Министерство науки и высшего образования российской федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Кафедра метеорологических прогнозов ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТ (Магистерская диссертация) На тему: «Фоновые синоптические условия, характерные для видимых и невидимых горных волн» Сполнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Руководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой Кандидат физико-математических наук, доцент
федеральное государственное бюджетное ооразовательное учреждение высшего образования «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Кафедра метеорологических прогнозов ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТ (магистерская диссертация) На тему: «Фоновые синоптические условия, характерные для видимых и невидимых горных волн» и невидимых горных волн» Сполнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Уководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой Кандидат физико-математических наук, доцент
исполнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Кафедрай Карстверафических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) Кандидат физико-математических наук, доцент
Кафедра метеорологический университет» Кафедра метеорологических прогнозов ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТ (магистерская диссертация) На тему: «Фоновые синоптические условия, характерные для видимых и невидимых горных волн» и невидимых горных волн» Тополнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Руководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой
Кафедра метеорологических прогнозов ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТ (магистерская диссертация) На тему: «Фоновые синоптические условия, характерные для видимых и невидимых горных волн» и невидимых горных волн» Сполнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Уководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой
Кафедра метеорологических прогнозов ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТ (магистерская диссертация) На тему: «Фоновые синоптические условия, характерные для видимых и невидимых горных волн» и невидимых горных волн» Кполнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Уководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой исполнись) кандидат физико-математических наук, доцент
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТ (магистерская диссертация) На тему: «Фоновые синоптические условия, характерные для видимых и невидимых горных волн» Исполнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Руководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» заведующий кафедрой исполнись) Кандидат физико-математических наук, доцент
(магистерская диссертация) На тему: «Фоновые синоптические условия, характерные для видимых и невидимых горных волн» Исполнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Руководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» заведующий кафедрой кандидат физико-математических наук, доцент
На тему: «Фоновые синоптические условия, характерные для видимых и невидимых горных волн» Исполнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Руководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» заведующий кафедрой кандидат физико-математических наук, доцент
и невидимых горных волн» Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) уководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой Кандидат физико-математических наук, доцент (чания степень)
Исполнитель Травкин Владимир Леонидович (фамилия, имя, отчество) Руководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой Диамилия, имя, отчество)
(фамилия, имя, отчество) уководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) «К защите допускаю» аведующий кафедрой (подпись) кандидат физико-математических наук, доцент
уководитель кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой Сподпись) кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание) Ефимова Юлия Викторовна (фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой (подпись) кандидат физико-математических наук, доцент
(фамилия, имя, отчество) К защите допускаю» аведующий кафедрой (подпись) кандидат физико-математических наук, доцент
К защите допускаю» аведующий кафедрой (подпись) кандидат физико-математических наук, доцент
аведующий кафедрой (подпись) кандидат физико-математических наук, доцент
(подпись) кандидат физико-математических наук, доцент
кандидат физико-математических наук, доцент
кандидат физико-математических наук, доцент
(VYCHAR CICICHE, YYCHOC SBARNE)
Анискина Олы а георгиевна
(фамилия, имя, отчество)
02 » июня 2023 г.
Санкт-Петербург
2023

Содержание

	Введение	4		
1	ОБЩИЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ И	5		
	ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ			
	ГОРНЫХ МАССИВОВ ПИРЕНЕЙСКОГО			
	ПОЛУОСТРОВА И УРАЛА			
1.1	Климатические и геофизические	8		
	характеристики Пиренейского полуострова			
1.1.1	Пиренейские горы	8		
1.1.2	Кантабрийские горы			
1.1.3	Иберийские горы			
1.1.4	Центральная Кордильера			
1.1.5	Сьерра-Морена			
1.1.6	Андалусские горы			
1.2	Климатические и геофизические	17		
	характеристики Урала			
1.2.1	Полярный Урал	17		
1.2.2	Приполярный Урал			
1.2.3	Северный Урал			
1.2.4	Средний Урал			
1.2.5	Южный Урал			
2	ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ	23		
	ЯВЛЕНИЯ			
2.1	Орографические волны	23		
2.2	Турбулентность	27		
2.2.1	Неорографическая турбулентность	28		

2.2.2	Орографическая турбулентность 2		
2.2.3	Турбулентность ясного неба		
2.3	Явление фёна		
2.4	Явление бора		
3	АНАЛИЗ СИНОПТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ,		
	ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ		
	ВИДИМЫХ И НЕВИДИМЫХ		
	ОРОГРАФИЧЕСКИХ ВОЛН		
3.1	Физические основы съемки ИСЗ в видимом	36	
	диапазоне		
3.2	Физические основы съемки ИСЗ в канале	38	
	водяного пара		
3.3	Анализ архива случаев орографических волн на	39	
	спутниковых снимках		
	Заключение	65	
	Список литературы	67	

ВВЕДЕНИЕ

Горные волны являются одним из самых опасных для авиации явлений, особенно при их формировании в условиях недостаточной влажности, из-за их связи с турбулентностью ясного неба. Спутниковая съемка в каналах, расположенных в вибрационно-вращательной полосе поглощения водяного пара в дальней инфракрасной части спектра, является универсальным инструментом для обнаружения невидимых орографических волн. Сложность прогнозирования данного явления и опасность особенно невидимых горных волн для полетов авиации определяют **актуальность** данного исследования. Определение фоновой синоптической ситуации, указывающей на формирование в районе горного хребта орографической волны, имеет несомненную **практическую** значимость.

В первой главе магистерской диссертации рассматривается понятие климата и типы климатических зон в целом, выделяет ключевые сложности при изучении горного климата. Затем приводит физико-климатические и географические характеристики горных систем Пиренейского полуострова и горной системы Урала, которые в дальнейшем будут использоваться при анализе горных волн в данных районах в практической части работы.

Вторая глава магистерской диссертации посвящена опасным гидрометеорологическим явлениям. В этой главе приводятся и описываются различные опасные явления, с которыми так или иначе можно столкнуться в горной среде.

Третья глава диссертации посвящена анализу синоптических процессов, сопутствующих формированию видимых и невидимых орографических волн и выявлению фоновых ситуаций, характерных этому опасному явлению.

ОБЩИЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНЫХ МАССИВОВ ПИРЕНЕЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА И УРАЛА

Климат – это продолжительная по времени совокупность погодных условий, наблюдаемых в определенных регионах. К числу главных характеристик климата относятся температура на уровне двух метров над уровнем моря, направление и скорость ветра, атмосферное давление, облачность, количество выпавших осадков, влажность воздуха, радиационный баланс местности. Эти величины определяют главные климатообразующие процессы: перенос тепла и влаги, циркуляцию атмосферы [1].

Существуют разные определения климата. В основе целого ряда классификаций климата лежат местные особенности температур и влаги. В России применяется классификация типов климата Б. П. Алисова (Рисунок 1.1) и В.П. Кёппена. Согласно классификации Алисова, выделяется по четыре основных климатических пояса исходя из общей циркуляции атмосферы в каждом полушарии Земли: экваториальный, тропический, умеренный и полярный (арктический и антарктический – для северного и южного полушария соответственно). Между основными зонами находятся переходные пояса - субэкваториальный пояс, субтропический, субполярный (субарктический и субантарктический).



Рисунок 1.1 - Типы климата по классификации Б.П. Алисова

Классификация Кёппена основана на учёте режима температуры и осадков. Согласно этой классификации, существует пять типов климатических зон - зоны с высокими температурами круглый год и большим количеством осадков (А), зоны с незаметным количеством осадков или полным их отсутствием (В), зоны с небольшой разницей температур летом и зимой, и отсутствием постоянного снежного покрова (С), зоны с чётко выраженными границами лета и зимы (D), зоны с постоянным снежным покровом и средними температурами ниже 10°С (Е). [2]

Основная часть Европейского континента лежит в умеренном климатическом поясе. Существуют несколько подвидов умеренного климата: умеренный морской и умеренный континентальный климат. Умеренно морской климат формируется над океаном и распространяется западным переносом воздуха. Данный тип климата отличается относительно невысокими температурными показателями и неоднородным распределением осадков из-за меридиональной направленности горных систем в Европе. Для умеренно континентального климата характерны большие амплитуды температуры и сокращение количества осадков в глуби континента.

Горный климат – климат горной местности до снеговой линии. Важную роль в формировании горного климата играет высота над уровнем моря, широта местности, топографические особенности горной системы.

По метеорологическим показателям на климат горных систем влияет направление доминирующих ветров, радиационный баланс, уменьшение атмосферного давления, температуры, влажности воздуха с набором высоты [3,4].

