, они не часты, но в Норвегии в среднем могут наблюдаться 10–20 дней в году в зависимости от региона. В Швеции ветры менее распространены, но все же могут возникать.

1.8.2 Фены в Северной и Южной Америке

Фены в Северной Америке являются наиболее изученными в мире на данный момент. Они наблюдаются в основном в умеренной зоне. Наибольшая повторяемость была отмечена в районе равнин и плато, расположенных между Скалистыми и Каскадными горами, которые достаточно высоки, чтобы служить преградой для вторжения воздушных масс, приходящих с Тихого океана или континента. В связи с этим основная масса поступающей влаги конденсируется на наветренных склонах, на подветренный воздух приходит сухим и теплым.

В Северной Америке фены известны с давних времен и уже в ранних климатических описаниях были даны сведения о их повторяемости в отдельных районах [21]. Местное название ветра – чинук, по своему происхождению и характеру он соответствует альпийскому фену. Чинук является важным климатообразующим фактором, так как в зимние месяцы он вызывает резкие колебания температуры, а летом усиливает засушливость.

В пассатной зоне Северной Америки фены наблюдаются на западном побережье Мексиканского залива и восточном – Калифорнийского залива.

Феновые ветры возникают также в нескольких регионах Южной Америки и имеют местное название. Ветер «зонда» в Аргентине влияет на западные районы страны, особенно в провинции Мендоса. Ветер приносит очень сухую и теплую погоду на восточную сторону Анд.

1.8.3 Фены в Гренландии

Фены наблюдаются и в Гренландии, вызывая там резкие повышения температуры как в зимнее, так и в летнее время, они носят порывистый характер. Форма поверхности Гренландии создает благоприятные условия для возникновения фенов. Они образуются, когда ветер либо проходит над материковым ледником, либо поднимается по склонам прибрежных гор в одном месте, а опускаются в другом.

Сильные фены отмечаются обычно лишь на сравнительно коротком отрезке берега, однако возникновение их связано с циркуляционными процессами большого масштаба. Часто океанический воздух, прежде чем опуститься в виде фена, проходит над ледником 500–800 км от одного берега Гренландии до другого. Относительная влажность при феновых ветрах падает ниже 50%, а иногда и ниже 20%.

1.8.4 Фены в Азии

Азия, самая большая по площади часть света, со значительным преобладанием гористых и возвышенных районов, с горными хребтами, расположенными на пути основных воздушных течений, отличается большим разнообразием местных форм атмосферной циркуляции.

На крайнем западе Азии на северном берегу Мертвого моря при западных потоках фены отмечаются очень часто [27]. Горы высотой до 1000 м, протянувшиеся с севера на юг между узкой полосой Средиземноморского побережья и долиной реки Иордан, препятствует западному переносу. С установлением ветра западного направления в долине Иордана устанавливается феновая погода.

В весенний сезон на побережье в районе Искандеруна (Турция) дует с гор восточный ветер, который представляет собой фен. Местные мореплаватели называют его «рагут».

Летом в центральных районах Сирии и Ирака дуют северо-восточные ветры, стекающие с горных цепей Тавра. Ветры представляют собой фены – они сухие, но холодные. В районе Джазира их называют «сафха», а на юге – «тамаль».

В Грузии наблюдается большое число фенов на Колхидской низменности. Низменность представляет собой своеобразный амфитеатр, который определен полукольцом гор Большого и Малого Кавказа, соединенным Сурамским перевалом. Разница давлений над Черным морем и Кавказом, особенно

устойчивая зимой, способствует протеканию воздуха через перевал. Поток воздуха при фене неравномерный и приобретает иногда характер порывистого и даже шквалистого ветра. Фен обычно непродолжительный – от 2 до 10 часов и только изредка 3–5 суток.

Феновые ветры проявляются и вдорь реки Куры, на Ширакской котловине и на склонах Памбакской котловины.

Относительно высокие температуры зимних месяцев на юго-восточных склонах Большого Кавказа объясняются влиянием фенов. Территория Азербайджана особенно выделяется благоприятными климатическими условиями благодаря тихой и ясной погоды.

В Танжикистане фены характеризуются небольшими скоростями, а фены Тукменистана, наоборот, отличаются большими скоростями ветра.

В Кыргызстане зимой и ранней весной через седловины Киргизского хребта и Кочкорскую впадину проходят воздушные массы, вызывающие сильные феновые ветры, их сила обусловлена наличием горных проходов между возвышенностями.

Фены наблюдаются также во многих районах Центральной Азии. Например, в Ховре, который находится в западной части Монголии у подножия Монгольского Алтая. Весной в Урумчи, находящемся на северных склонах Тянь-Шаньских гор, среднесуточная относительная влажность ниже 35% из-за влияния фенового ветра. Южнее Тянь-Шаньских гор на Таримской впадине, окруженной высокими хребтами, западные ветры являются нисходящими и вызывают феновые явления, которые проявляются в повышении зимней температуры и малом количестве осадков. В Цайдаме также наблюдаются феновые ветры, там дневная температура воздуха может составлять 15°C, а ночью опускаться до -30 °C.

Фены особенно хорошо выражены в долинах Памира и Тянь-Шаня.

Зимой феновые ветры появляются и на Великой Китайской Равнине, которая расположена на 1000 м ниже Монгольского плато. Среднесуточная влажность в Пекине ниже 50% за счет фена. Часто наблюдаются фены в среднем

и верхнем течении р. Янцзы. При переваливании юго-восточного муссона через Юньнань-Гуйчжоуское нагорье феновые явления отмечаются в котловинах озер Дунтинху и Поянху.

Хребет Циньлин – важный климатический раздел для районов, лежащих севернее и южнее хребта. Его северные склоны являются подветренными по отношению к юго-западным ветрам, действующим в теплое время года, в холодное время года склон становится наветренным. Это влияет на режим погоды в Сиане и Наньчжэне зимой.

На полуострове Корея восточное побережье теплее западного из-за влияния фенов. При западных потоках воздушные массы переваливают через Восточно-Корейские горы и приходят на побережье динамически нагретыми и высушенными.

В южной части Азии фены известны в Индии и Мьянме. В Бихаре и Юттар-Прадеше перед началом муссона с Гималайских долин дуют нисходящие ветры, носящие местное название «лу». Температура воздуха в Дели достигает 45-47°C.

На Коромандельском берегу Бенгальского залива в начале действия муссона также наблюдаются фены. В Ченнае при фене температура повышается до 33–35°C, чего не бывает при отсутствии фена. На территории Мьянмы юго-западный муссон, переваливая через Ракхайн, опускается по восточным склонам, динамически нагревается и высушивается. В долине реки Иравади, находящиеся к востоку от хребта, фены хорошо выражены во все времена года, особенно в период муссона.

В горных районах островов, окружающих Азию, также наблюдаются фены. На восточных побережьях Шри-Ланки дует сухой горячий ветер, который носит название «каччан». Каччан дует с мая по август. В Баттикалоа температура воздуха при каччане повышается до 40°C, а относительная влажность сильно понижается.

При прохождении циклонов западнее Японских островов фены наблюдаются на западном побережье Японии. Наиболее часто фены отмечаются к северу от залива Вакаса, там, где горы выше. На побережье залива Тояма и в

долине реки Синано фены отмечаются летом, когда этот район оказывается подветренным по отношению к юго-восточному муссону. При смещении тайфунов на северо-восток от острова Сикоку в северо-восточной части префектуры Окаяма в сентябре-октябре дует северо-восточный ветер, который местные жители называют «хирото». Когда над островом Хонсю располагается антициклон, а над Японским морем – поле пониженного давления и барический градиент направлен с юго-востока на северо-запад, в районе Нагано наблюдается феновый ветер, приводящий к резкому повышению температуры.

На восточном берегу острова Суматра дует фен, называемый местными «борок». Влажность при действии ветра сильно понижается, как и температура, потому что воздух, спускающийся с гор, оказывается холоднее вытесненного им. Фены наблюдаются на всех восточных склонах гор, что приводит к большой сухости климата этих районов.

На юго-западе острова Сулавеси при смещении к северу внутритропической зоны конвергенции с гор дует феновый ветер, носящий название «брубу».

1.8.5 Фены в Австралии

Феновые ветры возникают на юго-востоке Австралии, их действие явно проявляется в штатах Виктория и Тасмания. Здесь же можно упомянуть фены, возникающие в Новой Зеландии, где на Кентерберийской равнине часто дуют северо-западные ветры, несущие тучи пыли и иссушающие воздух. Они наблюдаются довольно часто и представляют собой воздушные потоки, нисходящие с Новозеландский Альп, их местное название – «норвестер».

1.8.6 Фены в Африке

На северном побережье Африки фены носят название «сирокко». В летнее время, когда север Африканского континента теплее моря и азорский

антициклон оттесняется к океану, возникающие при этом контрасты температур и давления порождают различные ветры в долинах и на склонах гор. При северо-западных и западных ветрах северные склоны гор получают большое количество осадков, а на южных (подветренных) склонах дуют сухие ветры, называемые «джебили». При южных потоках воздушные массы пустынного происхождения переваливают через горы и феновые ветры здесь наблюдаются до самого побережья – «гибли» (Ливия), «чыли» (Тунис), «гобар» (Эфиопия), «самум» (Египет) и многие другие.

В Марокко дует фен, называемый «шерги», в Мекнесе и Касба-Тадла температура воздуха при фене может резко повышаться до 48°C.

На побережье Гвинейского залива с ноября по март дует «харматтан», который представляет собой северо-восточный пассат. Харматтан несет из Сахары горячий сухой воздух вместе с пылью. Его сухость усиливается феновым эффектом при опускании воздуха по склонам гор к побережью.

В Южной Африке в зимнее время, когда над материком устанавливается высокое давление, а у берегов проходит ложбина или циклон, воздушные потоки спускаются с Капских гор на побережье и динамически нагреваясь, приносят потепление и сухость. [1]

1.8.7 Фены в Антарктиде

В Антарктиде хорошо известны стоковые ветры. Некоторые исследователи предполагают, что такие ветры имеют феновый характер. Они сухие, но холодные, так как начальная температура нисходящего потока очень низка. Погода при стоковых ветрах обычно ясная, иногда наблюдается небольшая облачность, отмечаются также резкие колебания температуры. Ветры дуют на побережье почти постоянно, наибольшая повторяемость наблюдается весной [36].

Рекордная температура 24 марта 2015 года, составляющая 17,5°C, на станции Эсперанса (Антарктический полуостров), была зафиксирована

вследствие действия фенового ветра [19] по словам ученых Чилийского университета и университета Вальпараисо. Они изучили это событие, используя данные наземных станций, спутниковые снимки, данные реанализа и численное моделирование. Исследуя архив изображений шельфового ледника Антарктики, полученный спектрометриком среднего разрешения, они выявили четкие доказательства распада и перемещения морского льда, а также образование областей, заполненных водой на поверхности ледника у подножия горного хребта. Результаты моделирования с использованием региональной климатической модели показали, что таяния льдов, можно объяснить эффектом фенового ветра, а не крупномасштабной адвекцией воздуха из средних широт.

1.9 Географическое распределение фенов на территории России

В литературе чаще всего появляются описания фенов в горных районах Кавказа, Алтая, Крыма, и в Саянах, а также фены наблюдаются и на Телецком озере [7].

Феновые ветры наблюдаются на Северном Кавказе. Наблюдаемые в районе ледников Алибек и Башкара фены, приводят к увеличению поверхности абляции ледников.

На климат Южного берега Крыма существенное влияние оказывают Крымские горы, имеющие почти широтную направленность при относительно небольшой высоте (1180 м). Благодаря этому горному барьеру различия в температуре воздуха Южного и Северного Крыма достигает иногда 20°C. Фен возникает как на южных, так и на северных склонах.

Характерной особенностью горного Алтая являются фены, некоторые районы Алтая по повторяемости явления не уступают Кавказу [14]. Часто феновые ветры возникают в низовьях реки Чулышман и на Телецком озере, а также в степных межгорных котловинах.

Хребты Алтая и Западного Саяна создают дождевую тень на большей части территории Тувинской и Минусинской котловин. При фенах в районе

Красноярска, в Предбайкалье и Минусинской котловине в октябре максимальные температуры достигают 25°C, весной температуры могут достигать 35°C.

На климат Восточной Сибири, особенно крайних северо-восточных районов (долина реки Колымы), оказывают большое влияние орографические фены.

Фен может встречаться также на западных склонах Уральских гор, но не часто и исследований, посвященных этому недостаточно. Наиболее выражены они могут быть в районе Пермского края и Свердловской области. Иногда фены на Урале называют «сгонными ветрами», так как они «сгоняют» холодный воздух с восточных склонов.

Ветер фен может наблюдаться и на Камчатке. Они характерны для восточного побережья полуострова. Фен дует с возвышенностей в сторону Тихого океана. Ветры часто бывают очень сильные и создают неблагоприятные погодные условия.

1.10 Воздействие фена на общество

1.10.1 Влияние на местный климат

Фен оказывает серьезное воздействие на местный климат, который, в свою очередь, влияет на сельскохозяйственные возможности в долинах, где действует ветер [25]. Феновый ветер может оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие.

Из-за резких перепадов температуры воздуха во время фена могут пострадать растения. Когда быстрое потепление, вызванное феном, приводит к преждевременному росту растений после зимы. Последующее возвращение холодов способно погубить почки и молодые побеги.

Также сухой воздух приносимый феновым ветром приводит к осушению почвы и обезвоживанию растений. Это может быть особенно опасно в период

вегетации, когда очень высока потребность растений во влаге. Сильные фены увеличивают ветровую эрозию почвы, что приводит к потере плодородного слоя. Вероятно также полегание посевов, травмирование растений и осыпание плодов.

Но при этом, фены могут помочь в распространении пыльцы и семян растений, а также предотвратить воздействие низких температур, снижая вероятность заморозков.

Благодаря теплым воздушным массам, приносимыми фенами многие растения можно выращивать там, где иначе это было бы невозможно. В районах с влажным климатом фен часто способствует созреванию пшеницы, кукурузы и винограда, за что в Тироле его называют кукурузным ветром. Чинук, дующий на восточных склонах Скалистых гор, настолько сух и горяч, что под его влиянием снег в горах испаряется, минуя жидкую фазу. Полезную роль играет и чирчикский фен, благодаря которому почва раньше становится пригодной для посева, а озимая пшеница иногда всходит в декабре или в январе. Осенью феновая погода благоприятствует уборке хлопка [1]. Благодаря фенам на восточном побережье Восточно-Корейских гор удлиняется вегетационный период, дальше на севере произрастает бамбук.

Феновые ветры – явление, которое требует внимания со стороны агрономов.

Фены также вызывают снеготаяние и таяние ледников, из-за чего повышается возможность схода лавин. Сход лавин возможен и во время сильных порывов ветра. Горнолыжные курорты могут нести большие экономические потери.

1.10.2 Качество воздуха

Во время действия фена на подветренной стороне гор открываются самые захватывающие виды, так как воздух очень чистый, нет дымки, а объекты, которые находятся далеко, кажутся гораздо ближе. Вершины гор можно увидеть с тех мест, где в обычное время их видно не было.

Однако, отрицательной стороной этих эффектов является увеличение концентрации озона в воздухе. Хотя значения редко достигают тревожного уровня, фен легко утраивает концентрацию озона за счет опускания воздуха с больших высот [30]. Повышение концентрации озона в горных районах может иметь серьезные негативные последствия для уязвимых групп населения [34].

1.10.3 Пожары и дорожно-транспортные происшествия

Однако самой серьезной опасностью было и остается распространение пожаров по причине действия фенов. Теплый и очень сухой воздух в сочетании с высокой скоростью ветра очень эффективно поддерживает и распространяет пожары, что приводит иногда к катастрофическим последствиям.

В некоторых случаях, особенно при сильных феновых ветрах, могут возникать огненные штормы – интенсивные и неконтролируемые пожары, которые создают и поддерживают собственную ветровую систему, что делает их особенно опасными и разрушительными.

Сильные ветры, такие как Санта-Ана в Калифорнии, часто способствуют катастрофическим лесным пожарам в этом регионе. Феновые ветры влияют также на распространение пожаров в Австралии, особенно в юго-восточных регионах.

Самая большая опасность в непредсказуемости режима действия фена, особенно во время пожара, именно поэтому так необходимо улучшать методы прогнозирования этого явления и планировать меры пожарной безопасности.

Феновые ветры могут быть опасными для полетов. Аэропорты в зоне действия фенов выдают необходимые предупреждения для пилотов воздушных судов.

Опасность перелетов во время фена возникает по нескольким причинам [10]: сильная турбулентность, горные волны, сдвиг ветра, порывы ветра, нарушение восприятия высоты из-за оптических эффектов, резкие изменения атмосферного давления, нестабильность условий полета.

Все эти факторы требуют особого внимания при планировании проведения воздушных перелетов в горных районах.

Однако, очень популярны полеты на воздушных шарах, парапланах и т.д. в горной местности. Подготовки, специальные курсы по безопасности и предупреждения помогают уменьшить риск аварии, но не исключают его.

Аварии на канатных дорогах и даже железнодорожные катастрофы могут быть вызваны сильным порывистым феновым ветром. Хотя все системы на канатных дорогах должны предупреждать такие случаи, но ветер слишком непредсказуем. Порывы могут вызвать нестабильность кабин, их раскачивание и опрокидывание. Кабели при экстремальных нагрузках имеют риск повреждения, что может привести к их обрыву. Феновые ветры могут вызвать повреждение линий электропередач, что приводит к отключению электричества и остановки канатных дорог, а также автоматическая система безопасности может не успеть отправить сигнал. Такие ветры неоднократно приводили к остановке и авариям на канатных дорогах в Альпах.

Сильные ветры могут нарушить движение поездов – привести к сдвигу или даже сходу с рельсов. Они способны повредить опоры контактной сети и линии электропередач на путях, а также ветры могут повалить деревья, создавая препятствие для движения.

На озерах феновые штормы затрудняют регулярное движение лодок. В Швейцарии существует «гавань фена», где суда могут скрыться от волн и порывов ветра.

Поэтому следует учитывать погодную обстановку при планировании и эксплуатации этих видов транспорта [22].

1.10.4 Биометеорологические эффекты

До сих пор широко обсуждаются биометеорологические последствия феновых ветров. В альпийском регионе люди чаще всего обвиняют феновый ветер практически во всех недугах, несчастных случаях, преступлениях и в

особенности в головных болях. Сферика, концентрации ионов и колебания давления рассматривались как возможные причины проблем со здоровьем, связанных с феном. Эти причины были опровергнуты, но колебания давления, вызванные гравитационными волнами, все еще остаются возможной связью между феном и человеком.

Статистический анализ колебаний давления и субъективного благополучия показал, что между ними действительно существует статистически значимая корреляция, однако нет никаких доказательств существования причинно-следственного механизма. Прямой анализ частоты головных болей и появления фено не дал никаких результатов.

Но все же предполагают, что фен может вызывать психологический дискомфорт. Он выражается в беспокойстве, чувстве неуверенности и страха, депрессии, падении работоспособности. И нарушение самочувствия происходит не в результате возникновения какого-либо прямого воздействия температуры и влажности воздуха, а в период его «предчувствия» [14].

2. МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ФЕНОВОГО ЭФФЕКТА

Во второй главе будут рассмотрены методы и инструменты, с помощью которых можно выявить влияние фенового ветра на горный регион. Особенное внимание будет уделено феновым ветрам в Альпах, так как в следующей главе будут рассмотрены случаи фенов в Альпийском регионе.

2.1 Спутниковые данные

2.1.1 Структура облачности на спутниковых снимках

Беря во внимание активное исследование облакообразования при помощи спутниковых изображений, стоит отметить облачные особенности на спутниковых снимках, среди них, особые формы предфронтальной облачности и облачности фронта [3].

На космическом снимке в электромагнитном спектре можно отметить все типы фронтов, которые пересекают хребты гор [4]. При пересечении феном гор происходит видоизменение облачности основной части фронта. На спутниковом изображении в инфракрасном диапазоне, а именно канале 10.8 мкм, можно отметить следующие особенности:

1. Более темные области на наветренной стороне являются облаками препятствий.
2. Свободные от облачности зоны образуются в горном массиве, которые характеризуются темно-серыми ячейками или линиями — это линии орографической конвергенции.
3. На изображении может наблюдаться область яркого белого тона, имеющего резкий край вблизи горного массива — подветренная облачность, которые в дальнейшем отделяются от основного массива.

При рассмотрении видимого диапазона ЭМ спектра:

1. На наветренной стороне горного массива фиксируется яркая белая облачность.
2. Свободные от облачности зоны, по аналогии с ИК изображением характерны более светлыми тонами, близкими к белым.
3. Волокнистые облака или вовсе отсутствие облачности характерны для подветренной стороны. Несколько ярусов облачности фронта имеют одинаково гладкую структуру, где подветренная облачность находится выше нижележащих форм облачности.

Переходя к изображениям в канале водяного пара, стоит отметить, что особых отличий по дешифрированию изображения в ИК диапазоне нет, но на снимках в каналах водяного пара можно увидеть области с низким содержанием водяного пара, которые выглядят как темные полосы или пятна на спутниковых снимках, а также существует возможность обнаружить волны на подветренной стороне, которые невидимы в других каналах (рисунок 2.1.1) [1].

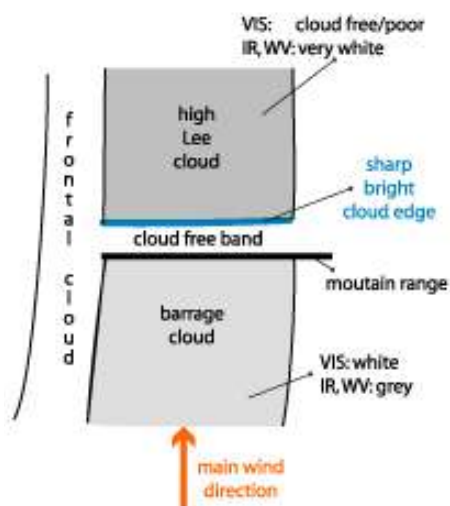


Рисунок 2.1.1 – Структура облачности фена на спутниковых изображениях в соответствии с дешифрированием в видимом и ИК диапазонах ЭМ спектра.