Изучение климата горных районов всегда осложняется несколькими факторами. Во-первых, значительное число горных хребтов труднодоступны для непосредственного изучения на месте и находятся на периферии от человеческих центров деятельности, что создает некоторые сложности при обслуживании метеорологических станций. Во-вторых, климат каждой горной своих локальных свойств, территории имеет множество что делает исследование репрезентативным лишь для ограниченной территории мест. Для статистически обеспеченной климатологической характеристики региона зачастую используют многолетние данные обширной сети станций за тридцать и более лет. Здесь же, помимо того, что нет большой наблюдательной сети, станции могут располагаться на вершине горы, его склоне или в долине (во всех трех случаях одномоментно могут быть различные погодные условия). Обеспечить наилучшее решение малоизученности горного климата может комплексное применение наземного, спутникового зондирования местности и изучение случаев характерных явлений для каждой отдельной горной системы [4].

- 1.1 Климатические и геофизические характеристики Пиренейского полуострова
- 1.1.1 Пиренейские горы

Пиренейские горы – горная система в северной части Пиренейского полуострова, имеющая широтную направленность, протянулась от Бискайского залива Атлантического океана до Средиземного моря на расстояние 450 км, тем самым служит естественной границей Пиренейского полуострова и континентальной части Европы. Территориально большинство предгорий Пиреней расположены в Испании и в княжестве Андорра, лишь часть системы находятся на территории Франции.

Пиренеи (Рисунок 1.1.1) занимают второе место в Европе по средней высоте над уровнем моря – 2500 метров. Самой высокой точкой горной цепи является пик Ането в Центральных Пиренеях – его высота составляет 3404 метров.



Рисунок 1.1.1 - Топографическая карта Пиренейских гор [5]

Климат Пиренейских гор относится к типично горным с умеренным климатом с континентальным и морским влиянием. В связи с широтной

направленностью системы с востока на запад, Пиренеи являются одной из важных орографических препятствий между морским климатом на северозападе и засушливым средиземноморским климатом на юго-востоке Испании.

Так, на западной и северной части Пиреней наиболее выражен морской подтип умеренного климата – там относительно мягкая зима и прохладное лето (в среднем +1°C в январе и +13°C в июле на высоте 1200 метров над уровнем моря) с накоплением осадков от 1500 до 2000 мм в год.

В Центральных Пиренеях усиливается континентальное влияние – уменьшение количества выпавших осадков от 1000 мм до 1500 мм в год и увеличение диапазона температур (0°С в январе и +14°С в июле на высоте 1200 метров над уровнем моря).

Каталонские Пиренеи можно разделить на три условные климатические зоны:

- Высокогорный с большим количеством осадков (1000-1500 мм в год) и большой амплитудой температуры (0°С в январе и +17°С в июле)
- Средиземноморский внутренний с меньшим количеством осадков (700-1000 мм в год) и увеличенным диапазоном температуры (+4°С в январе и +23°С в июле)
- Средиземноморский прибрежный с наименьшим количеством осадков (менее 700 мм в год) и наибольшими показателями положительных температур (+9°C в январе и +25°C в июле) [6,7].

В данной работе, именно Пиренеи служат потенциально наибольшим источником формирования видимых и невидимых горных волн. Планетарная высотная фронтальная зона (ПВФЗ) климатически по В.И. Воробьеву проходит через Центральную Европу и пересекает Черное море. В случае полярных вторжений ее конфигурация изменяется. Напомним, что для образования горной волны нужен угол пересечения горного хребта и ПВФЗ с углом, близким к прямому.

1.1.2 Кантабрийские горы

Кантабрийские горы – горная система Пиренейского полуострова, расположенная вдоль северного побережья Испании, простираясь от Атлантического побережья до провинции Кантабрия и восточной части Астурии на 480 км. Средняя высота горных вершин составляет около 2 000 метров, с наивысшим пиком - Торре-де-Сердио, достигающим 2 648 метров (Рисунок 1.1.2). Данная горная система является самой западной в Европе.



Рисунок 1.1.2 - Топографическая карта Кантабрийских гор [5]

В целом, Кантабрийская горная система имеет сложные разветвления и её делят на две составляющие: один хребет или ряд хребтов, которые точно повторяют очертания побережья; другой, более высокий, образует северную границу великого плоскогорья Кастилии и Леона, и иногда называют продолжением Пиреней. [8]

С точки зрения климатологии, данная горная цепь не особо отличается от Пиренейской горной цепи – на северной части наиболее выражен морской подтип умеренного климата – там относительно мягкая зима и прохладное лето (в среднем около 5°C в январе и +13°C в июле на высоте 1000 метров над уровнем моря) с накоплением осадков от 1000 до 1800 мм в год. На южной части цепи выражена больше континентальная составляющая – в среднем около 0°С в январе и +17°С в июле на высоте 1000 метров над уровнем моря с накоплением осадков от 400 до 800 мм в год [9]

1.1.3 Иберийские горы

Иберийские горы или же Иберийская система — горный массив, расположенный в восточной части Пиренейского полуострова в Испании. Он простирается примерно на 450 километров с запада на восток и отделяет бассейн Эбро от Центральной Месеты, высокогорного плато в центральной Испании. Данная горная цепь представляет собой сложную систему горных хребтов и плато, состоящую из крутых пиков, холмов и плоских долин. Самая высокая вершина хребта — Монкайо, высота которой достигает 2314 метров над уровнем моря. [10] (Рисунок 1.1.3)



Рисунок 1.1.3 - Топографическая карта Иберийских гор (выделена) [4]

В целом, климат Иберийской системы можно назвать засушливой с той лишь разницей, что долина реки Эмбро имеет степной полузасушливый климат с влиянием Средиземного моря, а западная и южная часть системы имеет степной засушливый климат за счет других соседствующих горных систем и плато. Так, среднемесячная температура января восточной части системы будет составлять около +6°C, а в западной и южной части будет составлять от 0°C до

+3°С. Среднемесячная температура июля колеблется от 18°С (на западе и юге системы) до 25°С (в восточной части системы). Распределение осадков тоже крайне неравномерно – от 200 мм (в большей части системы) до 1400 мм (в районе Монте-Сан-Лоренцо, что находится в северной части Иберийской системы). [9]

1.1.4 Центральная Кордильера (Сьерра-де-Гредос)

Центральная Кордильера (или Система Центральных Кордильер) - это горная система на Пиренейском полуострове, простирающаяся на территории Испании и Португалии. Она составляет часть испанских Пиренеев и простирается с запада на восток на протяжении примерно 450 километров. Включает в себя несколько горных цепей, объединённые под одним общим академическим названием: Серра-да-Эстрелья, Сьерра-де-Гата, Сьерра-де-Франсия, Сьерра-де-Бехар, Сьерра-де-Гредос, Сьерра-де-Малагон, Сьерра-де-Гвадаррама, Сьерра-де-Сомосьерра, Сьерра-де-Айлон. (Рисунок 1.1.4)

Самыми крупными вершинами являются Сиэрра-де-Гредос (2 592 метра), Сиэрра-де-Гуадаррама (2 428 метров) и Сиэрра-де-Пеуна-Мальена (2 429 метров). [11]



Рисунок 1.1.4 - Топографическая карта Центральной Кордильеры [5]

Климат в Центральной Кордильере варьируется в зависимости от высоты и географического положения. В целом, весь северный регион системы имеет средиземноморской климат, характеризующийся холодными зимами и теплым летом, а весь южный регион системы также имеет средиземноморской климат, но с более жарким летом. Так, среднемесячные температуры января и июля на северной части Сьерра-де-Гредос составляет $+3^{\circ}$ C и $+18^{\circ}$ C соответственно, на южной части составляет $+6^{\circ}$ C и $+23^{\circ}$ C. Распределение осадков также неравномерно: от 400 мм в предгорьях до 1400 мм в год. [9]

1.1.5 Сьерра-Морена

Сьерра-Морена - горный хребет в южной части Испании, простирающийся на протяжении около 450 километров вдоль южной границы Кастильи — Ла-Манчи и Эстремадуры, а также на западе Андалусии. Хребет разделяет регион на две различные части — на севере расположены гористые и неровные местности, в то время как на юге находятся более равнинная местность, называемая Андалусской низменностью. (Рисунок 1.1.5) Высшими точками являются гора Баньюэлас (1332 м), Коррал-де-Боррос (1312 м) и Серро-де-ла-Эстрелла (1298 м) [12].



Рисунок 1.1.5 - Топографическая карта горного хребта Сьерра-Морена [5]

Местность Сьерры-Морены относится к типично средиземноморскому климату по классификации Кёппена с сухим и жарким летом, и мягкой зимой. Так, в северной части гор среднемесячная температура января и июля составляет +6°C и +24°C соответственно, а в южной части +8°C и +26°C соответственно. Распределение осадков в год составляет от 200-400 мм на равнинах и предгорье до 800 мм непосредственно в горах. [9]

1.1.6 Андалусские горы

Андалусские горы - горная система на юге Испании, вдоль юговосточного и южного берегов Пиренейского полуострова. Длина около 630 км, ширина до 160 км. Состоят из нескольких хребтов и массивов с крутыми склонами. Высота гор доходит до 3482 м (гора Муласен в хребте Сьерра-Невада, самая высокая на Пиренейском полуострове). Андалусские горы являются вторыми по высоте после Альп горной системой Европы. Хребты разделены относительно крупными межгорными долинами и котловинами (Рисунок 1.1.6). [13]

Андалусские горы делят на три составляющие – Пенибетическая (южная часть системы, там же расположена самая высокая точка), Суббетика (центральная часть системы, самая высшей точкой является гора Ла-Сагра со значением 2383 метров) и Пребетика (северо-восточная часть системы, зачастую относят к системе Суббетика).