2.1.2 Спутники Aqua и Terra

Для дешифрирования и анализа фенового эффекта необходимо использовать данные мультиспектральной съемки. Мультиспектральные спутниковые данные можно получить при помощи спектрорадиометра MODIS, который установлен на борту двух спутников – Aqua и Terra. Их отличие заключается в орбите, нисходящая и восходящая, соответственно. Совместное использование двух спутниковых продуктов необходимо для обеспечения перекрытия зоны съемки во время отсутствия съемки с одного спутника, таким образом мы «уменьшаем» временное разрешение [12]. Данные можно получить на официальном сайте Laads Web, который предоставляет доступ с предварительной регистрацией. Данные уровня 1В говорят о том, что это первый уровень обработки, следовательно для потребителя такое изображение нужно предварительно подготовить, используя алгоритм предварительной обработки и специализированный софт, такой как ESA SNAP. Данная программа позволяет провести основные манипуляции со спутниковыми изображениями всех уровней обработки. Для начала необходимо выполнить процедуру геометрической коррекции и географической привязки для того, чтобы исключить ошибки при определении линейных размеров облачных объектов и прочих географических объектов на спутниковых изображениях. Пакет программного обеспечения в том числе позволяет провести простой визуальный анализ спутниковых изображений на основе шкалы серых тонов, которая является основной для не обработанного спутникового изображения. Градация серого лежит в диапазоне от 0 до 255, что позволяет максимально подробно, но не перегружая избытком информации, проанализировать данные снимок. Для более детального анализа можно использовать весь пакет каналов, который позволяет получить данный спектрорадиометр, а именно 36 каналов с центральными длинами волн, лежащих в видимом и ИК диапазоне ЭМ спектра, который в том числе включается в себя так называемый канал водяного пара, в дальнейшем его применение позволяет

определить зоны действия фена. Цветосинтезирование выполняется в полуавтоматическом режиме при непосредственной работе оператора.

Для работы будут использоваться изображения с центральными длинами волн 0.6 мкм – видимый диапазон, 10.8 мкм – ИК диапазон, 6.7 мкм – ИК диапазон(канал водяного пара), который позволяет определить влагосодержание в облачности средней и верхней тропосферы и канал 7.3 мкм – ИК диапазон(канал водяного пара), который позволяет определить влагосодержание в облачности более низких слоев тропосферы. Модель цветосинтезирования RGB – форма представления нескольких изображений одновременно с целью выделения особенностей облачности на спутниковом изображении и удобной визуализации для работы. Такие модели могут быть получены путем наложения различных каналов с центральными длинами волн, как в видимой части спектра, так и в ИК диапазоне.

2.2 Данные инструментальных измерений

Данные с наземных станций, которые расположены с обеих сторон горной системы Альп необходимы для анализа наветренной и подветренной стороны Альп, для расчета индекса фена и построения диаграмм, которые были упомянуты ранее. Такие данные находятся в открытом доступе на официальном сайте архива погоды rp5.ru. Данные постоянно обновляются и являются незаменимым инструментом для уточнения ранее проведенного анализа синоптической ситуации, подтверждения данных, которые были получены при помощи спектрорадиометра MODIS, речь о котором шла выше. Пакет данных позволяет получить информацию обо всех метеорологических параметрах необходимых для оценки фенового эффекта, среди них: скорость ветра, направление ветра, порывы ветра, температура, количество облачности в баллах, форма облачности и осадки (количество и фаза). Для примера приведена таблица характерных особенностей метеорологических параметров облачности на наветренной стороне (таблица 2.2.1).

Таблица 2.2.1 – Характерные особенности метеорологических параметров облаков на наветренной стороне

№	Параметр	Характерные особенности
1	Атмосферные осадки	Фронт ведет себя активно, усиление осадков. В случае отдельных облаков заграждения осадки могут быть продолжительными, вероятность их появления высока. Дождь или морось, реже, конвективные ливни (в случае сильного подъема)
2	Температура	Наветренная сторона горного хребта: холодная воздушная масса, стабильная Подветренная сторона горного хребта: теплая сухая воздушная масса
3	Ветер, порывы ветра	В районе нахождения облаков заграждения ослабление ветра, сильные ветры с подветренной стороны
4	Облачность	Облака нижнего яруса, многослойная облачность в районе облаков заграждения, ясно на подветренной стороне
5	Обледенение	Возможно, ввиду большого количества переохлажденной воды

Данные инструментальных измерений также можно использовать для расчета Индекса Фена по формуле:

$$\text{Индекс Фена} = \frac{T_{\text{подветренная}} - T_{\text{наветренная}}}{U_{\text{наветренная}} - U_{\text{подветренная}}} \quad (2.1)$$

Индекс Фена – это метеорологический индекс, который используется для оценки интенсивности фенового эффекта. Существуют градации, которые помогают классифицировать его силу:

- Индекс Фена меньше 0,2 – слабый феновый эффект
- Индекс Фена от 0,2 до 0,5 – умеренный феновый эффект

- Индекс Фена больше 0,5 – сильный феновый эффект

На рисунке 2.2.1 изображен прогноз разницы атмосферного давления в Альпах между Больцано и Инсбруком. Такая разница является предиктором потока, проходящего через Альпы. Если значение отрицательное, это свидетельствует о том, что давление в Больцано ниже, чем в Инсбруке, а в Южном Тироле начинает образовываться северный фен, интенсивность которого увеличивается прямо пропорционально увеличению разницы давления.

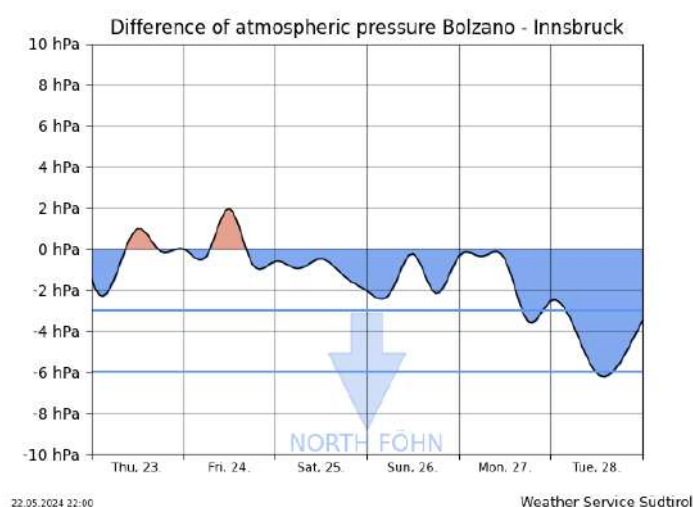


Рисунок 2.2.1 – Диаграмма Фена, используемая для прогноза фенового ветра в Южном Тироле

Эмпирически разница давления в двух точках должна составлять не менее 3 гПа, это характерно при прорыве фенового ветра в долинах Виншгау и Виппताल. И не менее 6 гПа для аналогичного прорыва в южном регионе – Больцано. Если ситуация противоположная, то будет фиксироваться южный фен на севере Альп. В долине Южного Тироля преобладает южный ветер. Диаграмма фена обновляется дважды в 10 и 22 часа.

2.3 Данные реанализа

В данной работе для получения данных приземного давления, карт осадков и данных в слое 500-1000 гПа используется глобальный атмосферный реанализ MERRA-2 (Moder-Era Retrospective analysis for Research and Application, Version

2). Основным преимуществом является временное разрешение – 1 час, пространственное разрешение 0,5x0,625 и сетка кубической сферы, как следствие, расстояние между сетками на всех широтах равномерное. Данные впервые были использованы в 1980 году, ранее использовался набор данных MERRA, который был заменен ввиду достижений в системе ассимиляции большего набора данных.

Кроме этого, используется визуализированная форма представления данных доступная на портале ePort, эта платформа разработана на основе данных модели ECMWF IFS (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Европейского центра среднесрочного прогнозирования погоды с разрешением сетки глобальной модели 0.5x0.5, включая вертикальные разрезы и данные модельного зондирования, а также пакета данных геостационарных спутников (GOES, MSG, Himawari). В настоящее время доступны две версии ePort: ePort PRO и ePort Javascript. В работе будут использованы данные с портала ePort PRO <http://212.232.25.232/ng-maps/>.

2.4 Данные радиозондирования

Облачность препятствий – концептуальная модель с учетом влияния орOGRAPHии. При наличии поле потока, ортогональное горному хребту, при упирании в барьер поток будет подниматься или обходить его, в зависимости от высоты и протяженности горной системы. Такой подъем приведет к адиабатическому охлаждению, а в случае достаточной влажности и к конденсации. В связи с этим можно сделать вывод о высокой вероятности осадков на наветренной стороне горной системы. Кроме этого, нужно отметить эффект фена, при котором, после прохождения воздушные массы опускается и как в следствие происходит нагревание воздуха.

Распределение поля ветра по вертикале влияет на интенсивность осадков, которые могут быть очень сильными. Конвергенция в низких слоях является причиной образования области повышенного давления с холодным воздухом на

наветренной стороне, который вызывает характерный горизонтальный градиент давления поперек горной цепи. Конвергенция компенсируется дивергенцией, описанной выше. Противоположная ситуация, которая ведет к образованию области пониженного давления, происходит на подветренной стороне горной цепи.

Влажный воздух, который поднимается, является причиной усиления или вовсе образования характерной облачности вдоль склона горы. Морфологический вид и горизонтальная протяженность такой облачности напрямую зависит от потока, который пересекает горный хребет. Ориентированность потока к горной цепи влияет на разницу в образовании облаков. При изменении направления и скорости ветра с высотой будет изменяться и интенсивность облачности заграждения, то есть либо усиление облачного поля, либо изменение объема выпадения осадков.

Анализ литературы показывает, что есть параметр, который достаточно часто упоминается в отношении такой облачности – число Фруда. Это число сочетает в себе следующие параметры: влияние неустойчивости, скорость ветра и высота местности. Этот показатель безразмерный, характеризует поток на предмет наличия достаточной кинетической энергии для преодоления препятствия. Число Фруда помогает определить, где будет происходить орографический подъем: над местностью или вверх по течению. Рассмотрим два варианта числа Фруда, когда значение высокое и когда значение низкое. При большом значении числа Фруда возникает сильный восходящий поток, как следствие, происходит увеличение количества осадков на наветренной стороне гор. При низком значении рельеф блокирует подъем, а значит, увеличение количества осадков будет выше по течению.

Поле ветра на высоте 500 гПа не подвержено влиянию горного хребта, следовательно, поток проходит беспрепятственно через нее. Данные радиозондирования с наветренной стороны указывают на вертикально протяженный влажный слой на небольших высотах, простираясь до горной вершины. По данным на подветренной стороне наблюдается сухой слой от

подстилающей поверхности, вплоть до средних высот, там же зона повышенной влажности (рисунок 2.4.1).

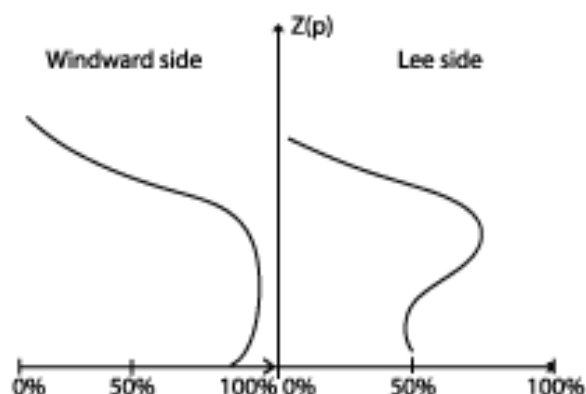


Рисунок 2.4.1 – Относительная влажность по данным радиозондирования на наветренной и подветренной стороне

2.5 Ключевые параметры феновых ветров в Альпах

2.5.1 Южный фен

Для южного фена характерна хорошо развитая область барической депрессии вокруг Бискайского залива или над Британскими островами, при этом, циклоническая система медленно продвигается к востоку или северо-востоку. При этом, холодный фронт, простирается над территорией Франции и тоже перемещается с небольшой скоростью к востоку. Перед холодным фронтом движется область теплых воздушных масс, пересекающая Альпы.

На южной стороне Альп нижележащие слои воздуха холодные. Насыщенные влагой ВМ при движении с юга в верхних слоях атмосферы собираются в Альпах, как следствие, обилие дождей в градации от умеренных до сильных. На северной стороне Альп образуется облачная гряда, более известная как стена фена.

В южной части Альп наиболее часто осадки выпадают к северу от главного хребта. Скорость ветра и направление напрямую влияют на район воздействия.

Юго-восточные ветра оказывают влияние на Верхний Вейл, до Центрального Вейл и района Гримзеля. Южные ветра – Урсерен, верхняя и южная Сурсельва. Юго-западные – центр Граубюндена и Верхнего Энгандина.

С противоположной стороны от Альп ВМ опускаются и нагреваются, как следствие, облака рассеиваются. Эту область свободную от облачности принято называть окном фена. Линзовидная облачность появляется в районе гребня волны, в народе носит название «рыбий фен».

В феновых долинах на северной стороне Альп штормы фиксируются часто, скорость может достигать от 100 до 140 км/ч.

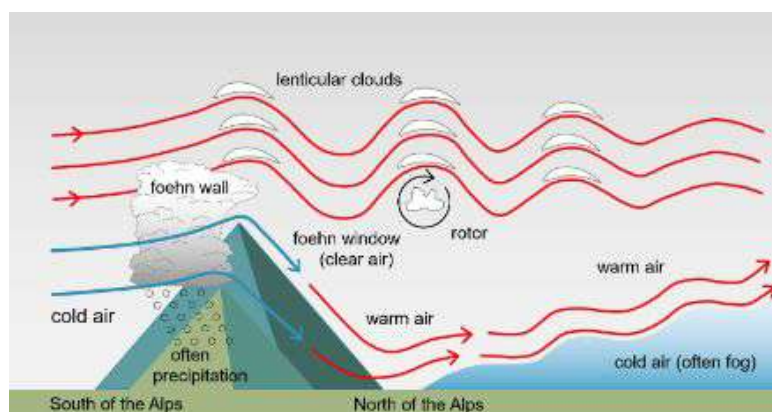


Рисунок 2.5.1 – Типичные характеристики Южного фена

Южный фен на южной стороне Альп может сопровождаться значительным количеством осадков или полным отсутствием таковых. При возникновении южного фена, циклоническая область и ХФ, который связан с ним пролегают несколько дальше от Альп.

Для южного фена также может быть характерно отсутствие осадков, как было уже упомянуто ранее, это справедливо при наличии области высокого давления над Юго-Восточной Европой (антициклонический фен). При этой ситуации достаточно сухой воздух течет над Альпами с юго-востока, как следствие, на южной стороне Альпийского хребта отсутствует облачность и осадки, как следствие, относительная влажность в долине низкая, тогда как у

классического фена находится в пределе 30–40 % (рисунок 2.5.1). У антициклонического фена может опускаться до 10% [33].

2.5.2 Северный фен

Северный фен образуется в антициклонической зоне над западной частью Европы, для него характерен влажный воздух, перенесенный с Северного моря в сторону Альп. ВМ пересекают Альпы в южном направлении, над северным склоном Альп расположена область скопления облачности и осадков. По мере удаления от Альп вертикальная протяженность облачности уменьшается и достаточно быстро.

В условиях северного фена наибольшее количество осадков фиксируется на центральном и восточном склоне северного склона Альп. Осадки более слабо выражены, в сравнении с южным феном. Влияние зоны пониженного давления гораздо более заметна на западе. Вале и Граубюнден полностью закрыты облаками, дожди преимущественно в Граубюндене.

Южнее Альп тяжелый и холодный воздух спускается в долину, перемещаясь с севера, температура повышается и при этом облака рассеиваются. Для северного фена характерна ясная погода и иногда значительное повышение температуры на южном склоне Альп.

Подветренные волны образуются в случае северного фена, характерной чертой являются линзовидные облака и роторы. Северный фен может достигать скорости ветра до 80 км/ч. В редких случаях влияние северного фена простирается до Генуэзского залива (рисунок 2.5.2).

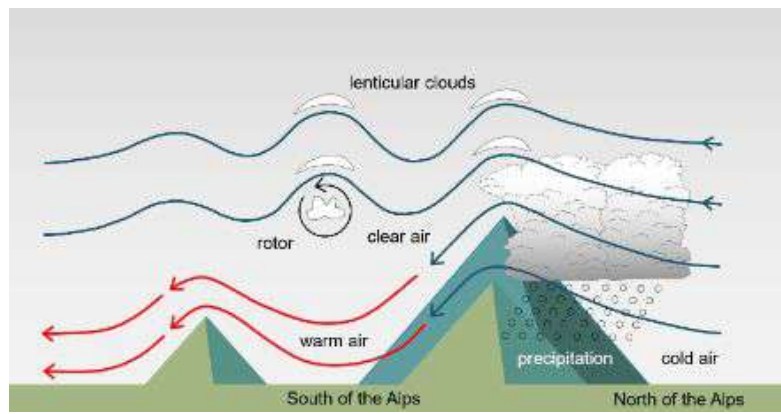


Рисунок 2.5.2 – Типичные характеристики северного фена

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПРИ АНАЛИЗЕ ФЕНОВ

В ходе работы были найдены случаи фенового ветра по спутниковым изображениям с 2018 по 2022 год. Всего за 5 лет было найдено 147 случаев фенового ветра. Из них 65 случаев Северного фена и 82 случая Южного.

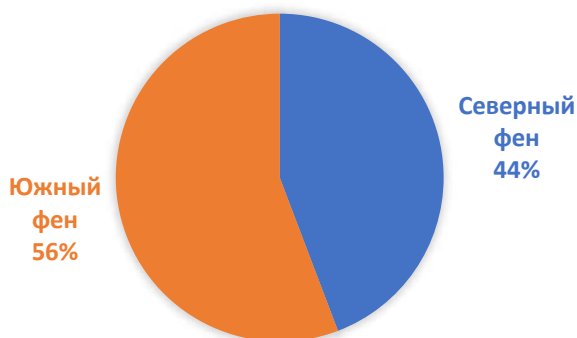
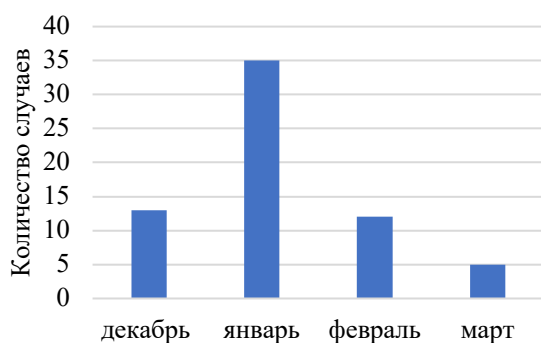
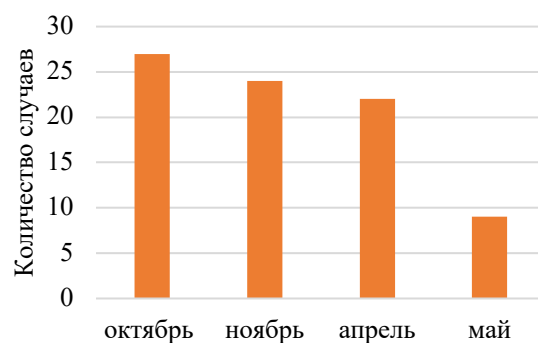


Рисунок 3.1 – Распределение случаев Северного и Южного фенов

Случаи отбирались за определенные месяцы для каждого типа фена. Северный фен чаще встречается в зимние и весенние месяцы, а наиболее активен в период с декабря по март. В этот период холодные воздушные массы из северной и северо-западной Европы часто проникают в Альпийский регион, вызывая феновые ветры на южной стороне гор. Южный фен чаще встречается в осенние и весенние месяцы, а также в начале лета и наиболее активен в октябре, ноябре, апреле и мае. В это время влажные и теплые воздушные массы с юга, особенно из Средиземного моря, чаще достигают Альп, вызывая сильные феновые ветры на северной стороне гор. На рисунке 3.2 представлено распределение случаев фена по выбранным месяцам. По диаграммам можно сделать вывод, что Северный фен чаще наблюдается в январе, а Южный в октябре.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Диаграмма распределения Северного (а) и Южного (б) фена по месяцам

В третьей главе будут рассмотрены по одному отобранному случаю Северного и Южного фена в Альпах.

3.1. Анализ случая Северного фена в Альпах

Случай Северного фена в Альпах за 09:35 UTC 22.02.2022 года был выбран с помощью визуального дешифрирования облачности в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Была произведена геометрическая коррекция и географическая привязка спутникового снимка по координатам и выполнено цветосинтезирование с помощью команды OpenRGB в приложении для визуализации спутниковых изображений – SNAP, где $R=0,645$ мкм, $G=0,555$ мкм, $B=0,469$ мкм (рисунок 3.1.1).



Рисунок 3.1.1 – Цветосинтезированное спутниковое изображение Северного фена в Альпах от 22.02.2022 года 09:35 UTC по данным MODIS Aqua

На изображении дешифрируется низкая слоистая облачность в альпийском предгорье к северу от Альпийского хребта и высокослоистая на наветренной стороне гор. Также предполагается фронтальная облачность, которая находится на северо-западе от Альп. Присутствует и орографические облака, которые указывают на точное направление воздушных масс, пересекающих горный хребет.

На наветренной стороне гор наблюдается ясная безоблачная погода.

На рисунке 3.1.2 представлен снимок в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра. На его основе мы получаем подтверждение выводам при анализе цветосинтезированного снимка и можем отметить, что на подветренной стороне Альп наблюдается область в темных тонах, что говорит об отсутствии облачности и высоком нагреве поверхности.

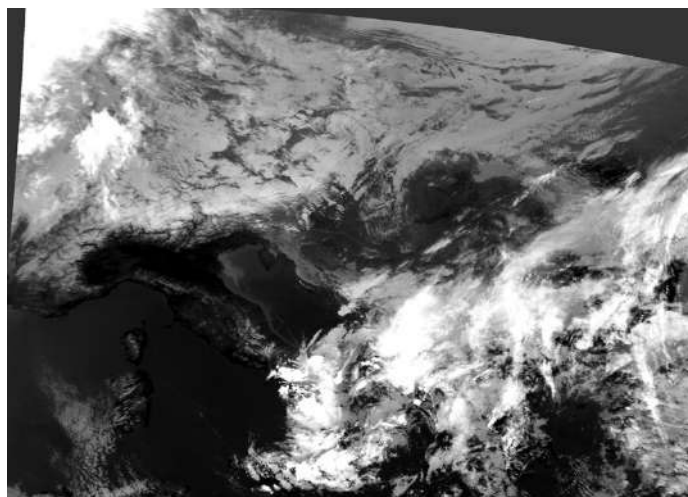


Рисунок 3.1.2 – Спутниковое изображение Северного фена в Альпах от 22.02.2022 года 09:35 UTC в ИК диапазоне ЭМ спектра – 11 мкм по данным MODIS Aqua

На рисунке 3.1.3 и 3.1.4 представлены спутниковые изображения в каналах водяного пара – 7,3 мкм и 6.7 мкм. Данные изображения позволяют получить новую, ранее недоступную визуальную информацию о действии Северного фена. Во-первых, мы отмечаем область сухого воздуха на южной (подветренной) стороне Альп, соответствующей черному тону на изображении, а также присутствие невидимых орографических подветренных волн, которые не дешифрируются на снимках других диапазонов. Во-вторых, на этих изображениях отчетливо прослеживается спиралевидный циклон, действующего на юге Апеннинского полуострова, с четко просматриваемой фронтом окклюзии и струйное течение. В-третьих, отмечаем на подветренной стороне Динарского нагорья узкую черную полосу сухого воздуха, очерчивающая линию гор, которая предположительно может быть связана с областью действия фенового ветра и в данном регионе.

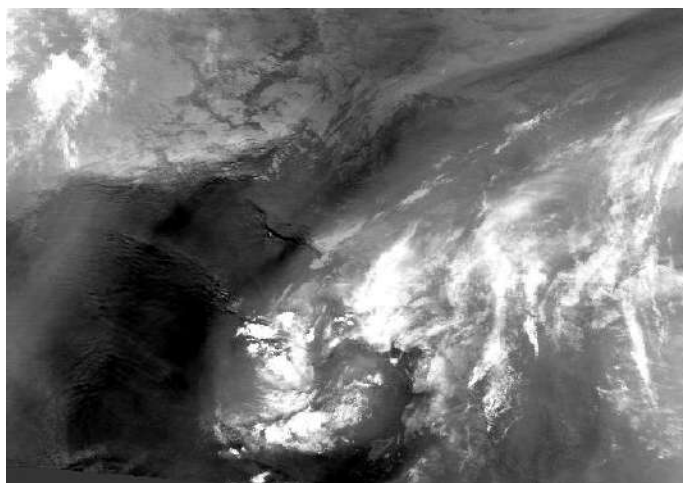


Рисунок 3.1.3 – Спутниковое изображение в Северного фена в Альпах от 22.02.2022 года 09:35 UTC в канале водяного пара – 7,3 мкм по данным MODIS Aqua

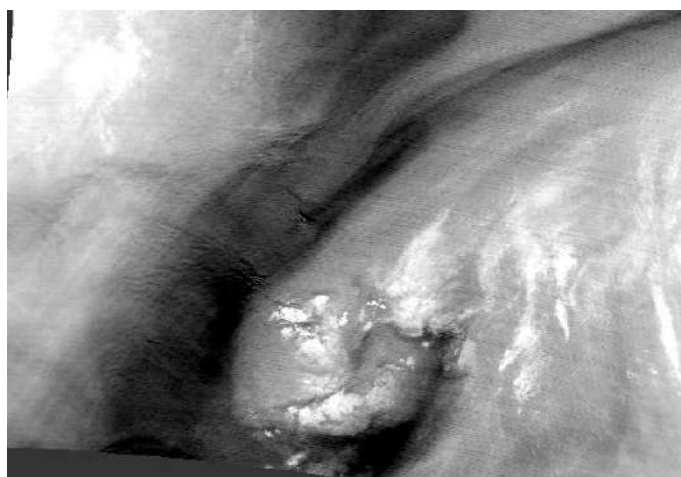


Рисунок 3.1.4 – Спутниковое изображение в Северного фена в Альпах от 22.02.2022 года 09:35 UTC в канале водяного пара – 6,7 мкм по данным MODIS Aqua

Для того чтобы убедиться в каком направлении воздушные массы пересекают горный хребет была построена Диаграмма фена (рисунок 3.1.5), которая основана на разнице давления между Больцано (подветренная сторона) и Инсбруком (наветренная сторона). При отрицательных значениях на диаграмме давление в Больцано ниже, чем в Инсбруке и это означает, что наблюдаются Северный фен. Также диаграмма показывает интенсивность фена – когда разница увеличивается, увеличивается и интенсивность ветра.

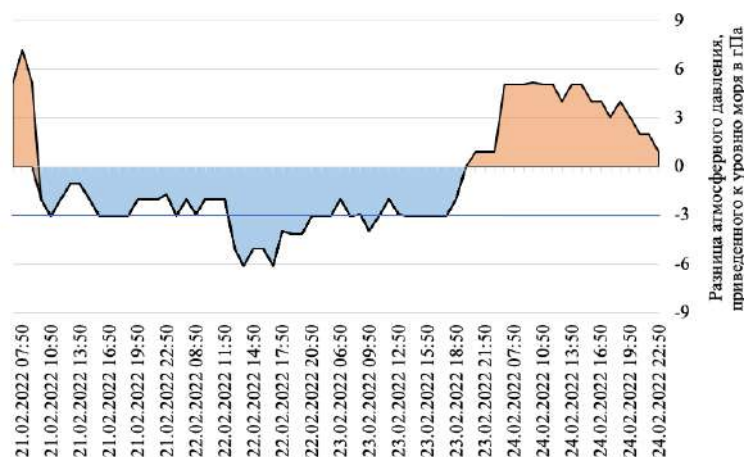
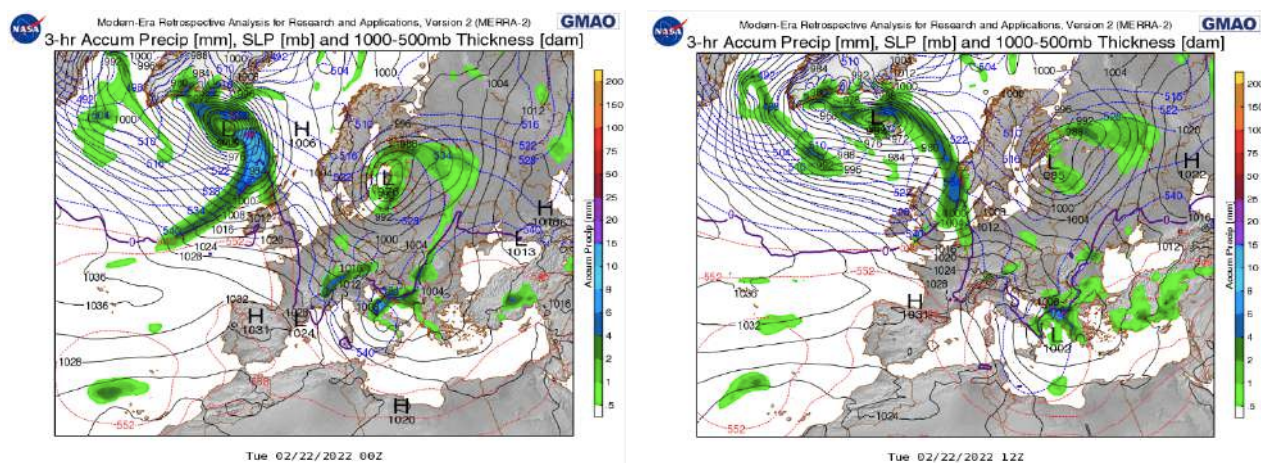


Рисунок 3.1.5 – Диаграмма фена, основанная на разнице давления между Больцано и Инсбруком по данным в сроки наблюдений за период с 21.02.2022 по 24.02.2022 год

Анализируя диаграмму, мы получили подтверждение действия Северного фена в Альпах 22.02.2022, так как разница давления больше 3 гПа, что является индикатором прорыва ветра в долины и равна 6 гПа. [24]

Для анализа фена также необходимы карты погоды. Среди доступных для анализа необходимых данных карты, основанные на реанализе Merra-2, предоставляющие информацию об осадках, приземном давлении и относительной высоте 1000-500 (дам) (рисунок 3.1.6).

На картах за 00 и 12 UTC (рисунок 3.1.6а и 3.1.6б) изобары направлены перпендикулярно Альпийскому хребту и искривляются после прохождения вершины. Это может сигнализировать о наличии подветренных волн в атмосфере. Давление при фене на наветренной стороне гор всегда выше, чем на подветренной. Также на карте за 00 UTC (рисунок 3.1.6а) присутствуют полосы осадков, параллельные хребту, которые повторяют линию хребта, что может означать торможение воздушного потока.



а)

б)

Рисунок 3.1.6 – Карты погоды а) за 00 UTC, б) за 12 UTC, полученная на основе данных реанализа Merra-2. Карта содержит данные: об осадках за 3 часа, о приземном давлении (мбар) и о толщине слоя 1000-500 (дам).

На рисунке 3.1.7 представлена карта приземного давления для более детального рассмотрения. На подветренной стороне величина давления составляет 1029 гПа, а на подветренной – 1017 гПа. Данная разница в давлении и такое сгущение изобар подтверждает наличие воздушных потоков, проходящих через препятствие с северо-западной стороны.

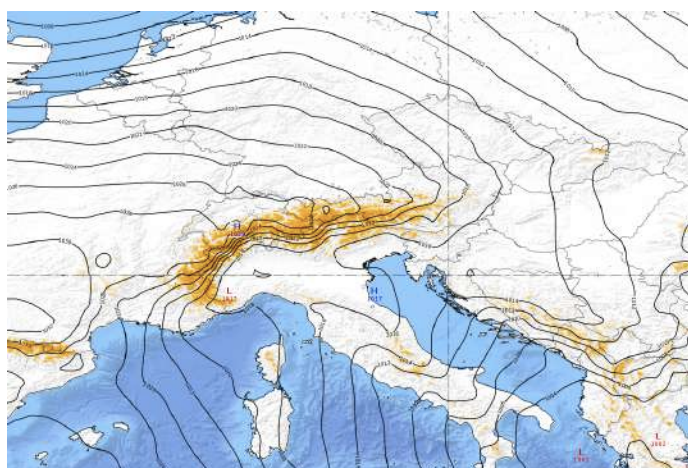


Рисунок 3.1.7 – Изобарическое поле приземного давления по данным ECMWF за срок 12:00 UTC 22.02.2022 год

На рисунке 3.1.8 представлена карта, построенная по станционным наблюдениям. Данные с радара позволяют увидеть осадки на наветренной стороне Альп. Также, стоит обратить внимание на наличие грозовой активности на наветренной стороне Динарского нагорья.

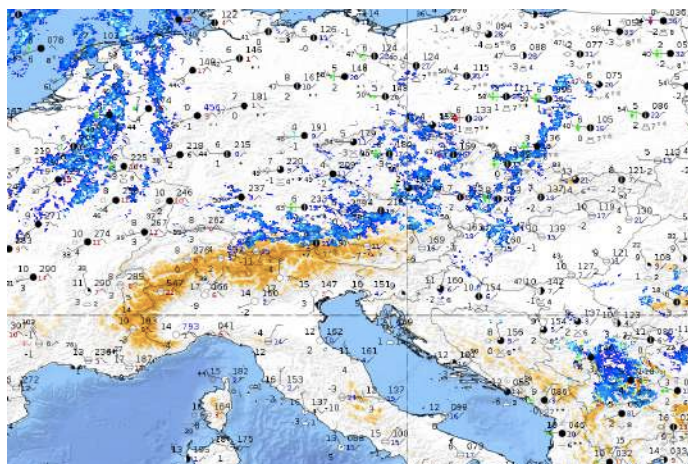
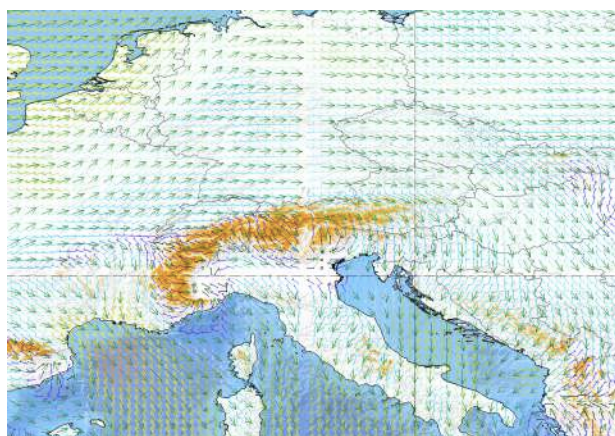
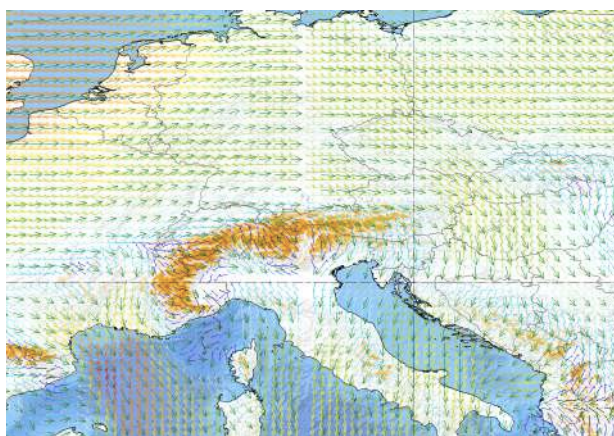


Рисунок 3.1.8 – Два слоя карт: синоптические наблюдения и OPERA Radar Europe за срок 12:00 UTC 22.02.2022 год

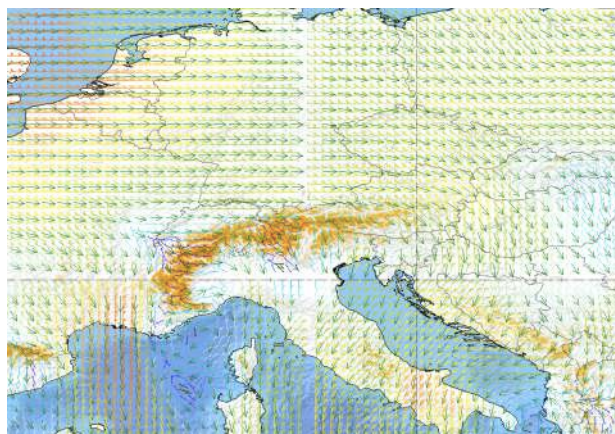
Особенно важным является получение информации о скорости и направлении ветра. На уровне 1000 гПа (рисунок 3.1.9а) ветер на наветренной стороне имеет северо-западное направление и относительно небольшие скорости ветра. Можно проследить, как воздушная масса огибает препятствие, приближаясь к западной части Альпийского хребта, при этом вдоль всего хребта с наветренной стороны происходит торможение потока. Торможение потока не наблюдается на уровне 700 гПа (рисунок 3.1.9г), это может означать, что действие фена распространяется до высоты ~3000 м, при этом большая часть Альпийского хребта имеет высоты ~2000-3000 м.



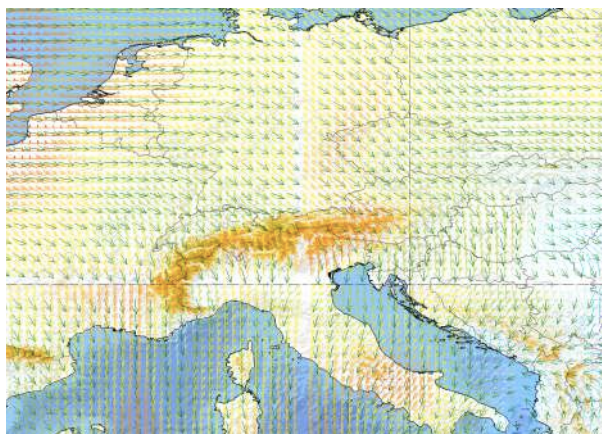
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.1.9 – Направление и скорость ветра на разных высотах: а) 1000 гПа, б) 950 гПа, в) 850 гПа и г) 700 гПа по данным ECMWF за срок 12:00 UTC 22.02.2022 год

Зоны конвергенции и дивергенции играют ключевую роль в динамике воздушных потоков вокруг горных хребтов. Эти зоны оказывают значительное влияние на формирование и характеристики фенового ветра. На рисунке 3.1.10 области конвергенции воздушных масс (отрицательные значения) обозначены красным и дивергенции (положительные значения) синим цветом. Зона конвергенции воздуха находится на наветренной стороне горного хребта, там воздушные массы сталкиваются с препятствием и вынуждены подниматься вверх. Вынужденный подъем воздуха на наветренной стороне приводит к образованию плотных облаков и часто вызывает значительные осадки. Зона дивергенции воздуха находится на подветренной стороне горного хребта, после

того как воздушные массы переваливают через вершины. В этой зоне воздух опускается и дивергирует, что приводит к уменьшению облачности и снижению влажности.

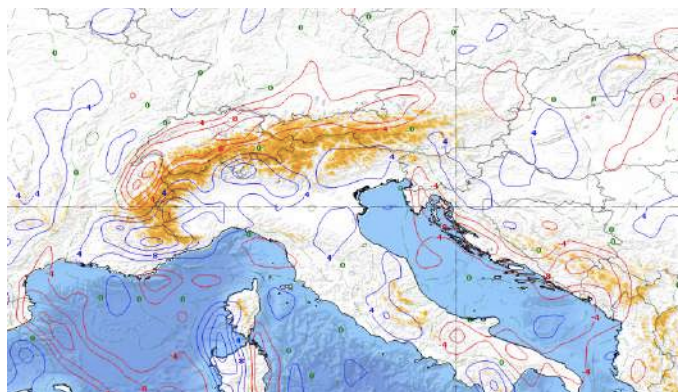


Рисунок 3.1.10 – Значение конвергенции и дивергенции в слое 850 гПа по данным ECMWF за срок 12:00 UTC 22.02.2022 год

Параметр TFR – термический фронтальный параметр (рисунок 3.1.11) указывает на прохождение фронта к северу от Альп. Холодный фронт деформируется орографическим препятствием, происходит задержка фронта, что способствует появлению фенового эффекта.

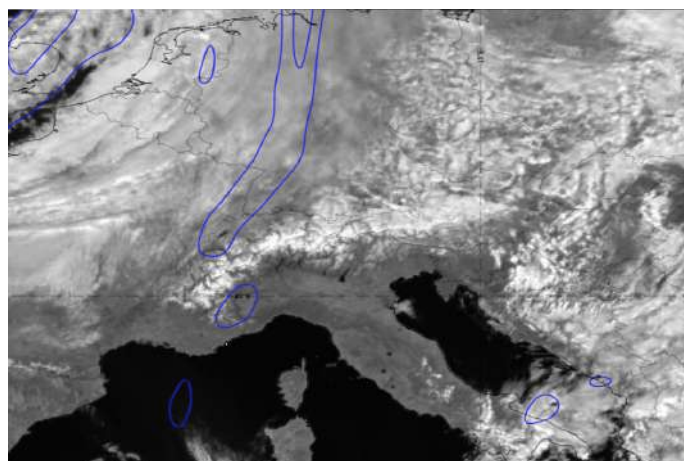


Рисунок 3.1.11 – Термический фронтальный параметр, наложенный на спутниковое изображение в видимом диапазоне электромагнитного спектра по данным ECMWF за срок 12:00 UTC 22.02.2022 год

Далее в работе были рассмотрены данные радиозондирования на станции Мюнхен-Обершлисхайм с наветренной стороны (рисунок 3.1.12), а также на станциях Новара Камери и Риволто на подветренной стороне (рисунок 3.1.13) Альпийских гор.

Примем во внимание Число Ричардсона, указанное с правой стороны от диаграмм на рисунке 3.1.12. Число используется для анализа стабильности атмосферных слоев и характеристики атмосферных потоков. В Мюнхене в 12 часов по UTC значения $Ri = 0,13 - 0,14 < 0,25$. Это указывает на то, что турбулентные силы преобладают над стабильностью, что может привести к интенсивной турбулентности. В условиях низкого числа Ричадсона восходящие потоки воздуха более сильные, что может усиливать возможность развития фенового ветра.

На станции, расположенной на наветренной стороне хребта анализируя кривые температуры и температуры точки росы на аэрологических диаграммах можно сделать вывод о наличии влажного слоя, который доходит почти до вершин хребта. Кривые сходятся на диаграмме – это означает, что воздух почти насыщен водяным паром, то есть относительная влажность близка к 100%.

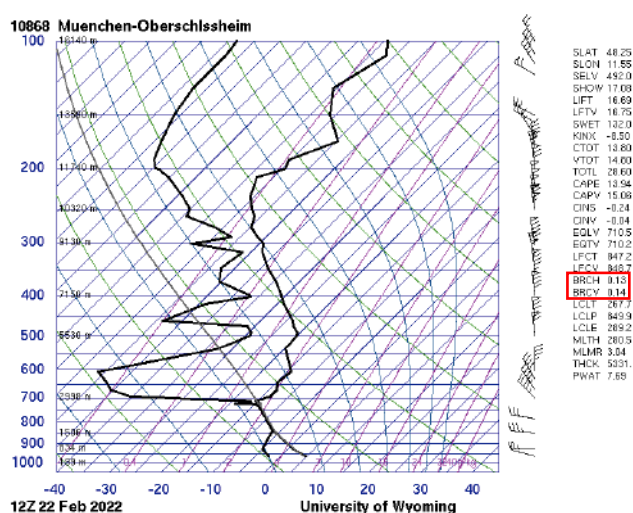
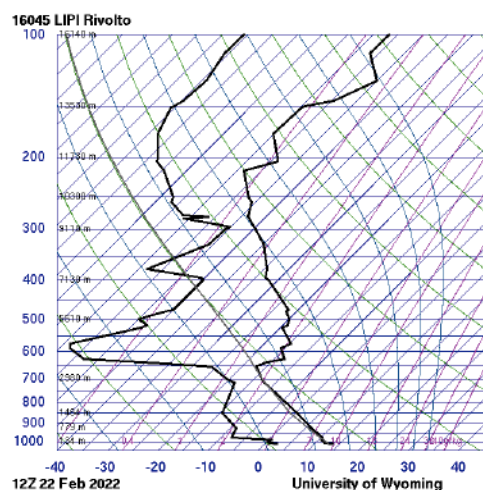
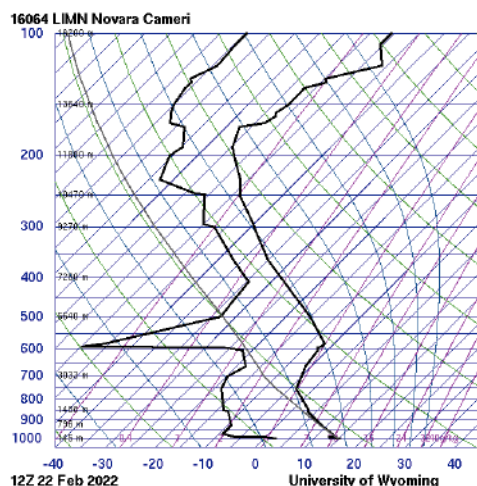


Рисунок 3.1.12 – Данные радиозондирования на наветренной стороне станция 10868 Мюнхен-Обершлисхайм за срок 12 UTC 22.02.2022 год

С подветренной стороны (рисунок 3.1.13) наблюдается обратная ситуация – кривые температуры и температуры точки росы находятся далеко друг от друга, это означает, что воздух менее насыщен водяным паром, то есть низкая относительная влажность.



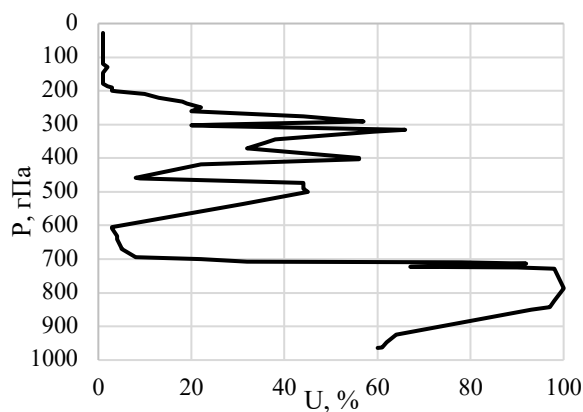
а)



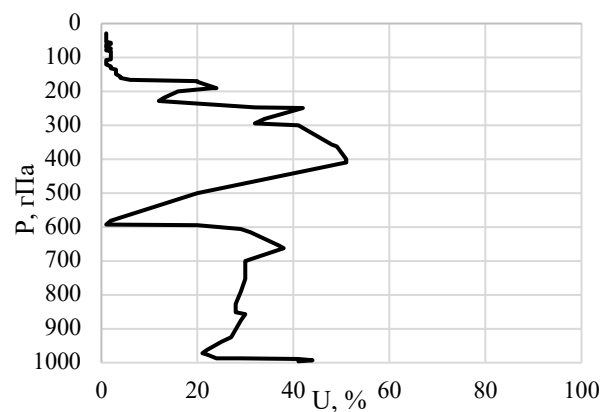
б)

Рисунок 3.1.13 – Данные радиозондирования на подветренной стороне станция 16045 Ривольто (а) и 16064 Новара Камери (б) за срок и 12 UTC 22.02.2022 год

На рисунке 3.1.14 представлен вертикальный профиль относительной влажности на наветренной стороне в Мюнхене (рисунок 3.1.14а) и подветренной стороне в Мальпенсе (рисунок 3.1.14б). Данные радиозондирования показывают высокие значения относительной влажности на низких уровнях почти до высоты гребня гор. На подветренной стороне хребта на этих же уровнях прослеживается сухой слой от поверхности до средних уровней и влажный слой выше.