Рисунок 1.1.6 - Топографическая карта Андалусских гор [5]

Согласно классификации Кёппена, к системе Андалусских гор относятся несколько климатологических типов – на юго-западе системы распространен средиземноморской тип климата сухим и жарким летом, и мягкой зимой. В районе Сьерры-Невады установлен влажный континентальный климат с мягким летом и длинной холодной зимой. На юго-востоке, северо-востоке системы установлен сухой холодный степной климат (в горах и предгорье), а у побережья распространен сухой жаркий степной климат, а в некоторыхместах (Альмерия, Аликанте) жаркий пустынный климат. [9]

Так, в южной предгорной местности среднемесячная температура января и июля составляет +10°С...+13°С и +25°С...+28°С соответственно, а сумма осадков колеблется от 100 до 800 мм в год.

В центральной и северо-восточной части системы среднемесячная температура составляет +3°С...+5°С (в районе Сьерры-Невады -3°С...-5°С) в январе и +20°С...+22°С (в районе Сьерры-Невады +13°С...+17°С) в июле, а сумма осадков в год составляет от 200 до 1400 мм (в зависимости от высоты местности).[9]

- 1.2 Климатические и геофизические характеристики Урала
- 1.2.1 Полярный Урал

Полярный Урал – самая северная часть горной системы Урал, в Ямало-Ненецком автономном округе и Республике Коми. Протягивается на 380 км в юго-западном направлении от горы Константинов Камень до верховьев р. Хулга [14] (Рисунок 1.2.1). Самой высокой вершиной является гора Пайер – высота пика составляет 1499 метров.



Рисунок 1.2.1 - Топографическая карта Полярного Урала [5]

Полярный Урал относится, согласно Кёппену, к субарктическому континентальному климату с коротким холодным летом и длительной зимой. Зима на Полярном Урале достаточно суровая, это связано с расположением границы действий европейской циклонической деятельности на западной части гор и сибирского антициклона с восточной. Учитывая, что влажные циклоны обычно надвигаются на горы с запада, на западных склонах обычно выпадает в 2—3 раза больше осадков, чем на восточных (к примеру, норма осадков за год в Воркуте составляет примерно 550 мм, в то же время для Салехарда данное значение составляет примерно 475 мм [15]).

Среднемесячная температура января и июля на западной части составляет -18°C и +15°C соответственно, а на восточной -20°C и +16°C соответственно. Годовая сумма осадков на весь регион составляет в среднем 800 мм. [14]

1.2.2 Приполярный Урал

Приполярный Урал – часть горной системы Урал, самая высокая её часть. Протягивается от верховьев реки Хунга до реки Щугер на 230 км. Здесь располагаются самые высочайшие вершины Урала – гора Народная (1895 м), гора Карпингского (1878 м) и гора Манарага (1820 м). Территориально охватывает Тюменскую область (ХМАО) и Республику Коми (Рисунок 1.2.2).



Рисунок 1.2.2 - Топографическая карта Приполярного Урала (выделена) [5]

Приполярный субарктическому Урал также относится к континентальному климату с коротким холодным летом и длительной зимой, часть Приполярного Урала отличается большей причем восточная континентальностью, ввиду наличия орографического препятствия, который задерживает теплый и влажный западный воздух, так и удаленностью от крупных водоёмов.

Среднемесячная температура января и июля на западной части составляет -17°C и +16°C соответственно, а на восточной -22°C и +16°C соответственно.

Годовая сумма осадков на западной части составляет в среднем 1000 мм, а на восточной в среднем 800 мм. [15,16]

1.2.3 Северный Урал

Северный Урал – часть горной системы Урал, рельеф среднегорный, максимальная высота составляет 1617 метров (гора Тэлпозиз). Протягивается от широтного участка реки Щугер до горы горы Ослянка на 550 км. Территориально охватывает Пермский край, Тюменскую область (ХМАО), Свердловскую область (Рисунок 1.2.3) [17]



Рисунок 1.2.3 - Топографическая карта Северного Урала (выделена) [5]

Местность Северного Урала лежит на стыке субарктического и умеренного континентального климата, поэтому зима здесь менее сурова.

Так, среднемесячная температура января колеблется от -18°С (в северной части) до -15°С (южная часть), а в июле от +17°С до +19°С соответственно.

Сумма осадков за год на западном склоне равна около 800 мм, на восточном 500-600 мм. [15, 17]

1.2.4 Средний Урал

Средний Урал - часть горной системы Урал, самая пониженная её часть и наиболее хорошо освоена. Расположена она между 56° и 59° с.ш. (примерно от горы Ослянка до широтного участка реки Уфы). Самой высокой точкой считается вершина горы Басег (994 м). На этом участке Урала смещается строгое меридиональное простирание системы в юго-юго-восточное направление (Рисунок 1.2.4) [18].



Рисунок 1.2.4 - Топографическая карта Среднего Урала (выделено) [5]

Климат Среднего Урала относится к умеренно континентальному на западной её части, восточной части также присущи признаки резкоконтинентальности. Ввиду малых высот горной системы, западный воздух практически беспрепятственно может проникать на восток, а в зимнее время наоборот – холодный воздух с Западно-Сибирской равнины проникает дальше на запад, поэтому среднемесячная температура января на западе и востоке горной системы от -20°C до -14°C. В летнее время также нередки вторжения южного засушливого воздуха, поэтому в равнинных и предгорных частях среднемесячная температура воздуха в северной части колеблется в пределе +17...+19°C, а в южной части может достигать 20°C. Распределение осадков в год вполне классические для Урала – на западных склонах до 700 мм, на восточных и юго-восточных до 500 мм и 400 мм соответственно. [15,19]

1.2.5 Южный Урал

Южный Урал – часть горной системы Урал, за счет широких предгорий наиболее её широкая часть. Протягивается на 550 км от широтного участка реки Уфы до реки Урал (Рисунок 1.2.5). Самой высокой точкой считается вершина горы Ямантау (1640 метров). [20] За счет разновысотных хребтов югозападного и меридионального направления расчленены глубокими продольными и, поперечными понижениями долинами, которые в свою очередь создают отличную среду для формирования горных волн.



Рисунок 1.2.5 - Топографическая карта Южного Урала [5]

Климатические условия Южного Урала являются весьма разнообразными. Западная и северо-западная часть Южного Урала испытывает на себе влияние умеренно континентальное с достаточным увлажнением. Среднегодовое количество осадков составляет 400-600 мм. Среднемесячные температуры января колеблются в пределах -14...-16°С, а в июле +16...+19°С. [21]

Восточная и юго-восточные части Южного Урала относятся к умеренно континентальному климату с жарким и засушливым летом. Среднегодовое

количество осадков составляет 300-400 мм. Среднемесячные температуры января колеблются в пределах -12...-14°С, а в июле +20...+22°С. [15]

2. ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

2.1 Орографические волны

Орографические волны - это атмосферные гравитационные волны, формирующиеся при прохождении стабильного потока воздуха над горным хребтом. [22] Орографические волны относятся к одним из самых опасных метеорологических явлений в авиации ввиду сложности прогнозирования данного явления.

В устойчивой среде сильные ветра, которые проходят перпендикулярно горному препятствию, вынуждены совершать подъем с наветренной стороны и опускаться вдоль склонов подветренной стороны. При спуске возмущенного воздушного потока с подветренной стороны начинается формирование волнообразных колебаний, так образуются горные волны.

Одним из признаком наличия горных волн является формирование, при достаточной влажности воздушного потока, орографической облачности, которая может вытягиваться на значительные расстояния, тем самым обеспечивая влияние на большом удалении. Такая облачность может выстраиваться в длинные полосы, которые будут расположенные параллельно горной гряде с периодическим интервалом в несколько километров (Рисунок 2.1.1).



Рисунок 2.1.1 - Вид видимых горных волн со спутникового снимка

Как было сказано ранее, орографические волны возникают в устойчивой стратифицированной атмосфере при наличии ветра с большой скоростью на высоте и слоя инверсии на уровне горного хребта. Также возникновение горной волны зависит от местных топографических условий, например, от направленности или формы горного хребта.

Так, если горная система состоит из нескольких последовательных хребтов, при перпендикулярном прохождении воздушного потока возможно наложение нескольких систем волн, что может вызвать либо усиление, либо исчезновение волн в целом. Это зависит от расположения индивидуальных последовательностей волн. [4]

Амплитуда волн пропорциональна высоте орографического препятствия. Она может увеличиваться с высотой при условии того, скорость ветра на атмосфера с высотой устойчива. высоте постоянна И При высоте распространения волн в 4-5 раз больше высоты горного объекта, такие волны могут проникать в вышележащие слои атмосферы на расстояние в 10-20 раз превышающие высоту горного массива. Такие волны имеют очень большое значение погоды непосредственно для на месте ИХ возникновения.

Как указывает Роджер Барри в [4], установлено, что поведение воздушного потока, в целом зависит от трёх вещей (вертикального профиля ветра, распределение устойчивости и формы препятствия) и Ферхтготт выделил четыре типа потока над протяженным горным хребтом при устойчивой стратификации над простым горным хребтом, в которой потенциальная температура возрастает с высотой (Рисунок 2.1.2):

а) ламинарное течение, при котором воздух течет плавно над горным образованием. Такое движение возможно при слабом ветре, который почти не меняется с высотой.

б) стоячий вихрь на подветренной стороне горного образования размером до нескольких сотен метров, образующийся при скоростях ветра 5 – 8 м/с, незначительно повышающихся с высотой. Над наветренным склоном наблюдается максимальное смещение воздушных течений;

в) при интенсивном градиенте скорости ветра, которая над хребтом составляет больше 15 м/с, образуется последовательность подветренных волн, развивающихся над роторами с подветренной стороны гор.

г) сложные квазистационарные вихри на подветренных склонах гор.



Рисунок 2.1.2 - Вариации воздушного течения над горным объектом в зависимости от вертикального профиля ветра [4]

В случае «б», «в» и «г» видно, что воздушный поток отрывается от поверхности, что создает условия для роторного движения, что в свою очередь создает зону сильной турбулентности, являющейся опасной для авиации.

Данная схема была подтверждена эмпирическими наблюдениями [4]. Было выделено три общих случая в соответствии со значением составляющей ветра, нормальной хребту:

- Для ветров скоростью меньше 8 м/с любые волны являются слабыми и плоскими. Турбулентный поток описывается одним подветренным ротором. Воздействие гор ограничивается слоем разрыва скорости на высоте 100—200 м над гребнем хребта.
- Для ветров со скоростью 8-15 м/с поток будет более турбулизированным, в нижней атмосфере возникает последовательность роторов, совпадающих по фазе с гребнями гор. Амплитуда таких волн растет с высотой, если скорость ветра постоянна, и она больше, если атмосфера устойчива.
- Для ветров со скоростью более 15 м/с ситуация аналогична второму случаю. Характеристики волн и появление роторов зависят от устойчивости и вертикального градиента скорости ветра.

2.2 Турбулентность

Турбулентность — хаотически неупорядоченное движение объемов воздуха самых различных масштабов — является одним из характерных свойств атмосферных воздушных течений. [23]

Атмосфера практически всегда находится в состоянии турбулентности. Основной причиной этому является возникающий контраст в поле ветра и температуры. Существуют несколько различный процессов, которые способствуют зарождению таких контрастов. Например, к таким процессам относятся:

- трение воздушного течения о подстилающую поверхность, вызывающее большие вертикальные градиенты скорости ветра;
- 2) искажение воздушного потока орографическим препятствием;

26

- неоднородный нагрев разных участков подстилающей поверхности, что является причиной термической конвекции;
- 4) процессы облакообразования, сопровождающиеся выделением тепла конденсации и изменяющие характеристики полей ветра и температуры;
- резко выраженные градиенты полей температуры и скорости ветра при взаимодействии воздушных масс с разными термодинамическими свойствами;
- 6) присутствие в атмосфере слоев инверсии.

Перечисленные процессы могут действовать несколько одновременно и тем самым либо усилят, либо ослабят турбулизацию атмосферы. [24] При классификации турбулентности обычно рассматривают сколько не причину её появления, а особенности развития такой турбулентности. Так выделяют термическую и динамическую турбулентность, орографическую турбулентность, а также турбулентность ясного неба.

2.2.1 Неорографическая турбулентность

турбулентность Термическая представляет себя пульсацию ИЗ вертикальной скорости воздуха, которая обусловлена силами плавучести (сила Архимеда), действующей на воздушные частицы. Таким образом, термическая турбулентность является результатом развития атмосферной конвекции, вертикальных, перемещений отдельных порций воздуха, обусловленных отличием их плотности от плотности окружающего воздуха. [23]

Термической турбулентности свойственен четкий выраженный суточный ход. Над сушей он характеризуется максимумом в дневное время и минимумом ночью. Над крупными водоемами суточный ход обратный из-за того, что здесь стратификация в нижней части пограничного слоя наименее устойчива в темное время суток.

Причиной динамической турбулентности являются большие горизонтальные и вертикальные сдвиги температуры и скорости ветра. При наличии в атмосфере таких градиентов ветра и температуры, могут образовываться гравитационные и гравитационно-сдвиговые волны. Первые возникают под действием силы тяжести и развиваются за счет потенциальной энергии положения частиц воздуха, если последние по той или иной причине выводятся из состояния равновесия. Что же касается гравитационно-сдвиговых волн, то они образуются, если около поверхности раздела наряду с резким изменением (в пределе — скачком) плотности воздуха наблюдается разрыв скорости ветра. [23, 24]

2.2.2 Орографическая турбулентность

По своему названию понятно, что орографическая турбулентность возникает из-за шероховатости подстилающей поверхности, а также зависит от взаимного расположения хребта и от направления ветра.

В летнее время к этим факторам также добавляется влияние термической турбулентности. Летом над скальными и лесистыми горами при небольших скоростях ветра последняя подчас даже преобладает. Термическая турбулентность возникает утром и, развиваясь к полудню, постепенно захватывает все более и более мощный слой атмосферы. Ее развитие начинается над склонами гор, обращенными к солнцу, и лишь несколько позже — над равнинами. Верхняя граница слоя термической турбулентности приподнимается над вершинами, опускаясь над долинами. Под влиянием ветра

зоны термической турбулентности, возникшие над горами, несколько сдвигаются в направлении потока.

Вечернее затухание турбулентности начинается от поверхности земли. Одновременно на высотах возникают слои, в которых турбулентность резко ослабевает. Обычно они располагаются там, где малы градиенты температуры. [23]

В целом, воздушный поток может видоизменяться при обтекании орографических препятствий – это зависит от скорости и направлении потока, её температуры, топографических особенностей местности. Главной причиной всему этому является горная волна, возникающая при подъеме воздушного потока с наветренной стороны хребта и при его спуске на подветренную сторону.

В случае сильного ветра, направленного перпендикулярно к хребту, возникает зона интенсивной орографической турбулентности. В среднем, вертикальная толщина зоны располагается от вершины хребта до 1,5 км (а иногда и больше) и имеет горизонтальную протяженность 10-15 км (Рисунок 2.2.1).



Рисунок 2.2.1 - Схема образования орографической турбулентности

2.2.3 Турбулентность ясного неба

Атмосферная турбулентность, которая может вызвать интенсивную «болтанку» самолетов, является одним из наиболее опасных метеорологических явлений в авиации. Попадание воздушного судна в зону интенсивной турбулентности может быть причиной серьезных летных происшествий, в том числе с трагическими последствиями. [24]

Например, 18.02.2018 года в горных окрестностях города Ясудж в Иране разбился самолет местной авиакомпании ATR72-500 из-за столкновения судна с сильными горными волнами, а также неумением пилотов распознать явление и принять все необходимые меры для предотвращения аварии. [25] Или случай 30.12.2015 года, когда канадский Boeing 777-300ER пролетавший недалеко от Анкориджа попал в прогнозируемую зону турбулентности в ясном небе с интенсивностью от умеренной до сильной, где также была зафиксирована активность которые, горных волн. как известно, могут усиливать интенсивность турбулентных зон. [26]

Турбулентность ясного неба (ТЯН) – это турбулентность в свободной атмосфере вне зон конвективной деятельности, а также турбулентность в перистых облаках [24]. В нижней тропосфере ТЯН сильно зависит от характера подстилающей поверхности (орографии) и термической неустойчивости атмосферы. На более значительных высотах связывают со струйным течением ветра и его сдвига на низких уровнях.

Однако, на сегодняшний день нет четкой формулировки явления и, в следствии, теоретическая часть турбулентности ясного неба страдает от пробелов и отсутствия структурированности. Из-за наложения различных турбулентных зон, недостаток данных высотного температурно-ветрового зондирования, их локальности и непредсказуемости существуют определенные сложности при прогнозировании явления.