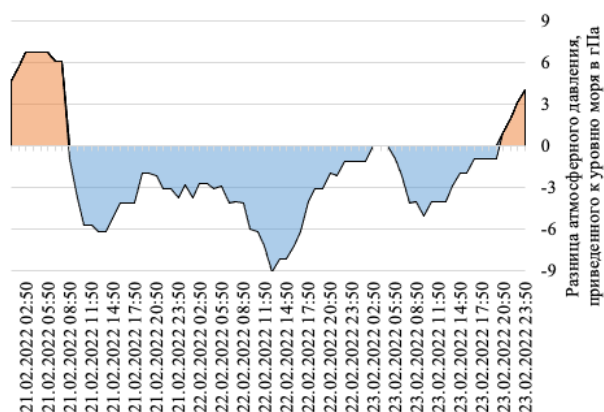
а)



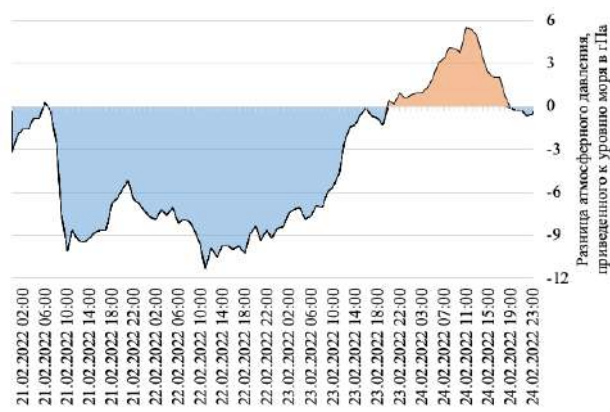
б)

Рисунок 3.1.14 – Диаграмма значений относительной влажности по высоте на наветренной (а) и подветренной стороне (б) по данным аэрологического зондирования за срок 12:00 UTC 22.02.2022 год

Далее в работе была рассмотрена разница давления между станциями в двух разных регионах – Восточных и Западных Альпах. Для рассмотрения разницы давления между станциями в Восточных Альпах были выбраны станции Удине (подветренная сторона) и Зальцбург (наветренная сторона), в Западных – Мальпенсе (подветренная сторона) и Альтдорфом (наветренная сторона). На рисунке 3.1.15б можно отметить, действие фенового ветра было мощнее и длилось дольше в Западных Альпах.



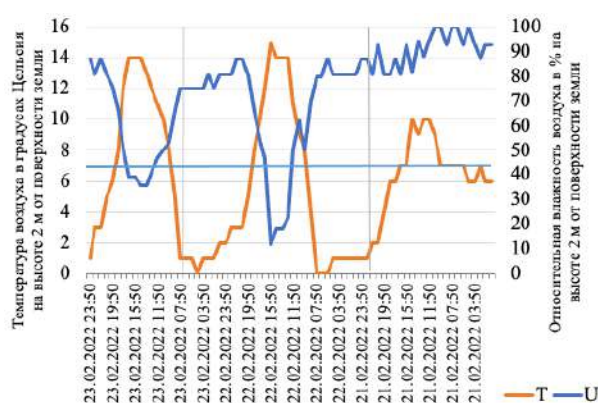
а)



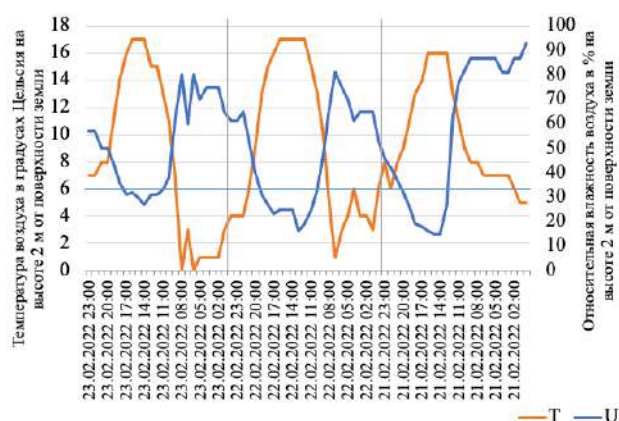
б)

Рисунок 3.1.15 – Разница давлений между станциями на подветренной и наветренной стороне в Восточных (а) и Западных (б) Альпах по данным в сроки наблюдений

Далее рассматривался ход температуры и влажности в двух регионах. Считается, что чем больше разница между температурой и влажностью в один момент времени, тем сильнее действие фенового ветра. При этом влажность должна быть низкой, а температура высокой в сравнении со средним суточным ходом величин, также по пересечению прямых можно отметить время начала и окончания действия фена. По графику на рисунке 3.1.16 отмечаем, что температура и влажность примерно равны в обоих районах в одно время, но период действия длительнее в Западных Альпах. Отметим, что на обеих станциях была зафиксирована относительная влажность ниже 30% (на рисунке 3.1.16 голубая линия относится к значению относительной влажности 30%).



а)



б)

Рисунок 3.1.16 – Данные по температуре и влажности на станциях в Восточных (а) и Западных (б) Альпах по данным наземных наблюдений за период с 21.02.2022 по 23.02.2022 год

Изменения скорости ветра на подветренной станции помогают зафиксировать период максимальной интенсивности фенового ветра. Скорости ветра на станции Удине (подветренная сторона, Восточные Альпы) были небольшими – максимальные значения достигали 6 м/с. Максимальная скорость ветра в западном регионе достигала 16 м/с. Эти значения не являются высокими для фенового ветра, и чтобы зафиксировать максимальные значения необходимо

выбирать станции, расположенные выше по склону, чем рассмотренные в работе. Высота, на которой скорость ветра достигает максимальных значений, находится примерно на уровне от 1000 до 3000 м над уровнем моря. Рассмотренные станции находятся ниже этих значений. Но несмотря на это, даже на данных станциях можно отслеживать действие фена.

3.2 Анализ случая Южного фена в Альпах

Случай Южного фена в Альпах за 12:05 UTC 14.11.2022 года был также отобран с помощью визуального дешифрирования облачности в видимом диапазоне электромагнитного спектра (рисунок 3.2.1). На снимке ярко выражена фронтальная облачность, расположенная на юге Альп вдоль всего Апеннинского полуострова. Также фронтальная облачность наблюдается и на северо-западе от гор. На северной стороне Альпийского хребта прослеживается перистая облачность, она находится выше, чем нижележащая облачность в том же регионе.



Рисунок 3.2.1 – Цветосинтезированное спутниковое изображение Южного фена в Альпах от 14.11.2022 года 12:05 UTC по данным MODIS Aqua

На рисунке 3.2.2 представлен снимок в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра. На основе его анализа можно сделать аналогичные выводы и отметить, что подветренная сторона горного хребта характеризуется

более темными серыми тонами, за исключением перистой облачности, расположенной за гребнем гор.

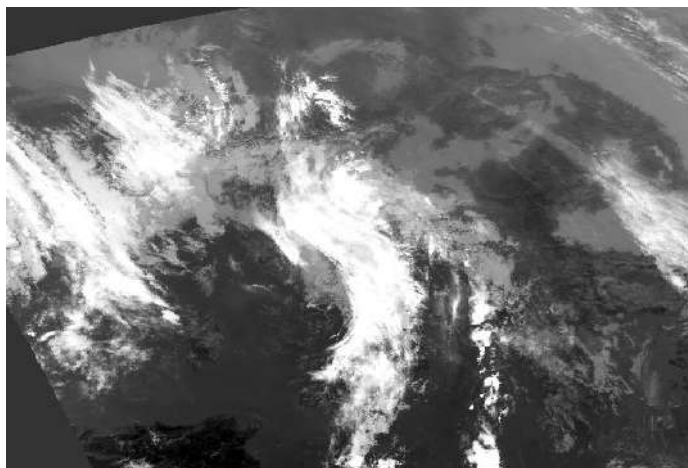


Рисунок 3.2.2 – Спутниковое изображение Южного фена в Альпах от 14.11.2022 года 12:05 UTC в ИК диапазоне ЭМ спектра – 11 мкм по данным MODIS Aqua

На рисунке 3.2.3 и 3.2.4 представлены спутниковые изображения в каналах водяного пара – 7,3 мкм и 6,7 мкм. На изображении в канале 6,7 хорошо прослеживается тонкая линия в черных тонах, которая повторяет линию хребта. Она соответствует сухой зоне и является зоной действия фенового ветра. Фен действует на высоте средней тропосферы, так как этот уровень прослеживается в канале 6,7 мкм.

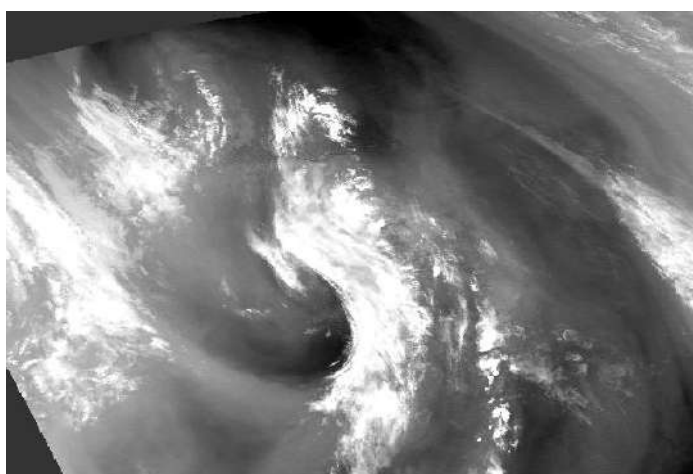


Рисунок 3.2.3 – Спутниковое изображение в Южного фена в Альпах от 14.11.2022 года 12:05 UTC в канале водяного пара – 7,3 мкм по данным MODIS Aqua

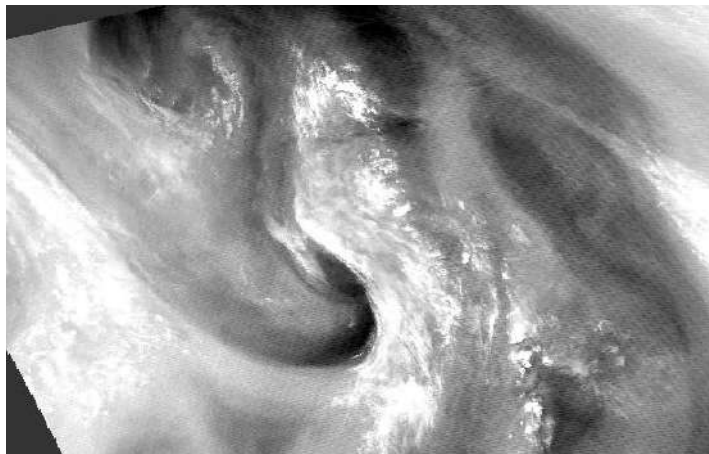


Рисунок 3.2.4 – Спутниковое изображение в Южного фена в Альпах от 14.11.2022 года 12:05 UTC в канале водяного пара – 6,7 мкм по данным MODIS Aqua

Для того чтобы снова убедиться в каком направлении воздушные массы пересекают горный хребет была построена Диаграмма фена (рисунок 3.2.5). При положительных значениях на диаграмме давление в Больцано выше, чем в Инсбруке и это значит, что начинает действовать Южный фен. Также диаграмма показывает интенсивность фена – когда разница увеличивается, увеличивается и интенсивность ветра. Предположительно, фен наблюдался не один день, но в максимальной стадии достиг в дневные часы рассматриваемой даты.

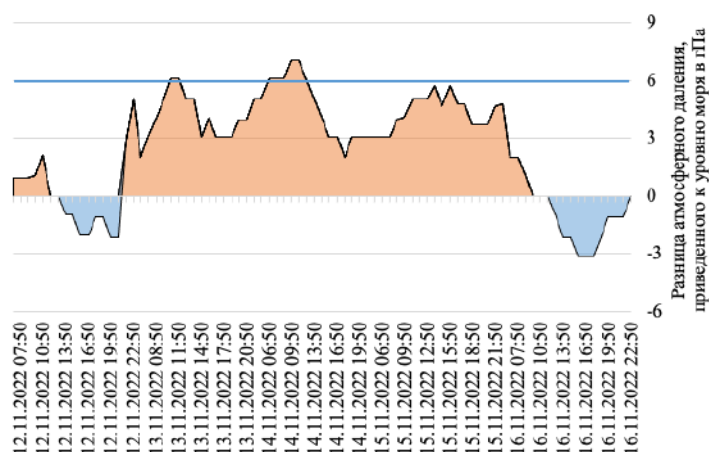
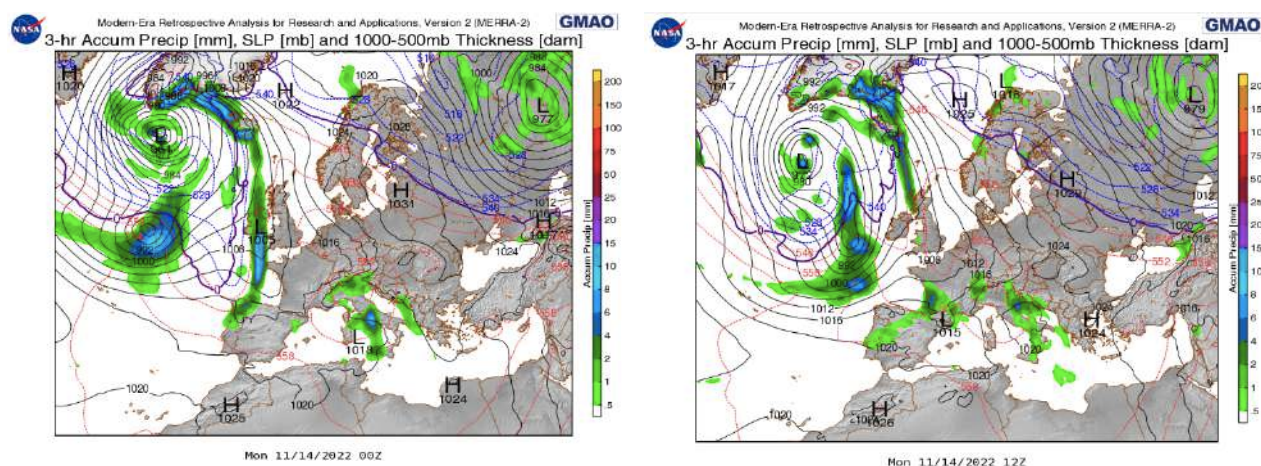


Рисунок 3.2.5 – Диаграмма фена, основанная на разнице давления между Больцано и Инсбруком по данным наземных наблюдений за период с 12.11.2022 по 16.11.2022 год

На картах реанализа Merra-2 за 00 и 12 UTC (рисунок 3.2.6) обозначен фронт с осадками, упирающийся в линию горного хребта.



а)

б)

Рисунок 3.2.6 – Карты погоды а) за 00 UTC, б) за 12 UTC, полученная на основе данных реанализа Merra-2. Карта содержит данные: об осадках за 3 часа, о приземном давлении (мбар) и о толщине слоя 1000-500 (дам).

На рисунке 3.2.7 представлена карта приземного давления. На подветренной стороне величина давления составляет 1016 гПа, при этом на подветренной 1025 гПа. Данная разница в давлении и параллельные хребту

изобары подтверждают наличие воздушных потоков, проходящих через препятствие с юго-восточной стороны.

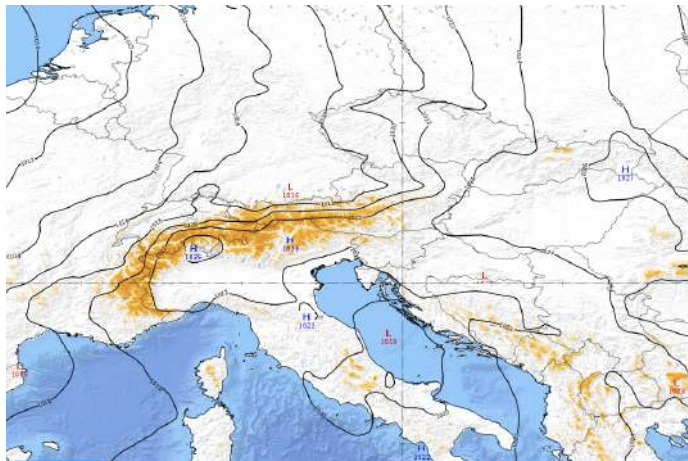


Рисунок 3.2.7 – Изобарическое поле приземного давления по данным ECMWF за срок 12:00 UTC 14.11.2022 год

Данные со станций на рисунке 3.2.8 позволяют увидеть юго-восточное направление ветра и оценить баллы облачности и высокую тенденцию изменения давления на наветренной стороне гор. А также данные с радара позволяют оценить распределение осадков и их интенсивность.

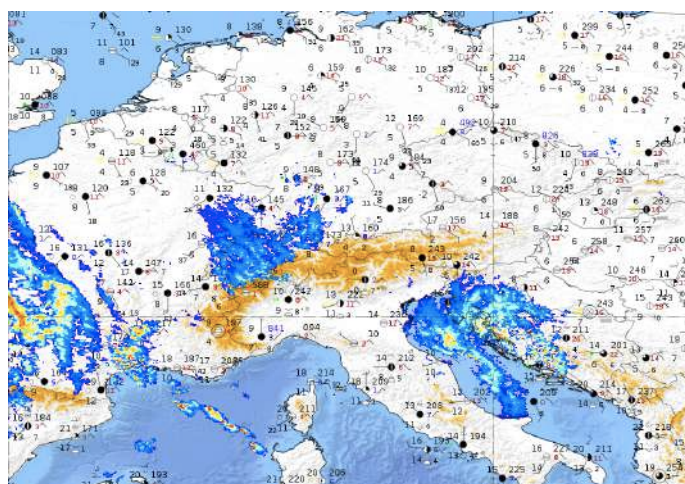
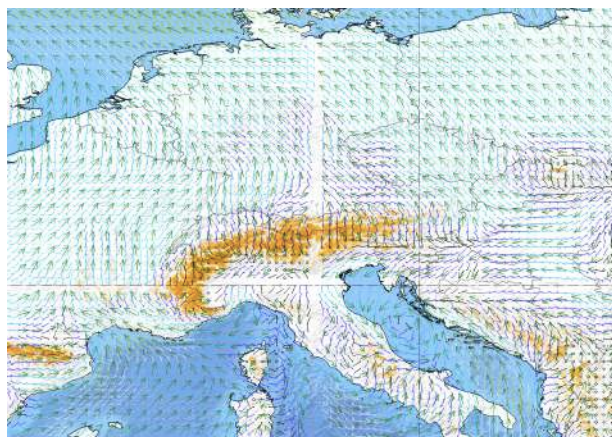
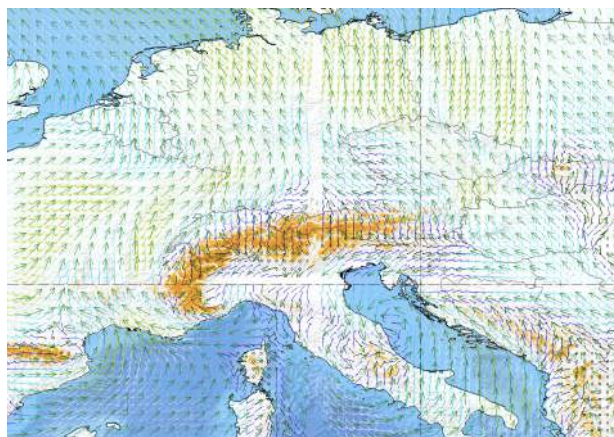


Рисунок 3.2.8 – Два слоя карт: синоптические наблюдения и OPERA Radar Europe за срок 12:05 UTC 14.11.2022 год

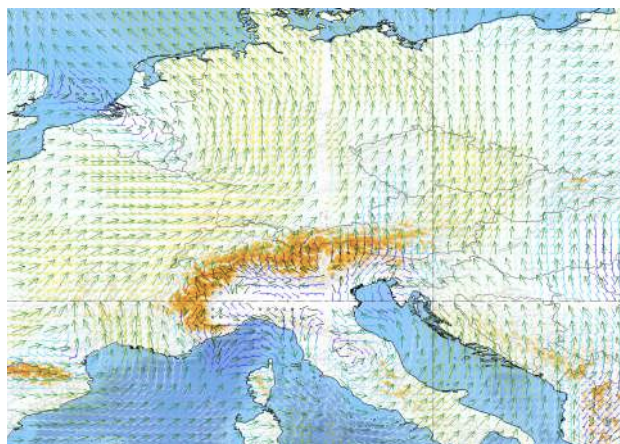
На основании анализа поля ветра на уровнях 1000, 950 и 850 можно сделать вывод о присутствии циклонической завихренности над Адриатическим морем, которая является причиной появления фенового ветра на северной стороне Альп. Часть воздуха перетекает в западной части гор и большое количество отражается от хребта, что прослеживается на приведенных ниже картах, кроме уровня 700 гПа, где воздушные массы уже беспрепятственно пересекают линию гор.



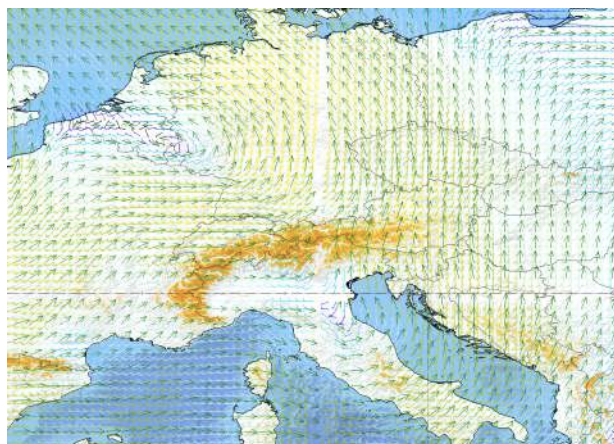
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2.9 – Направление и скорость ветра на разных высотах: а) 1000 гПа, б) 950 гПа, в) 850 гПа и г) 700 гПа по данным ECMWF за срок 12:00 UTC 14.11.2022 год

На рисунке 3.2.10 обозначены значения конвергенции (отрицательные значения) и дивергенции (положительные значения) воздушных масс. Зона конвергенции воздуха находится, в большей части, над Хорватией. Там

воздушные массы подходят к препятствию и вынуждены подниматься вверх. Зона дивергенции воздуха находится подветренной стороне, расположенная вдоль всего хребта.