30

В качестве основных предикторов возможного развития ТЯН в поле ветра и температуры обращают внимание на их вертикальные и горизонтальные градиенты. Было выделено несколько синоптических ситуаций используемых на практике, имеющих наиболее благоприятные условия для развития ТЯН, которые основываются, обычно, на эмпирически установленных статистических связях по донесениям экипажей самолетов и по некоторым параметрам атмосферы:

- циклоническая часть струйного течения при больших горизонтальных сдвигах вектора скорости;
- 2) слабо выраженная расходимость изогипс с постепенным уменьшением скорости ветра по потоку.
- хорошо выраженная, но «плавная» расходимость течений с антициклонической кривизной изогипс;
- резко выраженная расходимость изогипс в дельте высотной фронтальной зоны;
- 5) область высотного гребня.
- 2.3 Явление фёна

Согласно [4], фён – это дующий со склона подветренной стороны ветер, который приводит к росту температуры и понижению относительной В [27] влажности воздуха. также уточняется, что фён является непериодическим ветром. Кроме того, температура и влажность могут принимать «фёновые» значения в суточном ходе, в виду того, что при ясной погоде (и при явлении фёна, и без него) дневная трансформация воздуха обеспечивает её прогрев и снижение влажности. Таким образом, высокая температура и низкая влажность ещё не говорит о наличии явления, и нисходящий ветер, не сопровождающийся повышением температуры И

понижением влажности, не может считаться фёном. Только в сочетании всех этих признаков данное явление можно отнести к фёнам.

Считается, что классическим механизмом образования фёна является вынужденный подъем влажного воздуха по горному хребту. В течении подъема воздушной массы в верх по горе, происходит охлаждение массы по сухоадиабатическому закону (1°С/100 м) до момента его насыщения. Далее происходит конденсация eë лальнейшее И охлаждение ПО влажноадиабатическому закону (0.65°С/100 м), высвобождая при этом скрытую теплоту конденсации. При достижении верхушки горного массива, воздух утратит большинство своей влаги и может считаться относительно сухой. Затем, при нисхождении на подветренном склоне, воздушная масса обратно нагревается по сухоадиабатическому градиенту. В результате этого, на долины подветренной горной гряды опускается очень сухой и жаркий воздух (Рисунок 2.4.1). При этом важно заметить, что простого перетекания через хребет не является достаточным условием. Фёны связаны с образованием сильных горных волн с большой амплитудой.



Рисунок 2.4.1 - Схема классического образования фёна

При этом неоднократно наблюдалось явление и без потери влаги на наветренной стороне. Для повышения температуры было достаточно снижения воздуха от вершины до близжайшей низменности на подветренной стороне и его нагрева по сухоадиабатическому сжатию, и на наветренной стороне воздух был блокирован инверсией в нижних слоях атмосферы. Существуют и другие возможные механизмы, которые вызывают колебания температуры фёнового типа. Например, один из них характерен для восточных склон Скалистых гор. В ночное время адвекция теплого воздуха с запада может вызвать турбулентность и таким образом может сильно помешать нормальному ходу радиационного охлаждения. [4]

К дополнительным признакам, которые характерны для фёна, в [27] относят наличие таких явлений:

- Порывы сильного ветра (хотя также возможны слабые фёны при тихой погоде);
- Появление «фёновой стены» резко очерченной массы облаков неподвижно стоящей над гребнем горного хребта при фёне;
- Появление чечевицеобразных облаков у вершин гор, которые могут стоят на месте и быстро меняющих свою форму, либо же при совершенно ясном небе, как следствие размывания облаков при нисходящем движении воздуха.

2.4 Явление бора

Борой называют холодные, сухие и порывистые нисходящие ветра. Распространены обычно над невысокими горами, которые расположены у морского побережья, например, в восточной части Адриатики, черноморского побережья Кавказа, северных фьордах Норвегии.

Причиной возникновения боры является адвекция холодного воздуха со стороны континента в сторону прибрежного горного хребта (Рисунок 2.4.1). Для развития и сохранения боры необходимы узкие и близко расположены горы, как, например, Динарские горы. Это позволит увеличить температурный градиент между побережьем и внутренней частью горной системы, что увеличит силу нисходящего ветра.



Рисунок 2.4.1 - Примерная схема образования ветра бора

Было выделено несколько синоптических подтипов расположений барических конфигураций, при которой возможно образования ветра бора. В зимнее она чаще всего связана с активной циклонической деятельностью над Средиземным морем или Сибирским максимумом над Европой. Летом же, ввиду редкой циклонической деятельности в Средиземье, чаще всего возникает под воздействием антициклонической системы. Вне зависимости от типа барического поля, градиентный ветер должен быть от восточного до северовосточного направления [4].

3 АНАЛИЗ СИНОПТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВИДИМЫХ И НЕВИДИМЫХ ОРОГРАФИЧЕСКИХ ВОЛН

3.1 Физические основы съемки ИСЗ в видимом диапазоне

Дистанционное зондирование окружающей среды представляет собой совокупность методов измерения параметров физического состояния подстилающей поверхности и атмосферы с помощью инструментов, расположенных на удалении от объектов исследования.

Существуют два способа измерений с объектом исследования – прямой (в непосредственном контакте) и косвенный (информация поступает путем измерения взаимодействия приборов и поступающих от среды излучения).

При наблюдении Земли из космоса источником метеорологической информации служат пространственные, временные и угловые вариации интенсивности электромагнитных волн, которые атмосфера либо излучает, либо отражает.

Приборы на ИСЗ могут регистрировать излучения в самом широком диапазоне длин волн - от гамма-лучей до длинных радиоволн.

К видимому диапазону относятся лучи длинной от 0,40 мкм до 0,76 мкм (Рисунок 3.1.1).



Рисунок 3.1.1 - Электромагнитный спектр видимого диапазона в нм

Существует два метода дистанционного зондирования Земли – пассивный и активный метод.

Пассивный метод (наиболее распространен) основан на изменении характеристик теплового поля исследуемого объекта, а также возможного отраженного им солнечного объекта. Интенсивность излучения будет являться в общем случае функционалом различных полей, например, температуры, влажности, концетрации озона и других малых газов, и будет зависить от частоты, поляризации и угла. Стоит отметить, что области спектра, в которых наблюдается поглощение различными газами, известны как полосы (Рисунок 3.1.2) поглощения. Спектры поглощения обладают низкими коэффициентами пропусккания, которые связаны с каждым диапазоном длин волн. Но на определенных длиннах волн есть так называемые атмосферные «окна», где атмосфера будет прозрачна (с минимальным поглощением энергии) и эта энергия может легко пройти через атмосферу к подстилающей поверхности. Видимый диапазон спектра соответсвует окну прозрачности.



Рисунок 3.1.2 - Спектры поглощения атмосферными газами электромамгнитного излучения

В активном методе (радио- и лазерная локация) используется источник излучения, который непосредственно расположен на спутнике. Мощность, фаза и другие характеристики отраженного излучения, который генерируется этим источником, также определяются параметрами атмосферы, о которых упоминалось ранее. Только в данном случае излучение планеты и отраженное солнечное излучение будут служить помехой. [28]

У съемки в видимом диапазоне выделяют следующие достоинства и недостатки: большое пространственное разрешение, лёгкое выявление снега и тумана, не может использоваться в ночное время и трудно определять облачность разных ярусов.

3.2 Физические основы съемки ИСЗ в канале водяного пара

Помимо спутниковых снимков в видимом и ИК-диапазонах, существует еще один вид – съемка в канале водяного пара. Водяной пар переизлучает поглощенную им энергию, а датчики спутника измеряют её количество. В данном канале хорошо отслеживается количество влаги в воздухе, адвекции влажного воздуха, перемещение воздуха и отлично дополняет синоптическую информацию в необходимом районе исследования.

В данной работе использовались два канала водяного пара – 6,7 мкм и 7,3 мкм. Первый канал используется для обработки в слое от средней до высокой тропосферы. Второй канал используется для обработки в пределах от нижней до средней тропосферы.

Безоблачные участки с влажным воздухом и облака на снимках в данных каналах имеют светло-серые тона, в то же время темно-серые тона имеют участки в котором сухой воздух. Таким образом, по цветовым границам можно видеть переходы между разными облачными и тепловыми режимами атмосферы.

У съемки в каналах водяного пара выделяют следующие достоинства и недостатки: круглосуточная доступность снимков, легкость мониторинга сухих и влажных зон в атмосфере, низкое пространственное разрешение снимков.

37

3.3 Анализ архива случаев орографических волн на спутниковых снимках

В ходе работы над магистерской диссертацией за период с 1 ноября 2021 г. по 31.03.2022 были выявлены 82 случая орографических волн. Для Пиренейского полуострова (Таблица 3.3.1) было выявлено 43 случая горных волн (из них 17 это невидимые волны).

N⁰	Дата	Видно видимые	Регион обнаружения
		волны	
1	04.11.2021	+	Кантабрийские горы
2	05.11.2021	+	Кантабрийские горы, юг Пиреней
3	07.11.2021	+	Кантабрийские горы, юг Пиреней
4	09.11.2021	- (1-й тип)	Кантабрийские горы, Центральные Кордильеры
5	12.11.2021	- (1-й тип)	западная часть Центральных Кордильер
6	19.11.2021	+	Кантабрийские горы, Центральные Кордильеры, Андалусские горы
7	23.11.2021	+	Кантабрийские горы, Андалусские горы
8	25.11.2021	+	вост. часть Андалусских гор
9	28.11.2021	+	Кантабрийские горы, Центральные Кордильеры, Андалусские горы
10	29.11.2021	+	Все горные системы
11	02.12.2021	+	Все горные системы
12	04.12.2021	+	Центральные Кордильеры, Андалусские горы
13	05.12.2021	+	Центральные Кордильеры,
14	06.12.2021	+	Центральные Кордильеры, Иберийская система
15	07.12.2021	+	Центральные Кордильеры, Андалусские горы
16	08.12.2021	+	Центральные Кордильеры, Иберийская система, Андалусские горы
17	09.12.2021	+	Все горные системы
18	11.12.2021	+	Все горные системы
19	15.12.2021	+	Центральные Кордильеры
20	16.12.2021	- (2-й тип)	Центральные Кордильеры
21	27.12.2021	+	Центральные Кордильеры, Иберийская система, Андалусские горы
22	30.12.2021	- (неопр. тип)	Центральные Кордильеры, Иберийская система, Андалусские горы
23	04.01.2022	+	Центральные Кордильеры, Андалусские горы
24	05.01.2022	+	Центральные Кордильеры, Иберийская система, Андалусские горы

Таблица 3.3.1 – Выявленные случаи горных волн для Пиренейского п/о

25	06.01.2022	- (3-й тип)	Андалусские горы
26	07.01.2022	+	Кантабрийские горы, Пиренеи, Иберийская система
27	10.01.2022	- (3-й тип)	юг Пиреней, Иберийская система, Андалусские горы
28	12.01.2022	- (2-й тип)	Кантабрийские горы
29	21.01.2022	+	Кантабрийские горы
30	22.01.2022	- (2-й тип)	Кантабрийские горы
31	01.02.2022	+	Пиренеи, Кантабрийские, Центральные Кордильеры
32	06.02.2022	- (неопр. тип)	ю-в Пиренейских гор
33	07.02.2022	- (неопр. тип)	ю-в Пиренейских гор
34	08.02.2022	- (1-й тип)	ю-в Пиренейских гор
35	09.02.2022	- (неопр. тип)	Кантабрийские горы
36	14.02.2022	- (3-й тип)	Центральные Кордильеры, Иберийская система,
			Андалусские горы
37	15.02.2022	- (3-й тип)	Иберийская система, юг Пиреней
38	21.02.2022	- (неопр. тип)	Иберийская система, юг Пиреней
39	12.03.2022	- (3-й тип)	Иберийская система
40	13.03.2022	- (3-й тип)	Кантабрийские горы, Пиренеи
41	24.03.2022	- (2-й тип)	Кантабрийские горы, Центральные Кордильеры
42	30.03.2022	+	Кантабрийские горы, Центральные Кордильеры
43	31.03.2022	+	Все горные системы

Продолжение таблицы 3.3.1

Для системы Уральских гор в данном промежутке времени было выявлено 39 случаев горных волн и все они были видимыми (Таблица 3.3.2).

Таблица 3.3.2 - Выявленные случаи горных волн для Уральских гор

N⁰	Дата	Видно видимые	Регион обнаружения
		волны	
1	01.11.2021	+	Южный Урал
2	03.11.2021	+	Полярный и Приполярный Урал
3	04.11.2021	+	Полярный и Приполярный Урал
4	08.11.2021	+	Полярный и Приполярный Урал
5	12.11.2021	+	Северный и Средний Урал
6	23.11.2021	+	Южный Урал
7	26.11.2021	+	Южный Урал
8	27.11.2021	+	Средний Урал
9	02.12.2021	+	Южный и Средний Урал
10	03.12.2021	+	Южный Урал
11	07.12.2021	+	Северный и Полярный Урал

	пределя		—
12	10.12.2021	+	Средний Урал
13	11.12.2021	+	Южный Урал
14	25.12.2021	+	Средний Урал
15	28.12.2021	+	Средний Урал
16	29.12.2021	+	Средний Урал
17	04.01.2022	+	Южный, Средний Урал
18	08.01.2022	+	Южный, Средний Урал
19	17.01.2022	+	Южный, Средний Урал
20	24.01.2022	+	Южный, Средний Урал
21	02.02.2022	+	Южный, Средний Урал
22	04.02.2022	+	Северный Урал
23	16.02.2022	+	Южный, Средний и Северный Урал
24	17.02.2022	+	Северный Урал
25	18.02.2022	+	Средний и Северный Урал
26	20.02.2022	+	Южный, Средний и Северный Урал
27	21.02.2022	+	Южный, Средний Урал
28	22.02.2022	+	Южный Урал
29	24.02.2022	+	Южный, Средний и Северный Урал
30	27.02.2022	+	Средний, Северный и Приполярный Урал
31	01.03.2022	+	Северный Урал
32	02.03.2022	+	Северный Урал
33	03.03.2022	+	Приполярный Урал
34	12.03.2022	+	Приполярный Урал
35	21.03.2022	+	Приполярный, Полярный Урал
36	23.03.2022	+	Северный Урал
37	24.03.2022	+	Северный, Приполярный и Полярный Урал
38	25.03.2022	+	Южный Урал
39	26.03.2022	+	Полярный Урал

Продолжение таблицы 3.3.2

В ходе работы использовались космические снимки видимого диапазона и в канале водяного пара спутника AQUA [29], данные реанализа CFSR [30] и MERRA[31].

Для обнаруженных невидимых волн была предпринята попытка разделить на несколько раздельных типов по их барической конфигурации на момент обнаружения волн. Рассмотрим для первого типа спутниковое изображение Пиренейского полуострова (Рисунок 3.3.1) от 09.11.2021. Как видно из спутникового снимка видимого диапазона, в большей части полуострова не наблюдается облачность, она фиксируется лишь у морского побережья и северных Пиреней. В то же время, на инфракрасном снимке есть «невидимые» горные волны, за исключением восточной части полуострова.



Рисунок 3.3.1 - Фрагменты изображений в видимом канале (сверху) и в канале водяного пара 7,2 мкм (снизу) от 09.11.2021, 13:15 UTC

Для анализа данного случая с точки зрения синоптических процессов на рисунке 3.3.2 рассмотрим карты абсолютной топографии стандартной изобарической поверхности 500 гПа, совмещенной с приземным уровнем. Черная линия (изогипса 552 гп дам) на данной карте формально разделяет очаг умеренной и тропической воздушной массы. Для более детального анализа дополнительно рассмотрим карту абсолютной топографии стандартной изобарической поверхности 850 гПа.



Data: CFS reanalysis 0.500° www.wetterzentraLe.de

6 480 484 488 492 496 500 504 508 512 516 520 524 528 532 536 540 548 552 556 580 584 588 572 576 580 584 588 592 598 600



Рисунок 3.3.2 - Карты совмещенного реанализа CFS приземного уровня и 500 гПа, и на уровне 850 гПа от 09.11.2021, 12:00 UTC

У западных берегов Пиренейского полуострова расположен высотный гребень тепла, а у восточных берегов расположен высотный циклон с большими градиентами на высоте около 5,5 км.

Для анализа данной ситуации необходимо рассмотреть синоптическую ситуацию над Атлантико-Европейском сектором. Необходимо отметить, что над северной Атлантикой между Гренландией и западным побережьем Скандинавии располагается глубокий циклон (с давлением в центре 975 гПа), захватывающей своей южной частью район Великобритании. В теплый сектор данного циклона, что иллюстрирует поле температуры на карте AT850, поступает прогретая воздушная масса с региона Азорских островов. На высоте 500 гПа в данной области наблюдается высотный гребень, на уровне 850 гПа его тыловой части соответствует очаг тепла. В районе Марокко на высоте 500 гПа наблюдается высокий циклон, ему у земли соответствует барическая ложбина, в которой на момент появления невидимых горных волн отмечается

замкнутый центр. По анализу высотных карт, включая и поле температуры на предположить, уровне АТ850, можно что В ЭТОМ районе находится заполняющийся циклон (его центральной части соответствует область холода на АТ850). Для подтверждения данного предположения были рассмотрены синоптические карты за 4 дня до обнаружения невидимых горных волн. Синоптическая ситуация тех дней определялась вторжением барической ложбины с более высоких широт. Интересно, что данному вторжению в области исследования сопутствовали видимые горные волны (4, 5, 7 ноября 2021 года). В эти даты по данным поля температуры на АТ850 произошло вторжение более прохладной воздушной массы в Северную Африку. Возможно, этим объясняется образование в ложбине над Северной Африкой неглубокого циклонического образования с одной замкнутой изобарой 1010 гПа.

Дополнительно была просмотрена карта поля ветра на уровне АТ700 (Рисунок 3.3.3), из которой следует, что в зоне образования невидимых горных волн на уровне максимальных высот горных систем ветер составлял 10-12 м/с и воздушная масса проходила почти перпендикулярно относительно горных хребтов, что является необходимым условием для образования орографических волн.