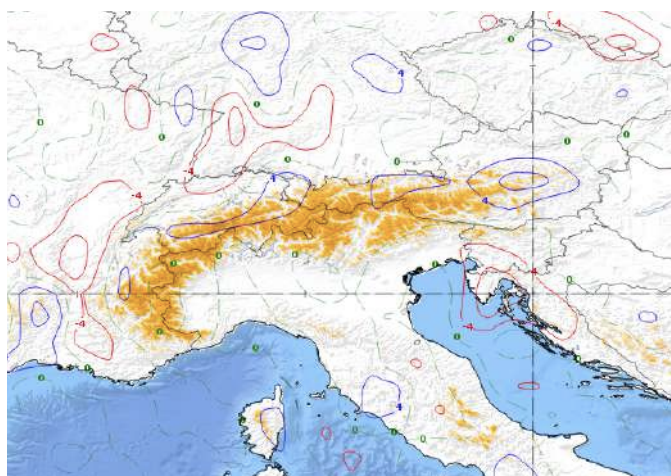


Рисунок 3.2.10 – Значение конвергенции и дивергенции в слое 850 гПа по данным ECMWF за срок 12:00 UTC 14.11.2022 год

Параметр TFP – термический фронтальный параметр (рисунок 3.2.11) указывает на прохождение фронта через Адриатическое море, который прослеживается с наветренной стороны горного хребта.

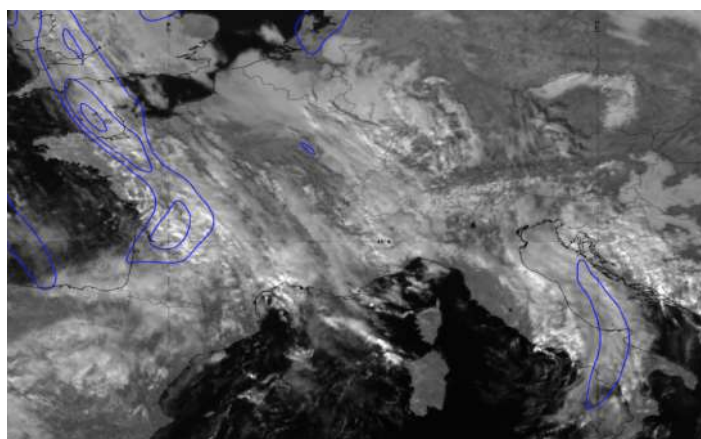


Рисунок 3.2.11 – Термический фронтальный параметр, наложенный на спутниковое изображение в видимом диапазоне электромагнитного спектра по данным ECMWF за срок 12:00 UTC 14.11.2022 год

Далее в работе были рассмотрены данные радиозондирования на станциях Новара Камери и Риволто с наветренной стороны (рисунок 3.2.12), а также на станции Штутгарт на подветренной стороне (рисунок 3.2.13).

С наветренной стороны на диаграммах двух станций прослеживается сходимости кривых температуры и температуры точки росы, это является показателем насыщенности воздуха водяным паром.

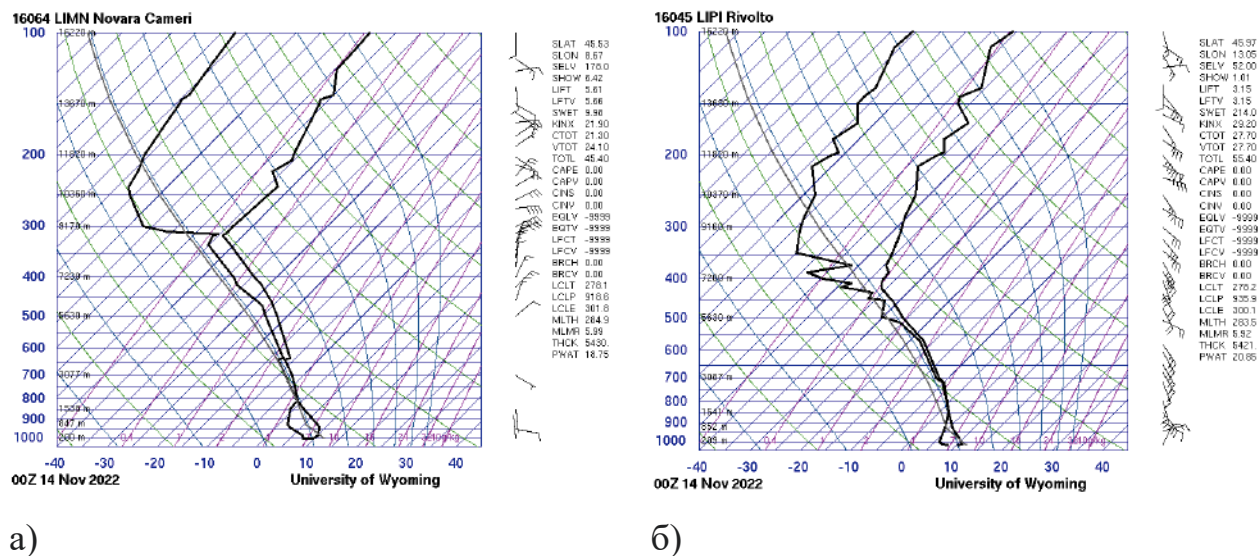


Рисунок 3.2.12 – Данные радиозондирования на наветренной стороне по станциям 16045 Ривольто (а) и 16064 Новара Камери (б) за срок 00 UTC 14.11.2022 год

На подветренной стороне кривые температуры и температуры точки росы расположены далеко, это значит, что воздух менее насыщен водяным паром, то есть такая ситуации соответствует низкой относительной влажности.

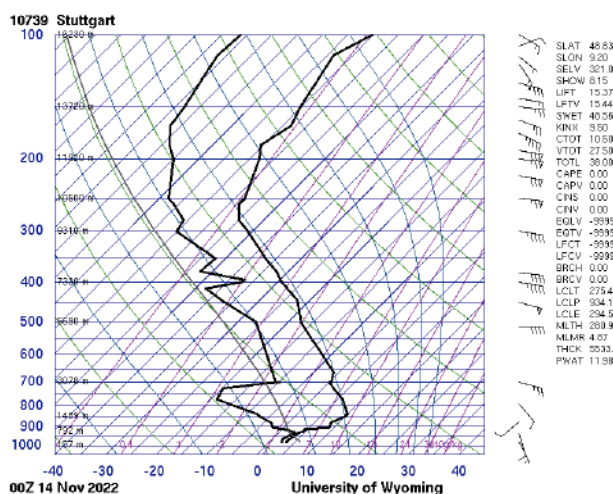


Рисунок 3.2.13 – Данные радиозондирования на подветренной стороне станция 10739 Штутгарт за срок и 00 UTC 14.11.2022 год

На рисунке 3.2.14 показаны диаграммы значений относительной влажности по высоте на наветренной стороне в Ривольто (рисунок 3.2.14а) и подветренной стороне в Штутгарте (рисунок 3.2.14б). Данные радиозондирования демонстрируют средние значения у поверхности и высокие значения относительной влажности до уровня 500 гПа на наветренной стороне. На подветренной стороне хребта у поверхности относительная влажность низкая, но с высотой значения становятся выше до уровня 600 гПа.

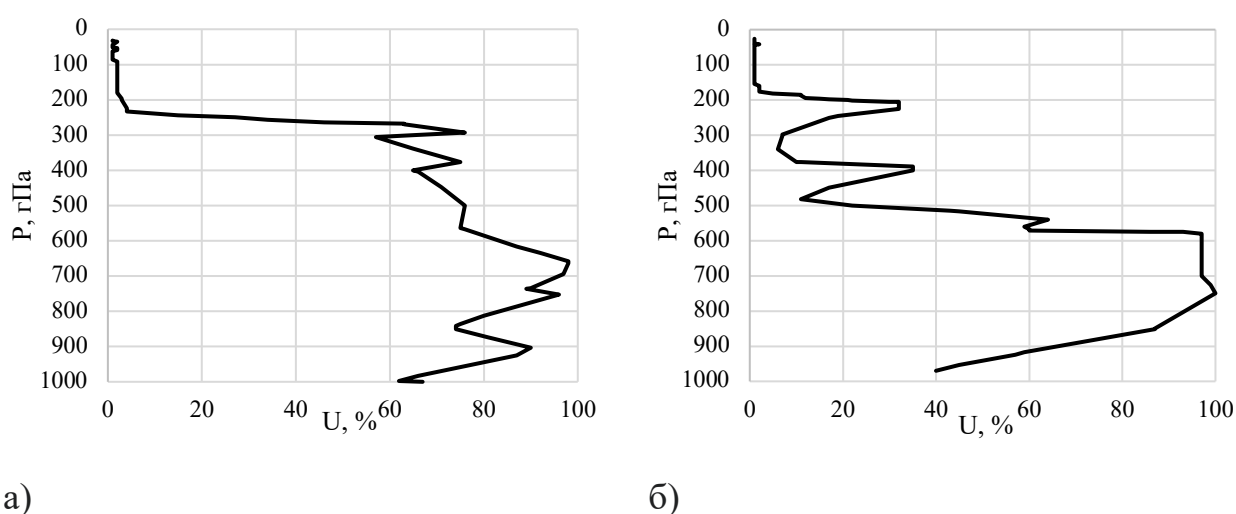


Рисунок 3.2.14 – Диаграмма значений относительной влажности по высоте на наветренной (а) и подветренной стороне (б) по данным аэрологического зондирования за срок 12:00 UTC 14.11.2022 год

В случае Южного фена была также рассмотрена разница между станциями в двух разных регионах – Восточных и Западных Альпах (рисунок 3.2.15). Для рассмотрения разницы между станциями в Восточных Альпах были выбраны станции Удине (наветренная сторона) и Зальцбург (подветренная сторона) и в Западных Мальпенсе (наветренная сторона) и Альтдорфом (подветренная сторона). На рисунке 3.2.15 можно отметить, что действие фенового ветра началось в один момент времени, но продолжительность сила действия различна. По данным диаграммы, сильнее фен наблюдался в Западных Альпах.

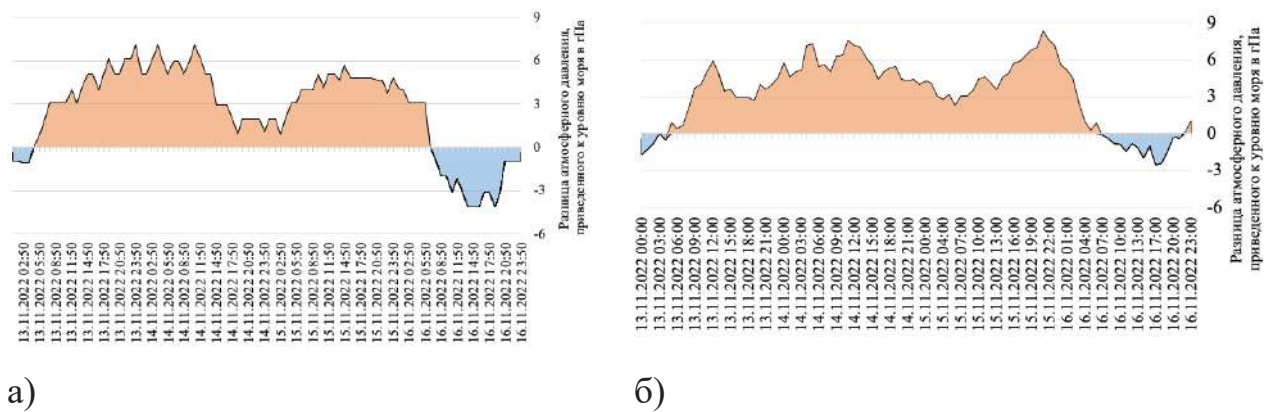


Рисунок 3.2.15 – Разница давлений между станциями на подветренной и наветренной стороне в Восточных (а) и Западных (б) Альпах по данным в сроки наблюдений

Далее рассматривался ход температуры и влажности в двух регионах. По графику на рисунке 3.2.16 можно отметить, что разница между температурой и относительной влажностью больше в Восточных Альпах, но продолжительность больше в Западных (на рисунке 3.2.16 голубая линия относится к значению относительной влажности 30%).

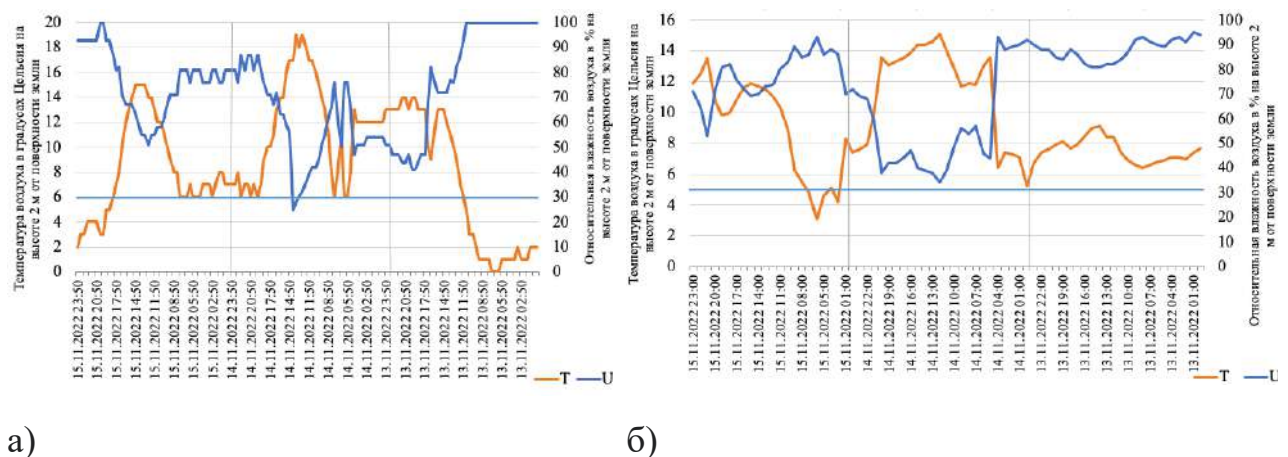


Рисунок 3.2.16 – Данные по температуре и влажности на станциях в Восточных (а) и Западных (б) Альпах по данным наземных наблюдений за период с 13.11.2022 по 15.11.2022 год

Максимальная скорость ветра была зафиксирована на станции Зальцбург (Восточные Альпы), она составляла 12 м/с. Это также не является высоким значением для фенового ветра, и чтобы зафиксировать максимальные значения необходимо выбирать станции, расположенные на больших высотах.

При анализе всех данных по станциям внимание обращалось и на наличие или отсутствие облачности на подветренной стороне. Большое внимание было уделено поиску чечевицеобразных (линзовидных) облаков, также известных как лентикулярные облака, так как они обусловлены образованием горных волн (орографических волн), вызванных взаимодействием воздушных потоков и препятствия. Эти облака являются индикаторами турбулентности и устойчивых нисходящих и восходящих потоков.

Чечевицеобразные облака наблюдались 14 ноября 2022 года на станции Лофер (Австрия) в 13:00 и на станции Кримль (Австрия) в 10:00. Метеорологические параметры на станциях указаны в таблице 3.2.1. На рисунке 3.2.17 показано местоположение станций на спутниковом снимке с платформы Worldview.



Рисунок 3.2.17 – Географическое расположение станций на подветренной стороне в Альпах, наложенное на спутниковый снимок с платформы Worldview за 14.11.2022 год

Таблица 3.2.1 – Таблица метеорологических параметров на станциях 11140 Лофер и 11136 Крымль в день действие фенового ветра

Станция	11140 Лофер	11136 Крымль
Дата/местное время	2022 г. 14 ноября /13:00	2022 г. 14 ноября/10:00
Температура (°C)	14.4	10
Атмосферное давление на уровне станции (мм.рт.ст.)		676.7
Относительная влажность (%)	46	43
Направление ветра (румбы)	Ветер, дующий с запада-юго-запада	Ветер, дующий с запада
Скорость ветра (м/с)	3	4
Общая облачность (%)	20-30	10 или менее, но не 0
Слоисто кучевые, слоистые, кучевые или кучево-дождевые облака	Слоисто-кучевых, слоистых, кучевых или кучево-дождевых облаков нет	
Высота основания самых низких облаков (м)	2500 и более, или облаков нет	
Высококучевые, высокослоистые или слоисто дождевые облака	Ключья (часто чечевицеобразные) высококучевых просвечивающих, непрерывно изменяющихся; расположены на одном или более уровнях	
Перистые, перисто-кучевые или перисто-слоистые облака	Перистые нитевидные, иногда когтевидные, не распространяющиеся по небу	Перистых, перисто-кучевых или перисто-слоистых нет.
Горизонтальная дальность видимости (км)	71	15
Количество выпавших осадков (мм)	Осадков нет	

3.3 Расчет чисел Фруда

Числа Фруда в работе были рассчитаны для анализа поведения воздушных потоков при взаимодействии с горным хребтом по формуле:

$$Fr = \frac{\bar{U}}{NH}, \quad (3.1)$$

где $\bar{U}$ – средняя по слою (от 1000 до 850 гПа) скорость ветра в м/с,

H – характерная высота горы (для Альп это ~2000 м),

N – частота Брента-Вейселя.

Частота Брента-Вейселя выражается по следующей формуле:

$$N^2 = \frac{g}{\bar{\theta}} \frac{d\bar{\theta}}{dz}, \quad (3.2)$$

где $\bar{\theta}$ – средняя по слою (от 1000 до 850 гПа) потенциальная температура.

Результаты расчетов для случая Северного фена:

10868 Мюнхен-Обершлисхайме $Fr = 1,3$ $N = 0,006$

10739 Штутгарт $Fr = 1,2$ $N = 0,008$.

Результаты расчетов для случая Южного фена:

16045 Риволто $Fr = 0,2$ $N = 0,01$

10739 Новара Камери $Fr = 0,2$ $N = 0,01$

Число Фруда также было рассчитано для отобранных случаев Северного и Южного фена, найденных по спутниковым снимкам в ходе выполнения работы. Результаты расчетов представлены в таблице 3.3.1 и 3.3.2. Частота Брента-Вейселя в таблице не указана, так как все получившиеся значения равны или примерно равны 0,01. Это число указывает на относительно нейтральную атмосферу на наветренной стороне, в которой вертикальные перемещения воздуха происходят с небольшим сопротивлением. При таком состоянии атмосферы могут развиваться конвективные явления, что приводит к формированию облачности и выпадению осадков.

Таблица 3.3.1 - Расчет чисел Фруда для Северного фена с 2018 по 2022 год

	2018				2019		2020		2021			2022	$\overline{Fr}$
декабрь	24	30	4	9	10		-		20	30	11	23	
Fr	0,5	0,5	0,7	1,4	0,9		-		0,1	0,7	0,5	0,6	0,7
январь	22				12	5	4	29	18		13	17	22
Fr	0,3				0,7	1	0,5	1,4	0,6		0,8	0,9	0,3
февраль	-				12	22	3	14	-			1	7
Fr	-				1,1	0,4	0,5	0,6	-			0,9	1
март	21				15		3	4	7	17		-	
Fr	0,2				0,7		0,6	0,7	1,5	0,3		-	
$\overline{Fr}$	0,6				0,8		0,8		0,5		0,7		0,7

Таблица 3.3.2 - Расчет чисел Фруда для Южного фена с 2018 по 2022 год

	2018			2019		2020		2021		2022	$\overline{Fr}$
октябрь	15			29	31	20	15	3	30	21	14
Fr	0,2			1	0,2	0,2	0,2	0,7	0,1	0,5	0,2
ноябрь	5	6	11		4	23	-		-		14
Fr	0,4	0,4	0,3		0,2	0,5	-		-		0,2
апрель	12	27	4		23	24	3	6	10	24	
Fr	0,3	0,2	0,2		0,5	0,4	0,3	1,4	0,3	0,6	0,5
май	12		27		8	17	11		9	-	
Fr	0,2		0,2		0,4	0,5	0,9		0,2	-	
$\overline{Fr}$	0,3			0,4		0,8		0,3		0,3	0,4

Число Фруда на наветренной стороне горного препятствия сообщает о балансе между инерционными и гравитационными силами в воздушном потоке. Высокие значения ($Fr > 1$) указывают на преобладание инерционных сил и склонность потока перетекать горный хребет, низкие значения ($Fr < 1$) указывают на преобладание гравитационных сил и возможность блокирования или обхода потока вокруг горного препятствия. Числа Фруда меньше единицы считаются идеальными условиями в нашем случае. Благодаря

расчетам мы получили среднее Число Фруда для Северного фена – равное 0,7 и для Южного – равного 0,4. Это значит, что мы можем использовать полученные значения при проверке или прогнозе случая фенового ветра в дальнейшем.

Был рассчитан также Индекс Фена по следующей формуле (1). Но данный индекс не зарекомендовал себя, так как в полученных результатах он варьировался от 0 до 0,2, что по градации определяется как слабый феновый эффект. Предполагается, что индекс дал низкие значения ввиду географических особенностей Альпийского региона. Расстояния между станциями, данными которых мы пользовались при расчетах, вероятно, слишком большие. Пример расстояния между станциями и вертикального разреза Альпийского хребта между Зальцбургом и Удине приведен на рисунке 3.3.1. Расстояние составляет 194 км с максимальной высотой подъема 2804 м над уровнем моря. Южный регион Альп значительно отличается климатически от северного, поэтому, для использования индекса лучше выбирать меньшее расстояние между метеорологическими станциями.

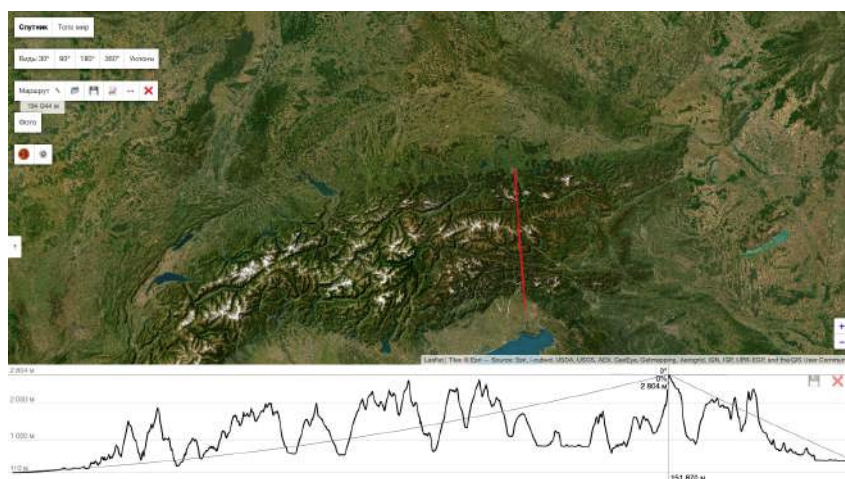


Рисунок 3.3.1 – Изображение расстояния и вертикальный профиль между станциями Зальцбург и Удине

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленная в начале данной работы цель, а именно анализ условий формирования и действия фенового ветра была достигнута.