Tue 11/09/2021 12Z

Рисунок 3.3.3 - Реанализ MERRA-2 поля ветра на изобарической высоте 700 гПа от 09.11.2021, 12:00 UTC

Рассмотрим следующий случай для первого типа от 12.11.2021 (Рисунок 3.3.4). Как видно из спутникового снимка видимого диапазона, в большей части полуострова не наблюдается облачность. Однако, если посмотреть инфракрасный снимок, то можно увидеть интенсивные горные волны у Кантабрийских гор (северная часть полуострова) и у Центральной Кордильеры (центр).



Рисунок 3.3.4 - Фрагменты изображений в видимом канале (сверху) и в канале водяного пара 7,2 мкм (снизу) от 12.11.2021, 13:45 UTC



Рисунок 3.3.5 - Карты совмещенного реанализа CFS приземного уровня и 500 гПа, и на уровне 850 гПа от 12.11.2021, 12:00 UTC

У Азорских островов сформировался приземный центр субтропического антициклона. На высотной карте AT500 над приземным центром антициклона на замкнутой изобаре 1030 гПа наблюдается гребень высокого давления. В западной части Средиземного моря наблюдается затухающее приземное малоградиентное поле циклона с отдельным замкнутым центром у Балеарских островов (Рисунок 3.3.5). Можно предположить, что в данном случае, по сравнению с предыдущим, орографические волны менее интенсивны за счет слабого градиентного поля давления и слабого температурного контраста (около 5°C).



Fri 11/12/2021 12Z

Рисунок 3.3.6 - Реанализ MERRA-2 поля ветра на изобарической высоте 700 гПа от 12.11.2021, 12:00 UTC

Также была просмотрена карта поля ветра на уровне 700 гПа (Рисунок 3.3.6). В районе обнаружения горных волн скорость ветра на уровне максимальных высот горной цепи составлила около 10 м/с и направление воздушной массы относительно горных хребтов было почти перпендикулярным, что является необходимым условием для образования орографических волн.

Рассмотрим для второго типа спутниковое изображение Пиренейского полуострова (Рисунок 3.3.7) от 16.12.2021. Как видно из спутникового снимка видимого диапазона, облачность наблюдается в районе Бискайского залива, долине Эмбро, и со стороны Средиземного моря. В то же время, на инфракрасном снимке наблюдаются очень интенсивные «невидимые» горные волны в районе Центральных Кордильер и Иберийской системы.



Рисунок 3.3.7 - Фрагменты изображений в видимом канале (сверху) и в канале водяного пара 7,2 мкм (снизу) от 16.12.2021, 13:35 UTC

В данном случае центр обширного приземного (с давлением в центре 1035 гПа) и высотного антициклонов расположены непосредственно над территорией Великобритании, Франции и Германии что существенно отличает данный случай от предыдущих, так как весь Пиренейский полуостров находится в южной части данного антициклона. Однако, в этом случае также имеется высотная ложбина в районе западного побережья Марроко. При этом, в районе обнаружения горных волн наблюдается заток прохладного воздуха с территории Марроко, который в свою очередь поступил туда со Северной Атлантики несколькими днями ранее. (Рисунок 3.3.8)





Рисунок 3.3.8 - Карты совмещенного реанализа CFS приземного уровня и 500 гПа, и на уровне 850 гПа от 16.12.2021, 12:00 UTC

На Пиренейском полуострове практически все горные системы имеют широтную направляющую. Смотря на барическую карту можно предположить, что в данном случае ветер не пересекает горные хребты под необходимым прямым или тупым углом. Однако, если четче присмотреться к топографии местности и карте поля ветра на уровне АТ700 (Рисунок 3.3.9), можно убедиться, что базовые условия для формирования горных волн соблюдены: скорость ветра составляет 10 м/с и более, а также воздушный поток пересекает орографическое препятствие под необходимым углом.



Рисунок 3.3.9 - Реанализ MERRA-2 поля ветра на изобарической высоте 700 гПа от 16.12.2021 12:00 UTC и топографическая карта местности гор

Рассмотрим для третьего типа случаев спутниковое изображение Пиренейского полуострова от 10.01.2022 г (Рисунок 3.3.10).



Рисунок 3.3.10 - Фрагменты изображений в видимом канале (сверху) и в канале водяного пара 7,2 мкм (снизу) от 10.01.2022, 13:25 UTC

Как видно из спутникового снимка видимого диапазона, облачность наблюдается в районе Бискайского залива, долине Эмбро, и со стороны Средиземного моря с характерной подветренной облачностью. В то же время, на снимке в канале водяного пара наблюдаются очень интенсивные «невидимые» горные волны в районе юга Пиренеев, прилежащей долине и Иберийской системы, которые дальше уходят в Средиземное море.

Проанализируем данный случай с точки зрения синоптических процессов с помощью рассмотрим карты абсолютной топографии стандартной изобарической поверхности 500 гПа, совмещенной с приземным уровнем на рисунке 3.3.11. Черная линия (изогипса 552 гп дам) на данной карте формально разделяет очаг умеренной и тропической воздушной массы. Также, для более детального анализа, дополнительно рассмотрим карту абсолютной топографии стандартной изобарической поверхности 850 гПа.

На высоте 5,5 км над большей частью Пиренейского полуострова вытянулся высотный барический гребень, в то время как на восточной границе полуострова наблюдается высокоградиентное поле у высотной ложбины, которая охватывает львиную долю всего европейского континента. В приземных слоях атмосферы у Пиренейского полуострова расположился малоградиентный антициклон с давлением в центре 1025 гПа, а в районе Ионического моря находится заполняющийся циклон с давлением в центре 995 гПа.





Рисунок 3.3.11 - Карты совмещенного реанализа CFS приземного уровня и 500 гПа, и на уровне 850 гПа от 10.01.2022, 12:00 UTC

По полю температуры на карте АТ-850 можно увидеть заток теплого воздуха с территории Марроко, который соответствует высотному барическому

гребню. В то же время со стороны ложбины заметен заток более прохладного воздуха. Поэтому в районе обнаружения волн и близлежащих территорий виден температурный контраст, который достигает 5-10°С.

На рисунке 3.3.12 представлена карта поля ветра на уровне 700 гПа. При соотнесении местоположения оси струйного течения с полями ветров на высотах АТ700 и АТ500 обнаруживается, что в средней тропосфере в зоне формирования горных волн наблюдается расширение области высоких скоростей ветра, максимальные значения которых фиксируются в месте, где были выявлены невидимые горные волны (20-25 м/с в районе максимальных высот горных систем).



Mon 01/10/2022 12Z

Рисунок 3.3.12 - Реанализ MERRA-2 поля ветра на изобарической высоте 700 гПа от 10.01.2022, 12:00 UTC

Рассмотрим случаи видимых горных волн с помощью спутникового изображения Южного Урала и Прикаспийской низменности (Рисунок 3.3.13) от 01.11.2021. Как видно из спутникового снимка видимого диапазона, район Южных Уральских гор и прилегающих территорий занимает слоисто-кучевая и перистая облачность. Если посмотреть на снимок в канале водяного пара, то можно обнаружить невидимые горные волны под видимыми (что естественно).



Рисунок 3.3.13 - Фрагменты изображений в видимом канале (сверху) и в канале водяного пара 7,2 мкм (снизу) от 01.11.2021 09:00 UTC

На рисунке 3.3.14 представлены карты совмещенная карта АТ-500 и приземного уровня, а также карта температурного поля на уровне АТ-850. В районе Полярного Урала наблюдается формирующийся приземный антициклон с давлением в центре 1025 гПа, а со стороны Восточной Европы и дальше на юго-восток вытянулся высотный и приземный барический гребень. Для анализа данной ситуации необходимо дополнительно рассмотреть синоптическую ситуацию Атлантико-Европейском сектором. Над территорией над Великобритании расположился глубокий приземный циклон с давлением в центре 975 гПа. Отдельные ложбины в Центральной Европе способствуют поступлению дальше на восток южной теплой воздушной массе, что иллюстрирует поле температуры на карте АТ-850. На высоте 500 гПа в данной области наблюдается высотный гребень, на уровне 850 гПа его тыловой части соответствует очаг тепла.





Рисунок 3.3.14 - Карты совмещенного реанализа CFS приземного уровня и 500 гПа, и на уровне 850 гПа от 01.11.2021 12:00 UTC

Также, в регионе обнаружения горных волн проходит условная граница высотной фронтальной зоны, которая формально разделяет умеренную и тропическую воздушные массы, что иллюстрирует нам поле температуры на АТ850 и способствует созданию температурного контраста в диапазоне 5-10°C.

На карте поля ветра на высоте 3-х киллометров в зоне обнаружения волн наблюдается узкая зона сильного ветра широтного направления со значениями 20-22 м/с (Рисунок 3.3.15).