Для успешного достижения цели были решены следующие задачи:

1. На основании визуального дешифрирования спутниковых изображений в различных каналах электромагнитного спектра был сформирован архив спутниковых изображений с феновым эффектом за период с 2018 по 2022 годы. Всего в результате исследования было дешифрировано 147 случаев, из них 65 случаев относятся к Северному фену и 82 случая относятся к Южному фену в Альпах.

2. Подробно рассмотрены и описаны примеры Северного и Южного фена.

3. На основании данных реанализа MERRA-2 и модели ECMWF был сформирован архив карт, по которым выполнен анализ условий формирования фена. Были использованы карты поля давления, поля ветра, конвергенции и дивергенции, термического фронтального параметра и карты распределения осадков.

4. Для валидации полученных результатов дешифрирования был рассчитан ряд параметров, определяющих условия формирования фенового ветра, а именно –числа Фруда, частота Брента-Вяйсяля и Индекс Фена, а также построены Диаграммы Фена.

5. Выполнен анализ данных аэрологического зондирования и инструментальных измерений на нескольких станциях с наветренной и подветренной стороны.

6. Произведен комплексный анализ всех полученных данных.

В ходе исследования было установлено, что Южный фен в Альпах встречается чаще, чем Северный и характеризуется более высокими скоростями ветра, но при этом, относительная влажность на подветренном склоне горного

хребта при Южном фене снижается в меньшей степени из-за более влажного исходного состояния воздушных масс, пришедших со Средиземного моря. Также установлено, что событие Северного фена чаще происходит в январе, а Южного в октябре.

Анализ полученных характеристик показал, что Северный фен формируется при значениях числа Фруда 0,6, а Южный при значениях 0,35. При этом значения числа Фруда, близкие к 0, характеризуют ситуацию формирования фена. Также можно сделать вывод о том, что Южный фен в целом характеризуется более высокими скоростями ветра, т.к. значения числа Фруда при Южном фене имеют более низкие значения. Значения частоты Брента-Вейселя также очень близки к нулю, что характеризует состояние атмосферы близкое к нейтральной и возможности возникновения турбулентности.

Сравнение между данными аэрологического зондирования и инструментальных измерений на станциях в Западных и Восточных Альпах с наветренной и подветренной стороны показало, что феновый эффект может оказывать влияние на несколько районов одновременно, которые могут быть расположены в нескольких сотнях километров друг от друга.

Анализ снимков в различных диапазонах электромагнитного спектра позволил более точно определить типы облачности, формирующиеся при возникновении феновых ветров. Также использование спутниковых изображений в каналах водяного пара 7,3 мкм и 6,7 мкм зарекомендовало себя как надежный метод выявления зоны действия фена.

Комплексный анализ полученных спутниковых изображений, карт реанализа, данных аэрологического зондирования, инструментальных измерений, а также расчет чисел Фруда и построение Диаграммы Фена продемонстрировал достоверность полученных результатов дешифрирования спутниковых мультиспектральных изображений и целесообразность использования данных спутниковой съемки при анализе фенового эффекта, особенно в отдаленных и малонаселенных районах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бурман, Э.А. Местные ветры. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. - 342 с.
2. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. / Воробьев В.И., Кузьменко В.И. Ленинград: Гидрометеиздат. – 1991. – 616 с.
3. Герман М.А. Спутниковая метеорология. Основы космических исследований в метеорологии.– Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. – 361 с.
4. Говердовский В.Ф. Космическая метеорология с основами астрономии. / Говердовский В.Ф., Рейнгеверц О.Д. – Санкт-Петербург, 1995 – 218 с.
5. Говорушко С.М. Влияние погодно-климатических условий на биосферные процессы. – Владивосток: Тихоокеанский институт географии ДВО РАН. – 2012 г. – 24 с.
6. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1977 – 712 с.
7. Иванов А.Ю. Местные кatabатические ветры Российской Федерации и их наблюдение с помощью космической радиолокационной съемки. – Исследование Земли из, 2019, №5, с. 15-35
8. Использование данных о мезомасштабных особенностях облачности в анализе погоды. [под ред. Н.Ф. Вельтищева] / П. Амбрози, Н.Ф. Вельтищев, Г. Гетц, Х. Ноймайстер, Т. Рукану, В.Г. Шаров – Ленинград: Гидрометеиздат, 1973 – 712 с.
9. Кобышев, Н.В. Климатология/ Н.В. Кобышев, С.И. Костин, Э.А.Струнников. – Л.: Гидрометеиздат, 1980.
10. Погода и условия полетов в горах: монография/ Здорик Ю. М., Распутиков А. С. – Москва: Изографус, 2003. – 359 с.
11. Калинин Н.А. Космические методы исследований в метеорологии. / Н.А. Калинин, Н.И. Толмачева. – Пермь: Пермский государственный университет. – 2005. – 348 с.

12. Лагутин А.А. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности ч.1. MODIS. / А. А. Лагутин, Ю. А. Никулин, А. П. Жуков, Ал. А. Лагутин, А. Н. Резников, В. В. Синицин, И. А. Шмаков. – Барнаул: Алтайский государственный университет. – 2007. – Том 12, №2. – 67-89 с.
13. Прох Л.З. Словарь ветров. – Ленинград: Гидрометеиздат. – 1983.
14. Фёны горного Алтая. [под ред. В.И. Русанова] Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 139 с.
15. Хандожко Л.А. Региональные синоптические процессы. Учебное пособие. – Ленинград: ЛГМИ, 1988 – 103 с.
16. Хромов С.П. Метеорология и климатология: учебник – 7-е изд. / Хромов С.П., Петросянц М.А. – Москва: Издательство Московского университета: Наука. – 2006 – 584 с.
17. Andrew D. Elvidge. The causes of foehn warming in the lee of mountains: Andrew D. Elvidge, Ian A. Renfrew // American meteorological society. – 2016. – 456-466 с.
18. Ashmore, D. W., Hubbard, B., Luckman, A., Kulesa, B., Bevan, S., Booth, A., et al. (2017). Ice and firn heterogeneity within Larsen C Ice Shelf from borehole optical televiewing. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122, 1139–1153. <https://doi.org/10.1002/2016JF004047>
19. Bozkurt, D., Rondanelli, R., Marin, J. C., & Garreaud, R. (2018). Foehn event triggered by an atmospheric river underlies record-setting temperature along continental Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JD027796>
20. Cetti, C., Buzzi, B., and Sprenger, M. 2015. Climatology of Alpine north foehn. *Sci. Rep. MeteoSwiss* 100, 76.
21. David M. Gaffin. Foehn winds that produced large temperature differences near the Southern Appalachian Mountains. National Weather Service, Morristown, Tennessee. – 2007. – 16.

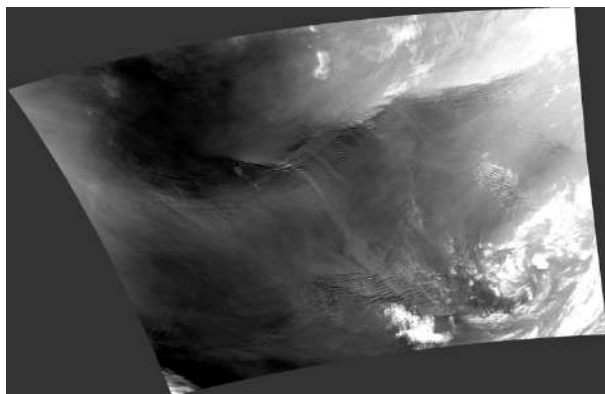
22. Drechsel, S. and Mayr, G. J. 2008. Objective Forecasting of Foehn Winds for a Subgrid-Scale Alpine Valley. *Weather Forecast.* 23, 205–218.
23. Dürr, B: 2008, Automatisiertes Verfahren zur Bestimmung von Föhn in Alpentälern, *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, 223, 22 pp.
24. Forstner, B. (2001): Untersuchung von Gebirgswellen durch Auswertung von Segelflug und Radiosonden Daten, *Dipl. Arb. IMGW*
25. Fratianni S., Cassardo C./ Cremonin R., Climatic cbaracterization of foehn episodes in Piedmont, Italy. (IT ISSN 0391-9838, 2009)
26. John T. Abatzoglou. Global climatology of synoptically-forced downslope winds: John T. Abatzoglou, Benjamin J. Hatchett, Paul Fox-Hughes, Alexander Gershunov, Nicholas J. Nauslar // *International Journal of Climatology*. – 2021. – 41. – 31-50 c.
27. Jutta Vüllers, Georg J. Mayr, Ulrich Corsmeier, and Christoph Kottmeier: Characteristics and evolution of diurnal foehn events in the Dead Sea valley./ *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 18169–18186, 2018 <https://doi.org/10.5194/acp-18-18169-2018>
28. Kuhr M. (ed.) (1989): *Föhnstudien*, Wiss. Buchges. Darmstadt
29. Nishi, A., & Kusaka, H. (2023). Future changes of the extreme high-temperature events influenced by foehn winds in Niigata, Japan. *Atmospheric Science Letters*, 24(2), e1137. <https://doi.org/10.1002/asl.1137>
30. Piringer, M., K. Baumann, U. Pechinger, und S. Vogt, 2001: Meteorological and ozone sounding experience during a strong foehn event – a MAP case study. *Meteorol. Z.*, 10, 445-455.
31. Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C., & Wang, W. (2002). An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15, 1609–1625.

32. Richner, H. and Hächler, P. 2013. Understanding and forecasting alpine foehn. In: Mountain Weather Research and Forecasting (eds. F. Chow, S. De Wekker, and B. Snyder). Springer Atmospheric Sciences. Springer, Dordrecht.
33. Seibert P. (1990): South Foehn Studies since ALPEX Experiment, Meteorol. Atmos. Phys. 43, 91pp
34. Shestakova A. A. et al.: The foehn effect during easterly flow over Svalbard. Atmos. Chem. Phys., 22, 1529–1548, 2022// <https://doi.org/10.5194/acp-22-1529-2022>
35. Wilhelm, M: 2012, COSMO-2 Model Performance in Forecasting Foehn: Systematic Processoriented Verification, Veröffentlichungen der MeteoSchweiz, 89, 64pp.
36. Zou X, Bromwich DH, Nicolas JP, Montenegro A, Wang S-H. West Antarctic surface melt event of January 2016 facilitated by föhn warming. Q J R Meteorol Soc 2019;1–18. <https://doi.org/10.1002/qj.3460>
37. Worldview: официальный сайт. – USA. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (даты обращения 25.09.23, 09.10.23, 16.10.23, 15.01.2024, 29.01.2024, 18.02.2024, 13.03.2024, 25.03.2024, 03.04.2024)
38. LAADS DAAC: официальный сайт. – USA. – URL: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/> (дата обращения 15.09.2023)
39. Eumetrain: официальный сайт. - Meteorological Service of Catalonia. - URL: http://eumetrain.org/ePort_MapViewer/ (даты обращения 18.02.2024, 13.03.2024, 16.03.24, 25.03.2024)
40. Ventusky: официальный сайт. – InMeteo, Czech. - URL: <https://www.ventusky.com/ru/about> (даты обращения 19.01.2024, 12.03.2024, 16.03.24, 25.04.2024)
41. Online Weather NG Maps: официальный сайт. – Ibl weather software solutions. - URL: <http://212.232.25.232/ng-maps/> (даты обращения 20.01.2024, 11.02.2024, 16.02.2024, 25.03.2024)

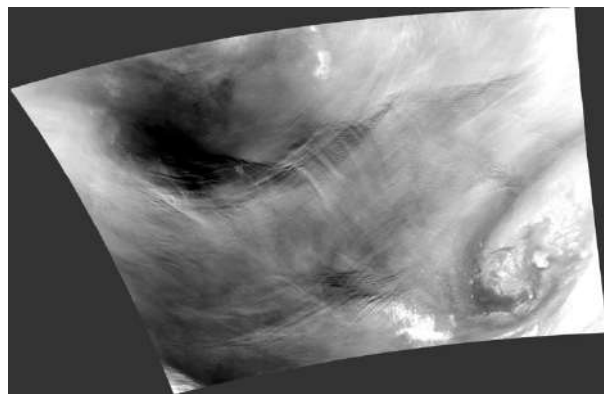
ПРИЛОЖЕНИЕ А



а



б

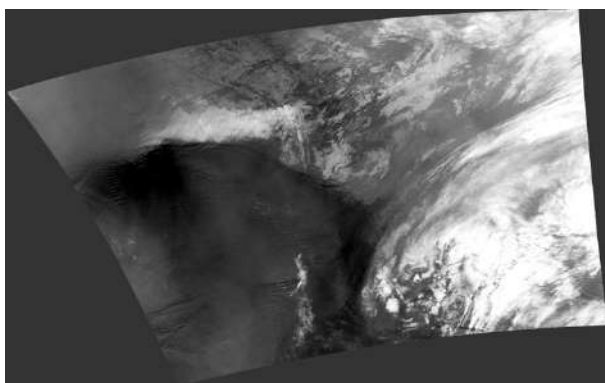


в

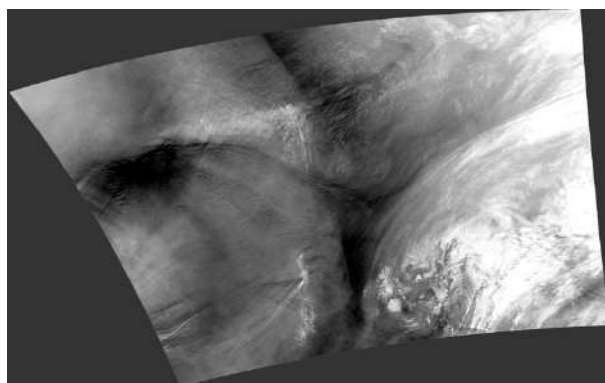
Рисунок А. 1 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 1.02.2022 года 12:45 UTC по данным MODIS Terra, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

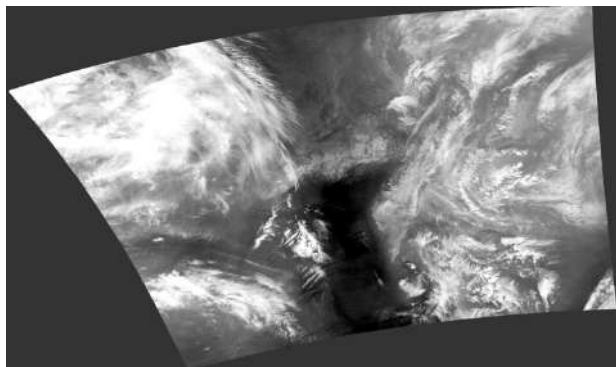


в

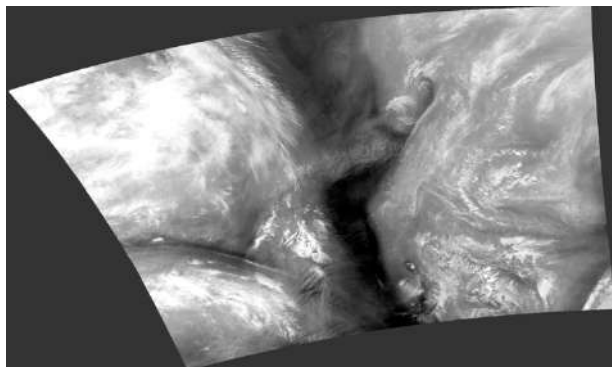
Рисунок А. 2 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 2.02.2022 года 10:00 UTC по данным MODIS Terra, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

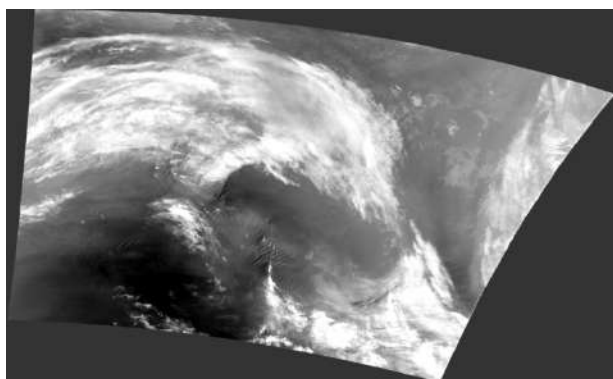


в

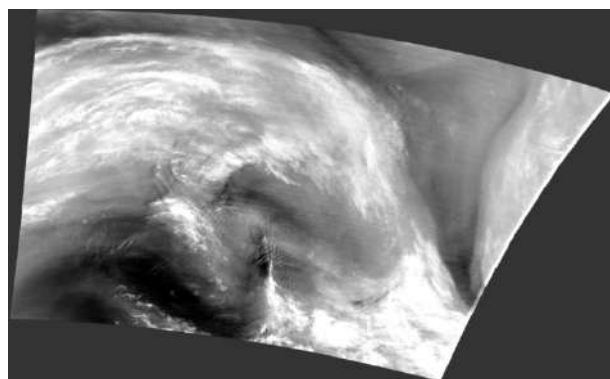
Рисунок А. 3 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 2.01.2018 года 12:15 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

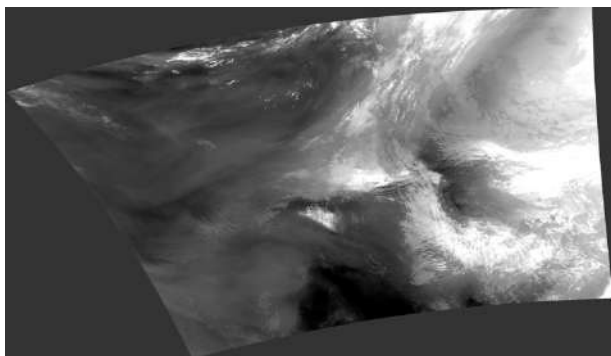


в

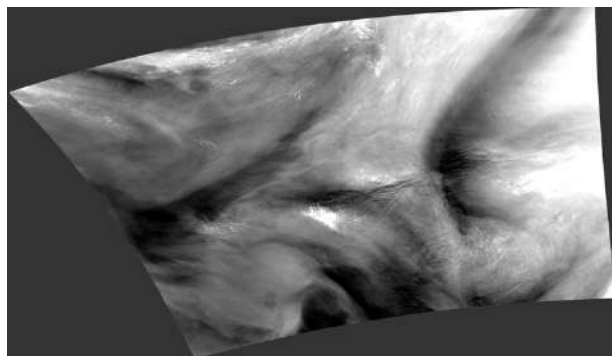
Рисунок А. 4 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 4.01.2018 года 10:20 UTC по данным MODIS Terra, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а

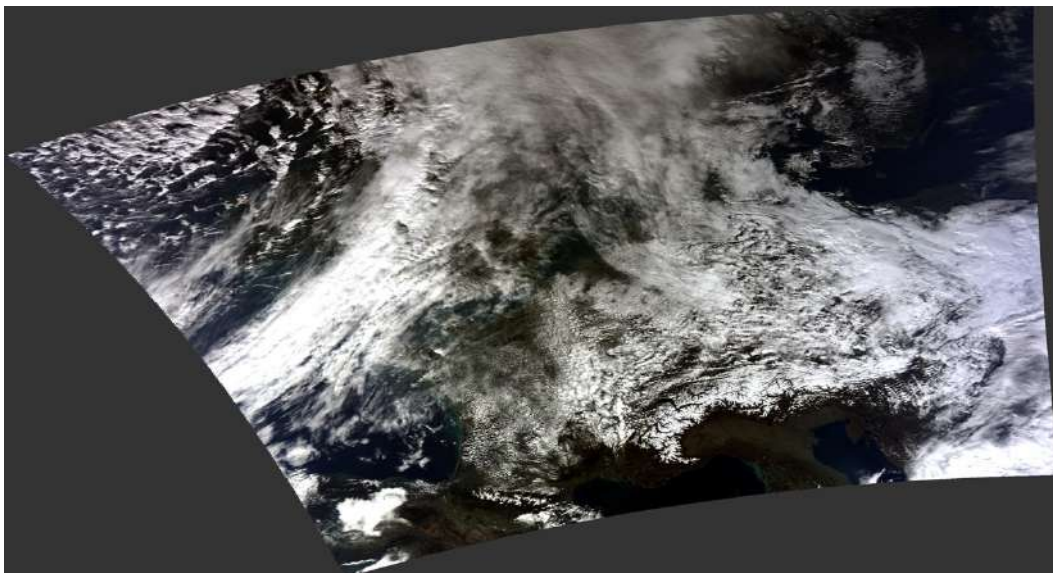


б

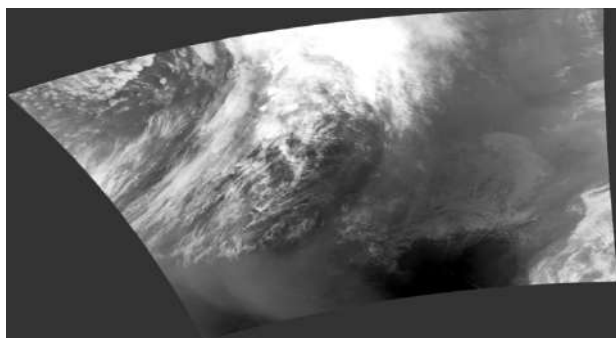


в

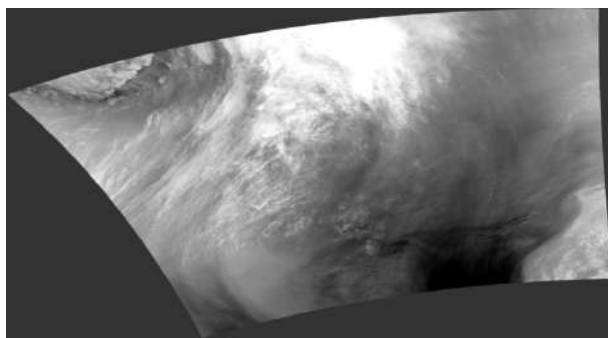
Рисунок А. 5 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 22.01.2022 года 12:10 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

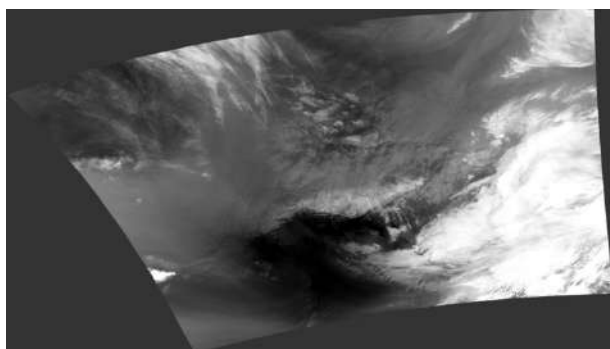


в

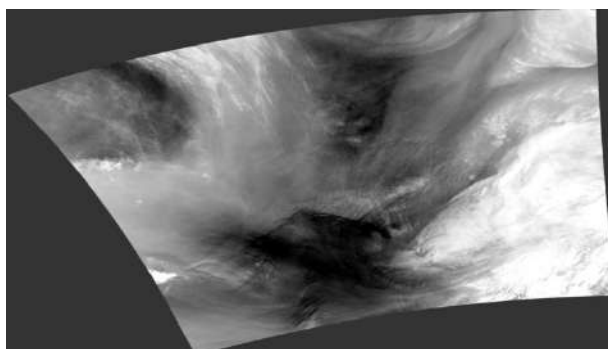
Рисунок А. 6 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 04.02.2020 года 12:35 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а

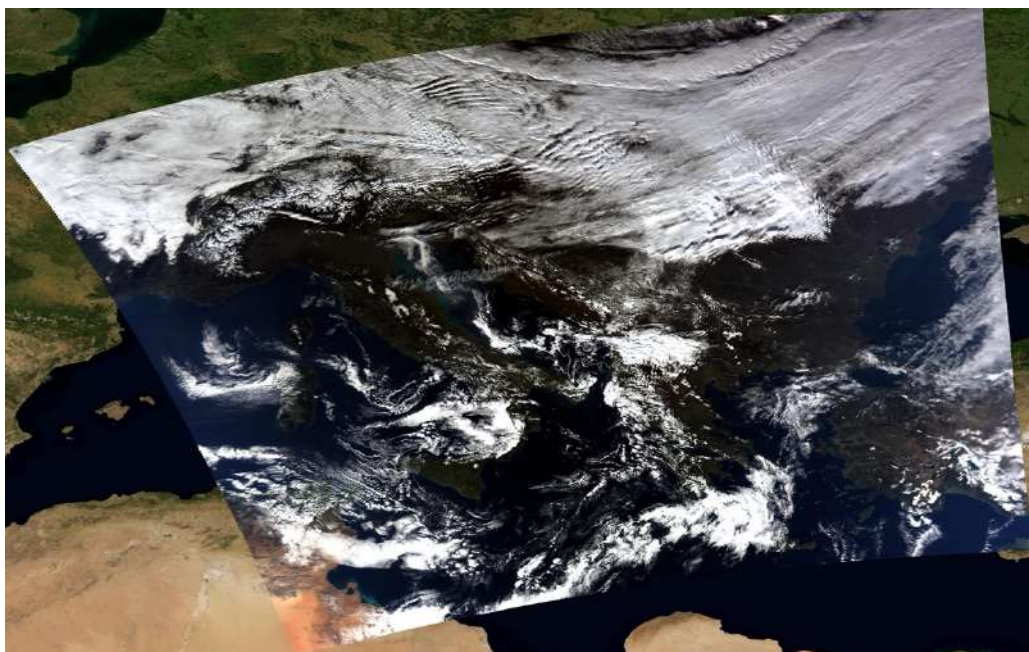


б

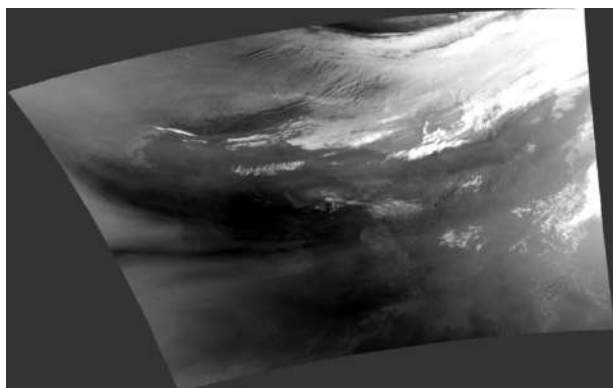


в

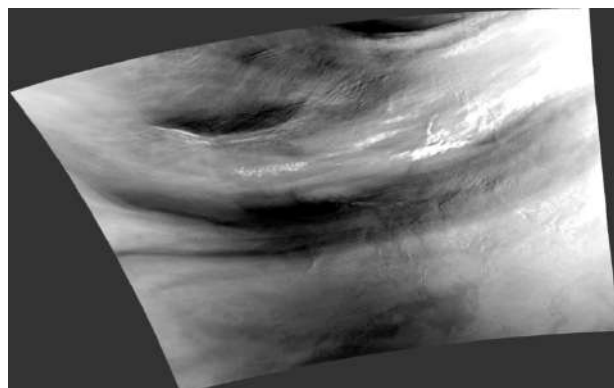
Рисунок А. 7 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 07.02.2022 года 12:10 UTC по данным MODIS Terra, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

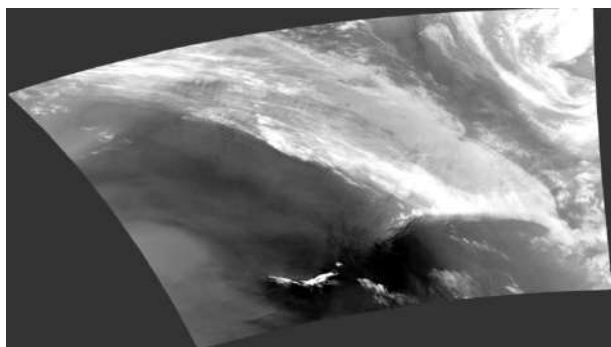


в

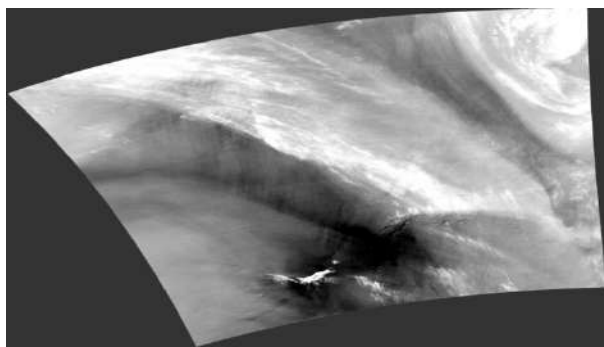
Рисунок А. 8 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 17.01.2022 года 11:50 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а

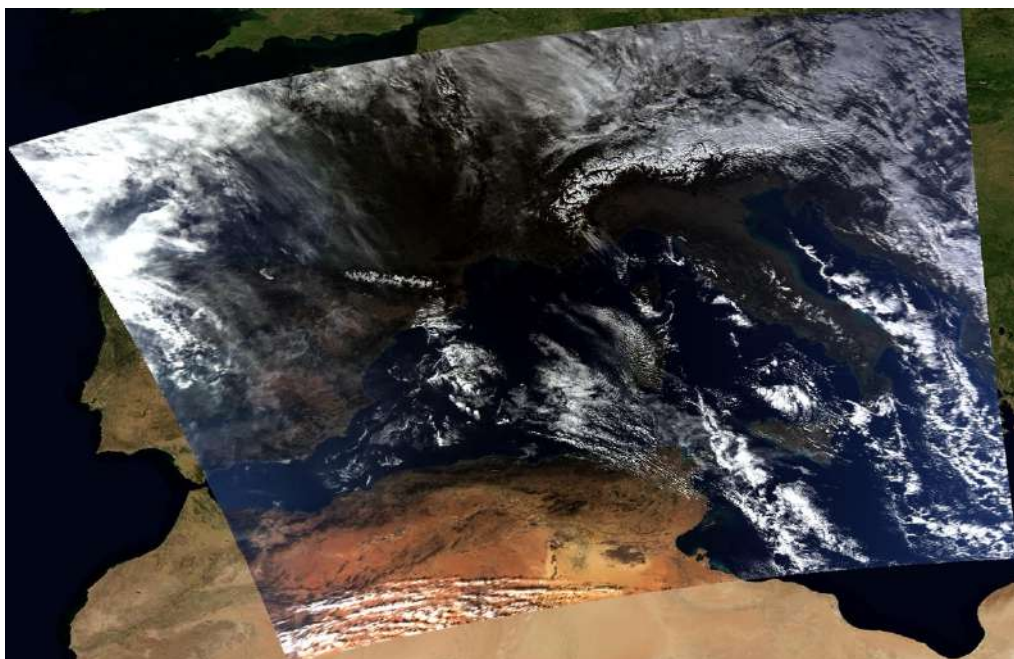


б

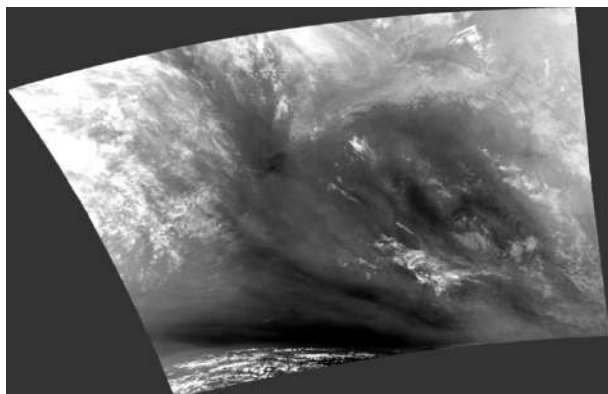


в

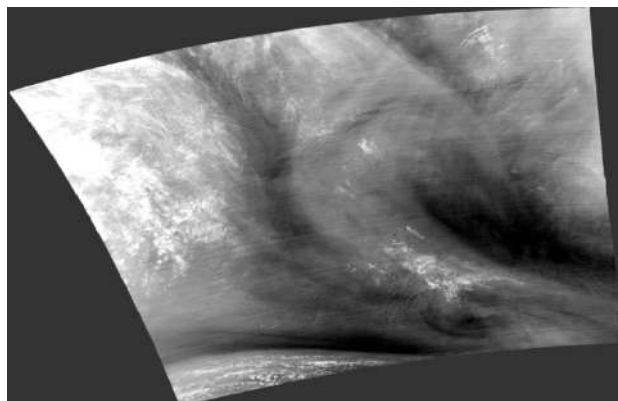
Рисунок А. 9 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 22.12.2023 года 13:00 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

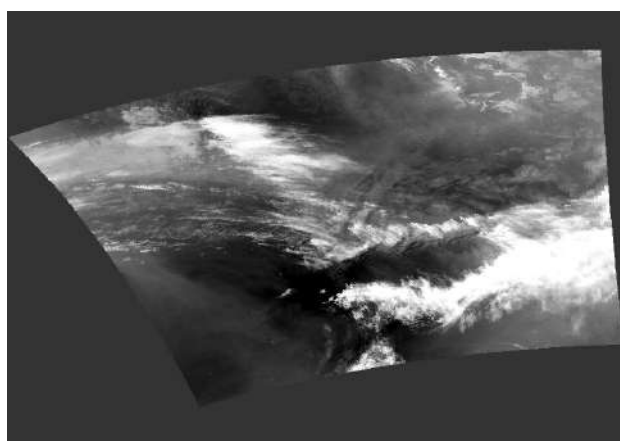


в

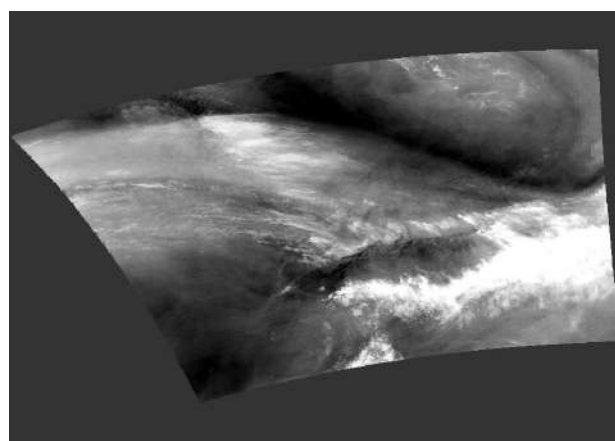
Рисунок А. 10 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 26.11.2023 года 13:00 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

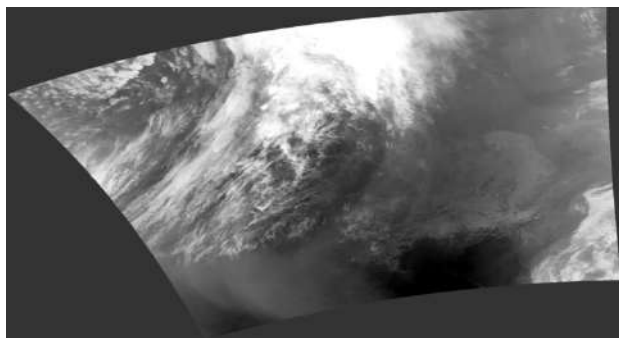


в

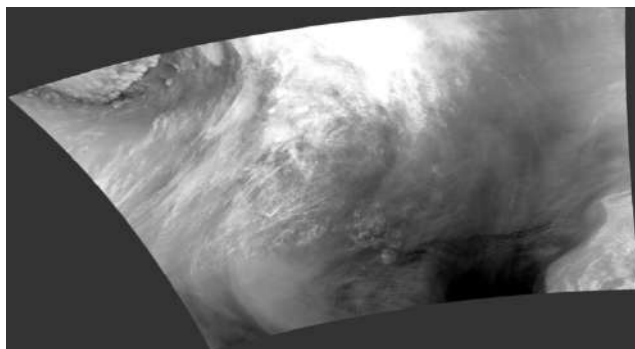
Рисунок А. 11 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 24.01.2024 года 12:50 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

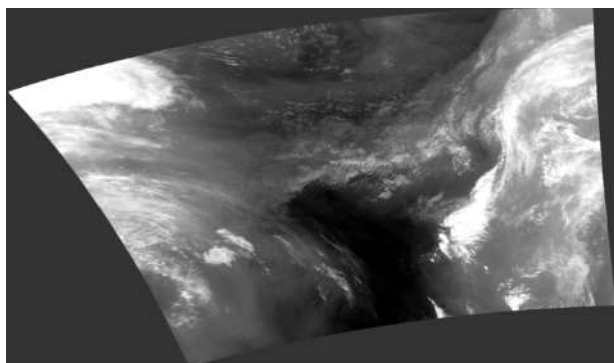


в

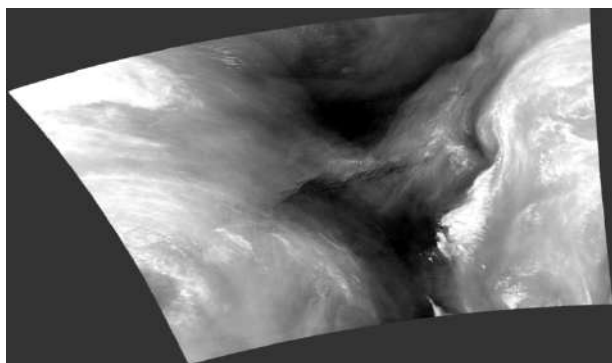
Рисунок А. 12 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 14.02.2020 года 12:35 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

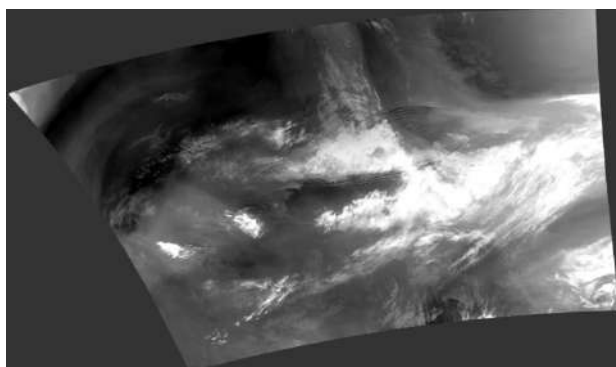


в

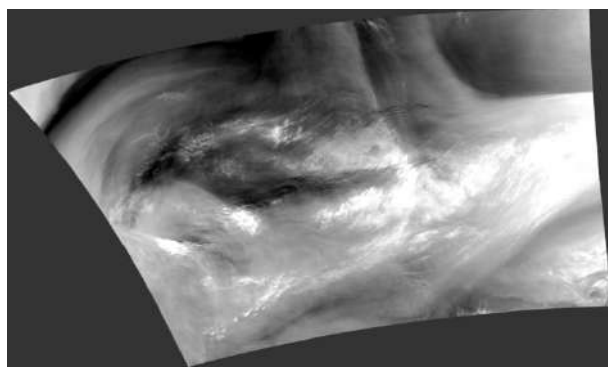
Рисунок А. 13 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 04.12.2018 года 12:15 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

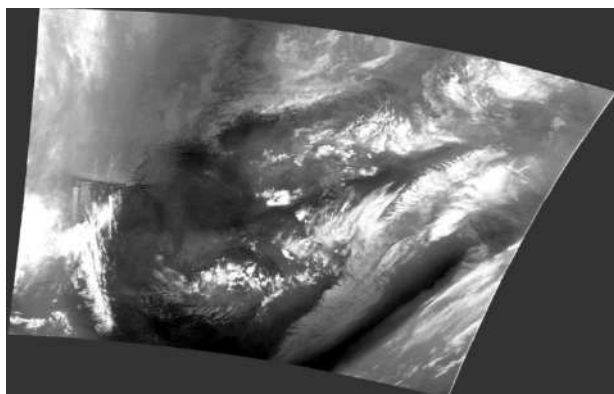


в

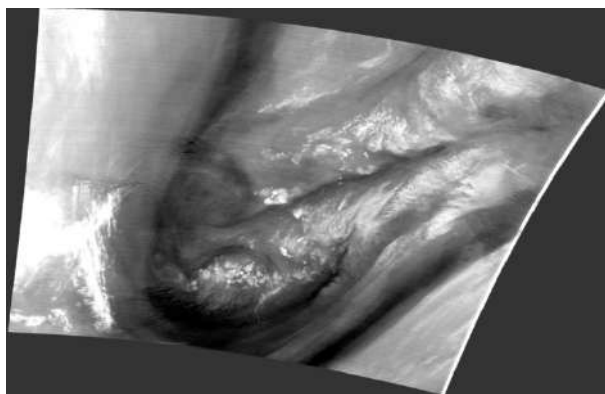
Рисунок А. 14 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 05.01.2019 года 12:15 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



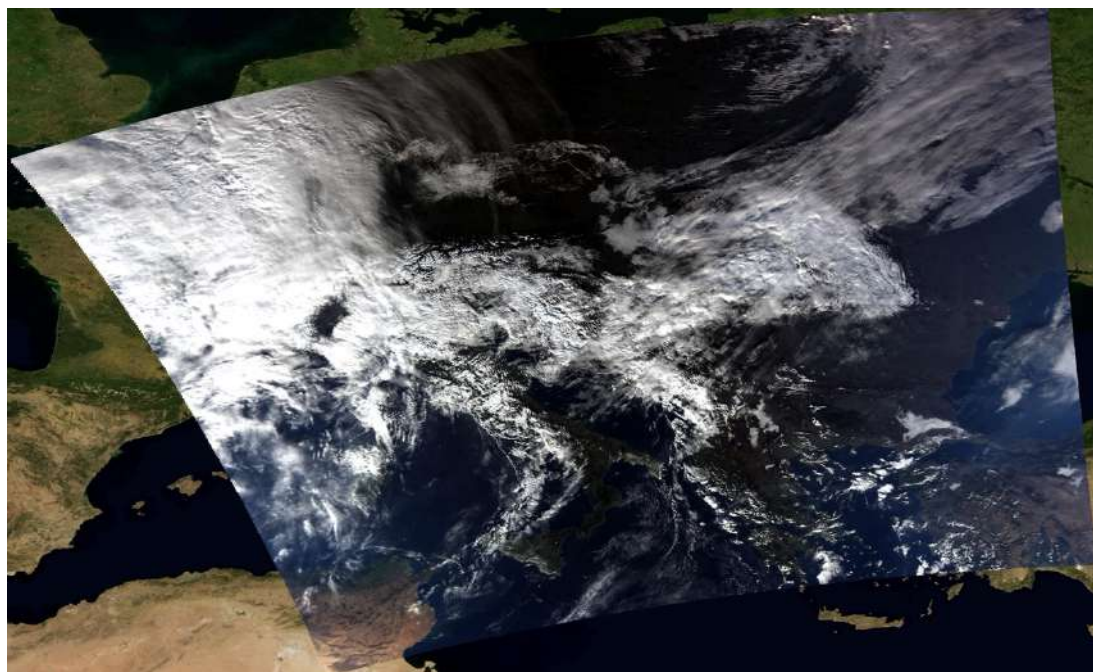
б



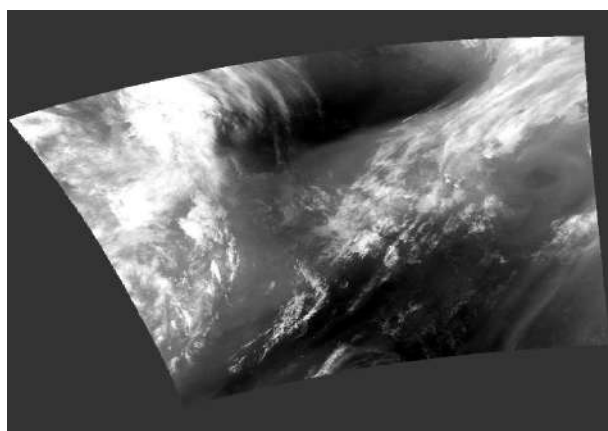
в

Рисунок А. 15 – Спутниковые изображения Северного фена в Альпах от 07.03.2020 года 10:15 UTC по данным MODIS Terra, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм

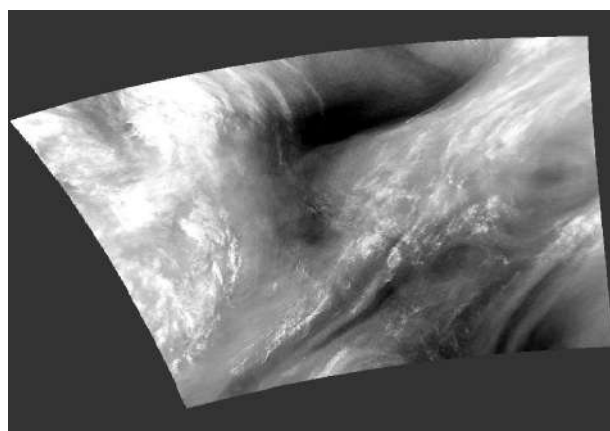
ПРИЛОЖЕНИЕ Б



а



б

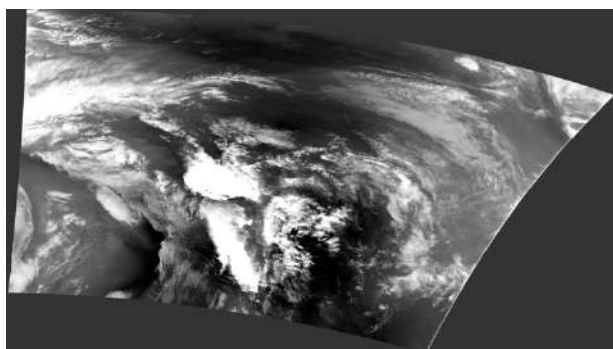


в

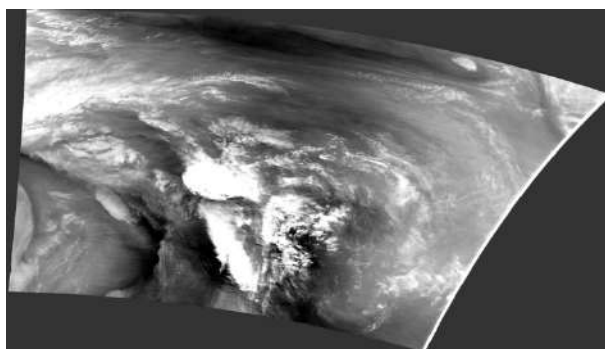
Рисунок Б. 1 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 30.12.2022 года 12:00 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

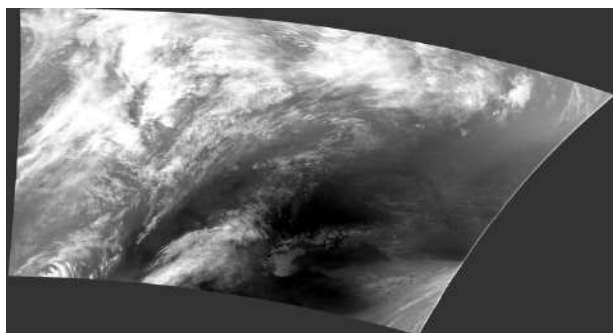


в

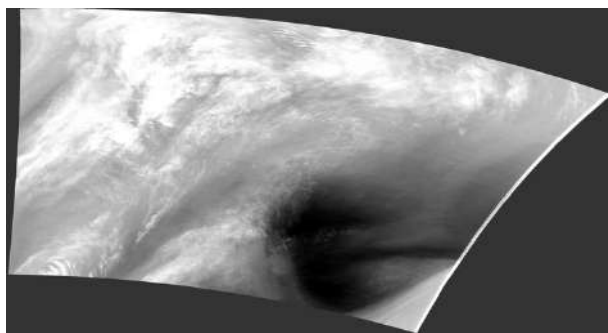
Рисунок Б. 2 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 3.10.2020 года 12:15 UTC по данным MODIS Terra, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

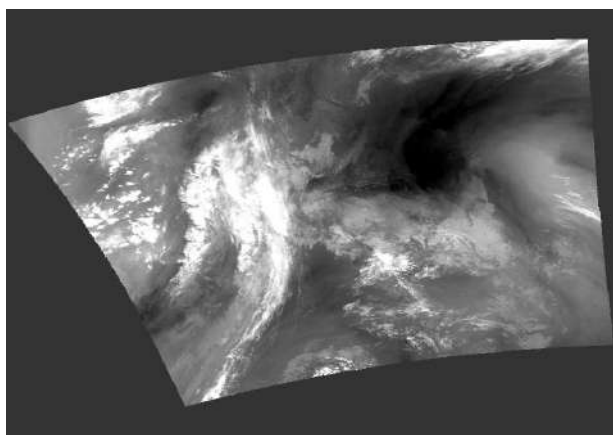


в

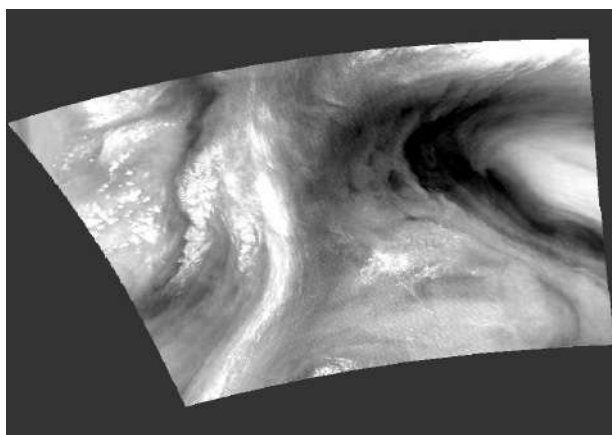
Рисунок Б. 3 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 14.02.2022 года 12:15 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

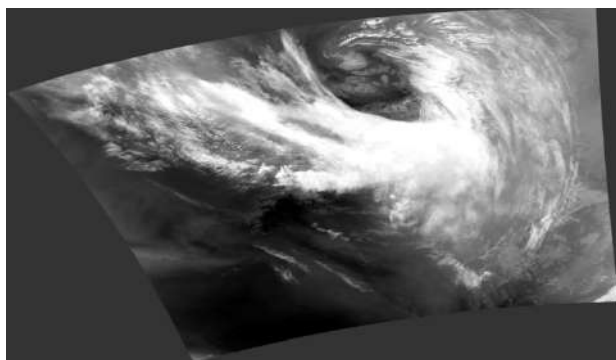


в

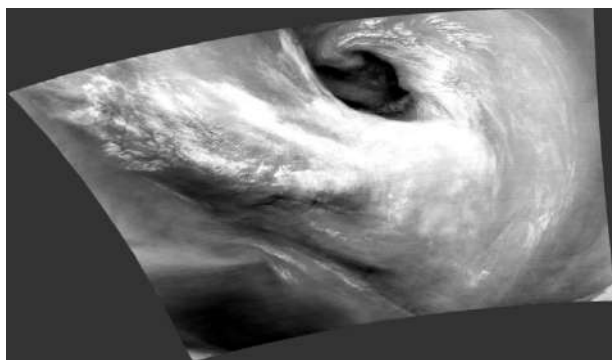
Рисунок Б. 4 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 12.02.2022 года 10:35 UTC по данным MODIS Terra, Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

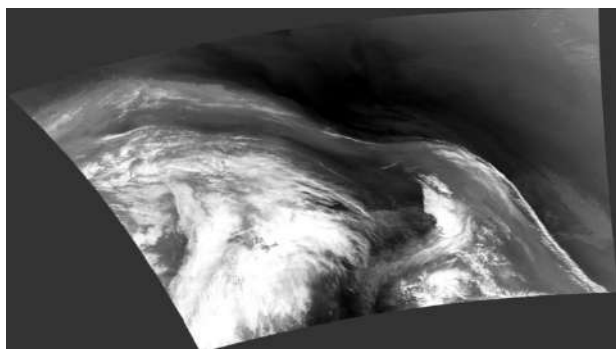


в

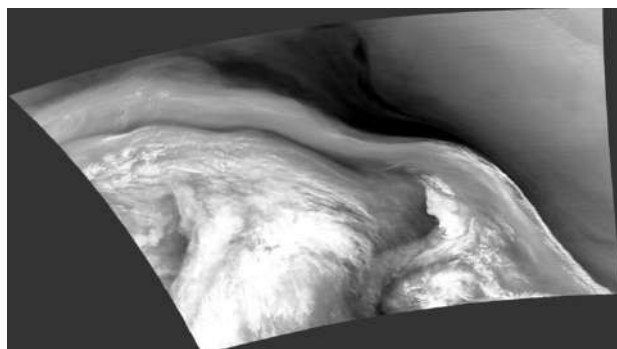
Рисунок Б. 5 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 03.02.2023 года 12:15 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

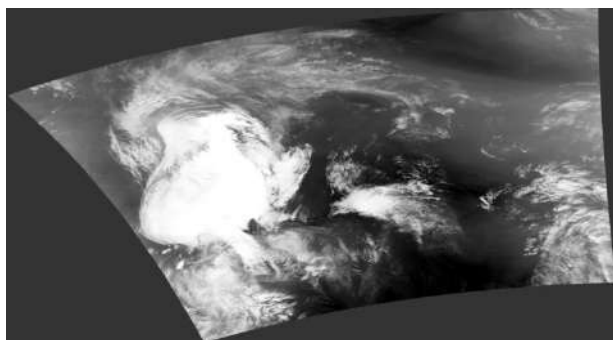


в

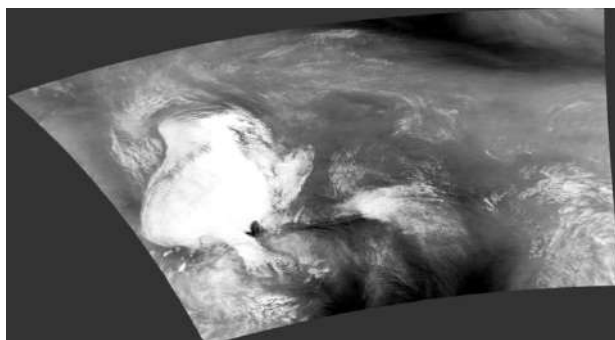
Рисунок Б. 6 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 09.03.2024 года 12:40 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

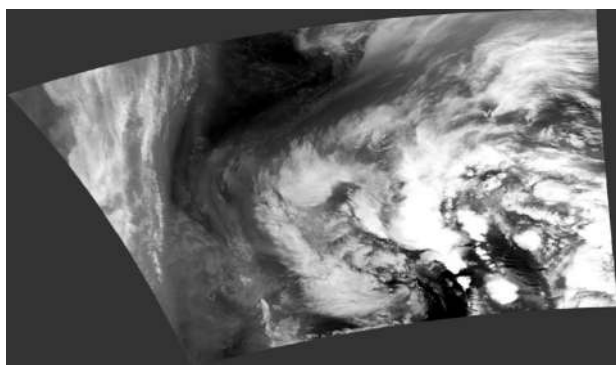


в

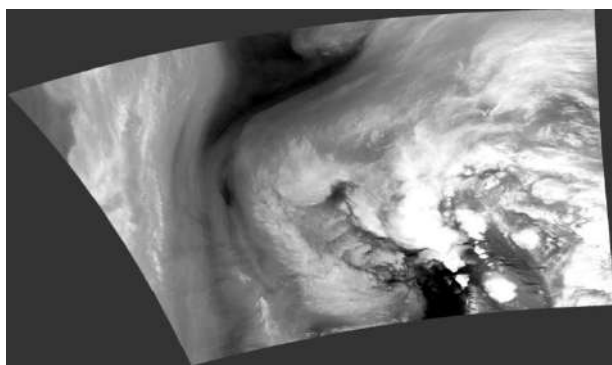
Рисунок Б. 7 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 30.03.2024 года 12:20 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

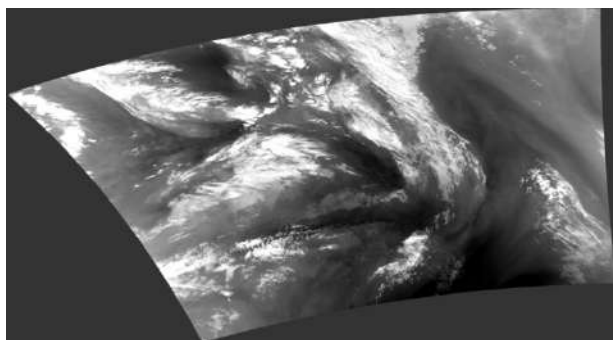


в

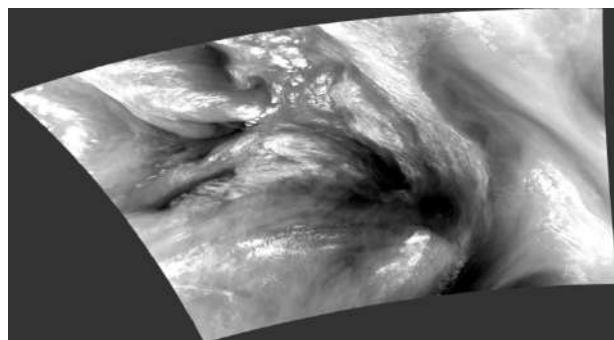
Рисунок Б. 8 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 29.10.2018 года 12:40 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

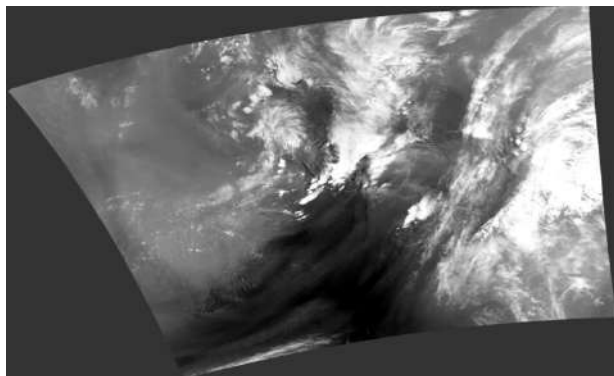


в

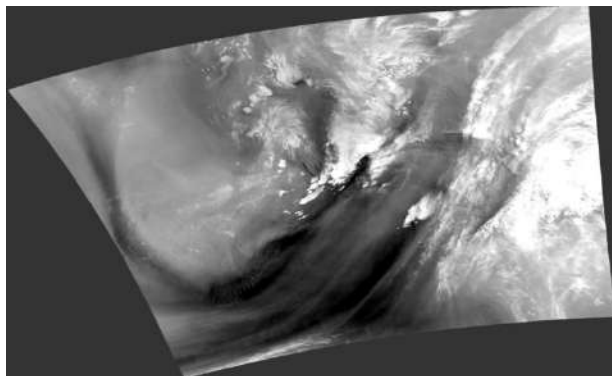
Рисунок Б. 9 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 11.11.2018 года 12:10 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а

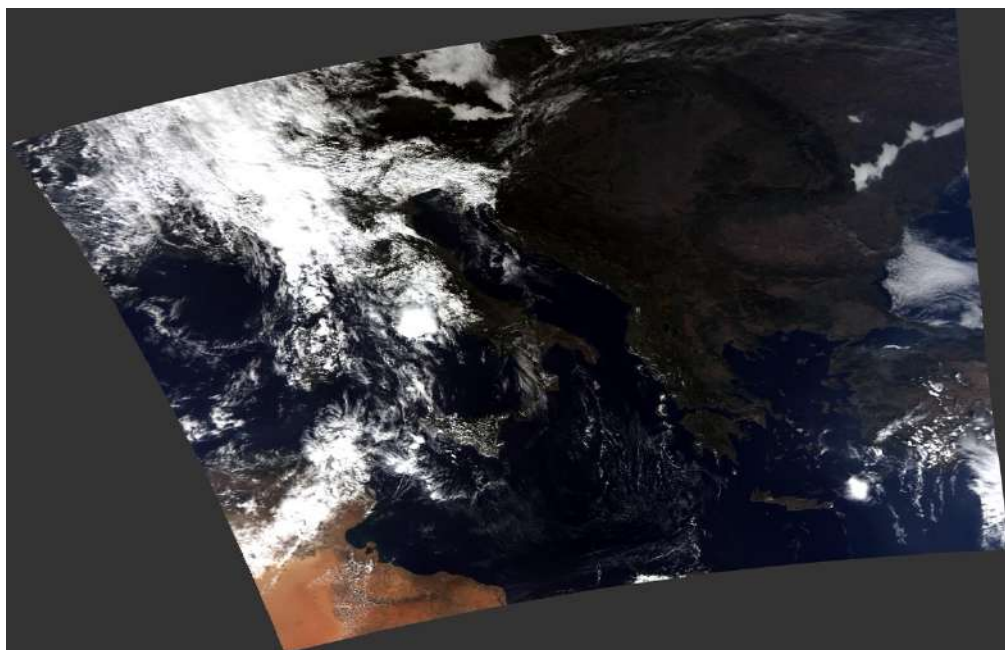


б

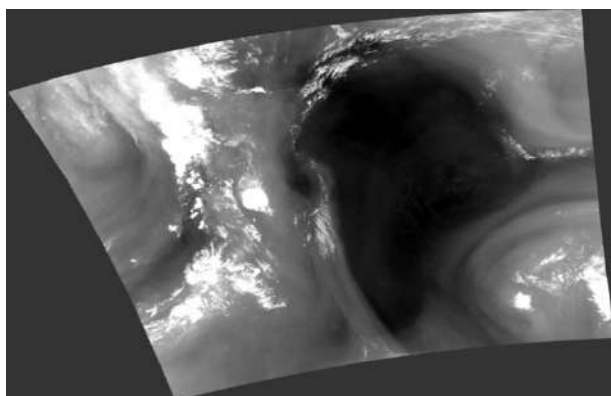


в

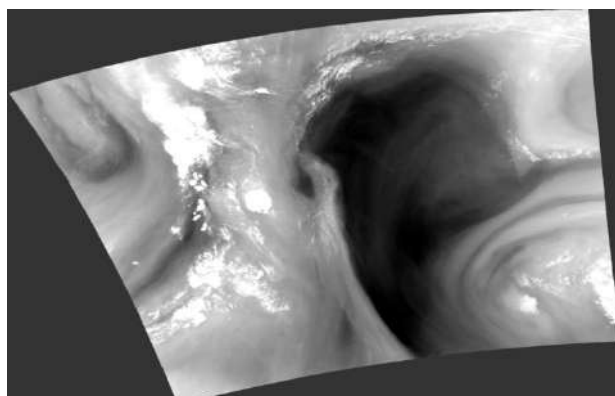
Рисунок Б. 10 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 04.04.2018 года 12:40 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

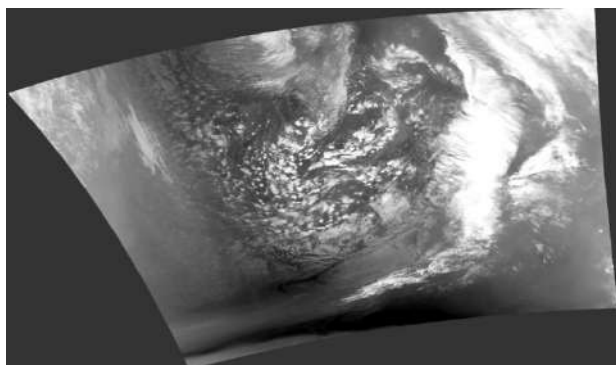


в

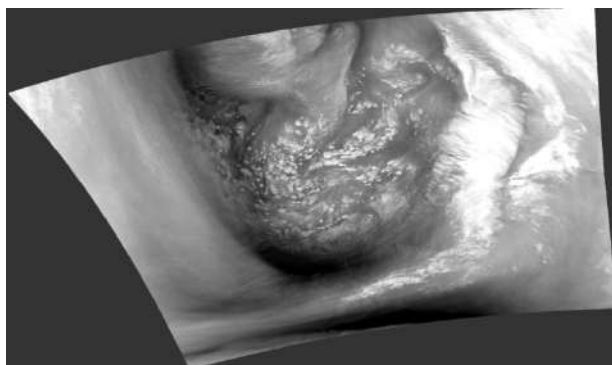
Рисунок Б. 11 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 15.10.2019 года 11:55 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

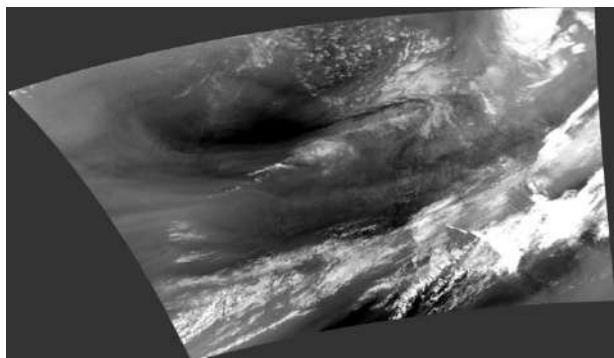


в

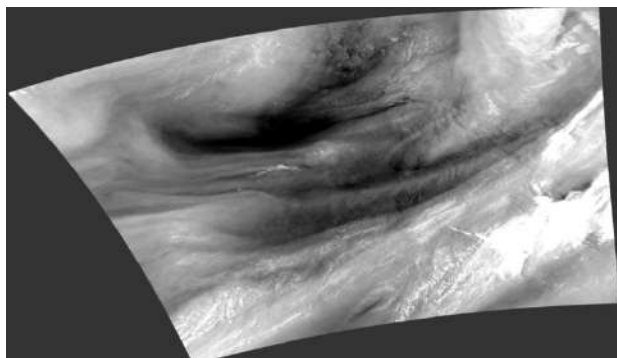
Рисунок Б. 12 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 03.04.2019 года 13:05 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

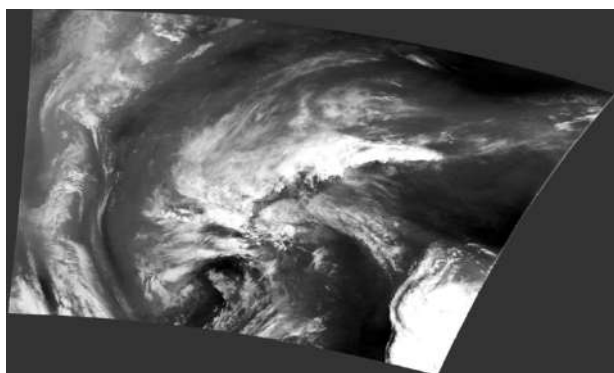


в

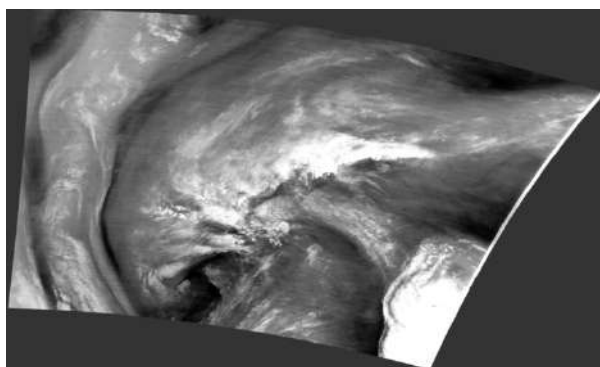
Рисунок Б. 13 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 21.10.2021 года 12:40 UTC по данным MODIS Aqua, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б

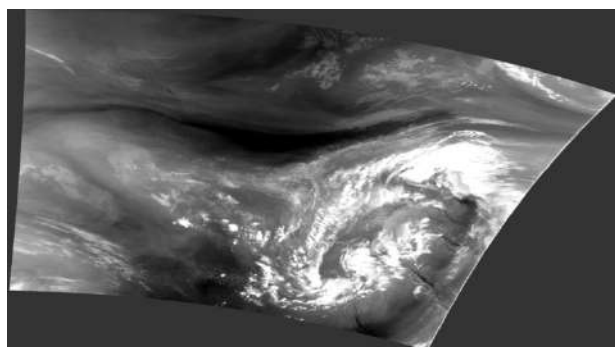


в

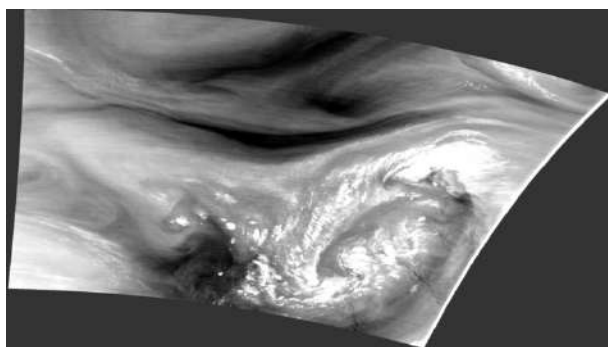
Рисунок Б. 14 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 31.10.2018 года 10:45 UTC по данным MODIS Terra, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм



а



б



в

Рисунок Б. 15 – Спутниковые изображения Южного фена в Альпах от 24.04.2022 года 10:40 UTC по данным MODIS Terra, а – цветосинтезированное, б - в канале водяного пара – 7,3 мкм, в – в канале водяного пара – 6,7 мкм