Mon 11/01/2021 09Z

Рисунок 3.3.15 - Реанализ MERRA-2 поля ветра на изобарической высоте 700 гПа от 01.11.2021, 12:00 UTC

Рассмотрим следующий случай видимых горных волн на фрагменте спутникового изображения Среднего и Южного Урала (Рисунок 3.3.16) от 17.01.2022 08:40 UTC. Как видно из снимка, непосредственно у горного хребта можно наблюдать характерную облачность подветренных волн – вытянувшиеся на значительное расстояние облачные полосы, которые расположены параллельно горной гряде с периодическими интервалами в несколько километров, а также высококучевую облачность уже на расстоянии от хребтов.



Рисунок 3.3.16 - Фрагменты изображений в видимом канале (сверху) и в канале водяного пара 7,2 мкм (снизу) от 17.01.2022 08:40 UTC

Рассмотрим синоптическую ситуацию в Атлантико-Европейском секторе и в зоне обнаружения орографических волн. На рисунке 3.3.17 представлены карты совмещенная карта AT-500 и приземного уровня, а также карта температурного поля на уровне AT-850. Над большей частью Западной и Центральной Европой наблюдается общирный приземный антициклон (центральная изогипса приземного антициклона составляет 1035 гПа). На высоте 500 гПа в данной области наблюдается высотный гребень, а на уровне 850 гПа его тыловой части соответствует очаг тепла. На Севере Европы, Прибалтике и полярной части Урала наблюдается активная циклоническая деятельность с несколькими центрами действия, а над областью исследования наблюдается сгущение барического поля.





Рисунок 3.3.17 - Карты совмещенного реанализа CFS приземного уровня и 500 гПа, и на уровне 850 гПа от 17.01.2021 06:00 UTC

В месте выявления горных волн и в целом по всей системе Уральских гор наблюдается вторжение арктических воздушных масс. В месте исследования и прилегающих территориях на уровне 1,5 км практически однороден, разность температур составляет около 6 градусов Цельсия.

Однако, если обратиться к карте поля ветра на уровне 700 гПа (Рисунок 3.3.15), можно увидеть, что в районе исследования наблюдается усиливающийся ветер со значениями от 12 до 20 м/с, к тому же, направление потока близкоперпендикулярно по отношению к горной системе, что является одним из выполняемых условий для орографических волн.



Mon 01/17/2022 09Z

Рисунок 3.3.15 - Реанализ MERRA-2 поля ветра на изобарической высоте 700 гПа от 17.01.2022, 09:00 UTC

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено 82 случая орографических волн. Для Пиренейского полуострова было обнаружено 43 случая орографических волн, 17 из них были невидимыми. Для невидимых случаев было выделено несколько различных типов синоптических ситуаций.

Первый тип: у западной части Пиренейского полуострова наблюдается барический гребень, которому соответствует очаг тепла. Над восточной частью полуострова формируется высотный циклон, ему соответствует малоградиентное поле пониженного давления и очаг холодного воздуха в нижней тропосфере. Направление ветра по отношению к горной системе составляет 90° или больше. Скорость ветра отмечается в диапазоне от 8 до 12 м/с на уровне максимальных высот горной системы. Необходимо отметить, что первый тип может быть использован в качестве фона при условии, что высокий циклон над северным побережьем Африки должен быть холодным.

Для второго типа характерно расположение высотного и приземного антициклона непосредственно у материковой части Западной Европы. При этом, над Центральной Атлантикой до 35° с.ш. наблюдается высотная ложбина. В районе Азорских островов или ближе к западной части Северной Африки располагается локальный высотный минимум, связанный с этой ложбиной.

Третий тип случаев основывается на расположении высотной фронтальной зоны вблизи Пиренейского полуострова.

Для системы Уральских гор в исследуемый промежуток времени было обнаружено 39 горных волн и все они были только видимыми. Невидимые горные волны наблюдались в непосредственной близости к видимым.

Случаи видимых горных волн на Урале различаются между собой, в первую очередь, положением высотной фронтальной зоны относительно горной системы. При наблюдении орографических волн над Уралом может наблюдаться узконаправленное проникновение полярного воздуха. В 70% случаев Уральские горы при наблюдении орографических волн пересекает под тупым углом ВФЗ полярного или арктического фронта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Мохов И. И. КЛИМАТ // Большая российская энциклопедия. Том 14. Москва, 2009, стр. 278
- Метеорология и климатология : учебник. 7-е изд. / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. - М. : Изд-во Моск. ун-та : Наука, 2006. - 582 с. : илл. – (Классический университетский учебник)
- 3) Л. І. Сакалі, Н. В. Ніколаєва . Гірський клімат // Енциклопедія Сучасної України: електронна версія [веб-сайт] / гол. редкол.: І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк та ін.; НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2006. URL: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=30250 (дата обращения: 18.05.2023)
- Барри Р., Хргиана А. Х., Погода и климат в горах / Барри Роджер; пер. с англ. под ред. А. Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 311 с.: ил., табл.
- Сайт цифровой модели рельефа, используемая в качестве физической карты местности [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <u>https://tessadem.com/</u> (дата обращения: 18.05.2023)
- 6) Тельнова Н. О. ПИРЕНЕИ // Большая российская энциклопедия. Том 26. Москва, 2014, стр. 247
- Situaciones atmosféricas en España" (centro de publicaciones, Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 1993.
- Chisholm, Hugh, ed. (1911). "Cantabrian Mountains". Encyclopædia Britannica. Vol. 5 (11th ed.). Cambridge University Press. pp. 207–208.
- Климатологические данные Государственного метеорологического агентства Испании [Электронный ресурс]. - Режим доступа :

https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valores climatologicos (дата обращения: 18.05.2023)

- ИБЕРИЙСКИЕ ГОРЫ // Большая российская энциклопедия.
 Электронная версия (2016) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://old.bigenc.ru/geography/text/1997359 (Дата обращения: 18.05.2023)
- Тельнова Н. О. МЕСЕТА // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2017) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://old.bigenc.ru/geography/text/2206446 (Дата обращения: 18.05.2023)
- 12) Сьерра-Морена // Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. М. : Советская энциклопедия, 1969—1978.
- АНДАЛУССКИЕ ГОРЫ // Большая российская
 энциклопедия. Электронная версия (2016) [Электронный ресурс]. –
 Режим доступа: https://old.bigenc.ru/geography/text/1822128 (Дата обращения: 18.05.2023)
- 14) ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ // Большая российская энциклопедия.
 Электронная версия (2016) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://old.bigenc.ru/geography/text/3157182 (Дата обращения: 18.05.2023)
- 15) Климатологические данные Гидрометцентра Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <u>https://meteoinfo.ru/climatcities</u> (Дата обращения: 18.05.2023)
- 16) ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2016) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://old.bigenc.ru/geography/text/3167864 (Дата обращения: 16.05.2023)

- 17) СЕВЕРНЫЙ УРАЛ // Большая российская энциклопедия.
 Электронная версия (2017) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://old.bigenc.ru/geography/text/3544056 (Дата обращения: 18.05.2023)
- 18) Маршруты Среднего Урала / Е. Масленников, П. Истомин М: Изд-во «Физкультура и спорт», 1971. – 104 стр.
- Климатологическое описание Среднего и Южного Урала ФГБУ «Уральское УГМС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <u>http://svgimet.ru/?page_id=1707</u> (дата обращения: 18.05.2023)
- 20) ЮЖНЫЙ УРАЛ // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2017) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://old.bigenc.ru/geography/text/4932082 (Дата обращения: 18.05.2023)
- 21) Климатологическое описание Башкирского региона ФГБУ «Башкирское УГМС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <u>http://www.meteorb.ru/meteorology/climatic-characteristics</u> (Дата обращения: 18.05.2023)
- 22) Глоссарий Всемирной Метеорологической Организации
 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cloudatlas.wmo.int/ru/glossary (Дата обращения 18.05.2023)
- 23) Турбулентность в свободной атмосфере / Н. К.
 ВИННИЧЕНКО, Н. З. ПИНУС, С. М. ШМЕТЕР, Г. Н. ШУР/ Гидрометеоиздат, 1976 г.
- 24) Богаткин О.Г. Авиационная метеорология. Учебник. СПб.: Изд. РГГМУ, 2005.
- 25) Электронное хранилище знаний о безопасности, связанных с полетами, управлением воздушным движением и авиационной безопасностью [Электронный ресурс]. Режим доступа:

https://www.skybrary.aero/accidents-and-incidents/at75-vicinity-yasoujiran-2018 (Дата обращения 18.05.2023)

- 26) Электронное хранилище знаний о безопасности, связанных с полетами, управлением воздушным движением и авиационной безопасностью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <u>https://www.skybrary.aero/accidents-and-incidents/b773-en-route-eastnortheast-anchorage-ak-usa-2015</u> (Дата обращения 18.05.2023)
- 27) Севастьянова Л. М., Севастьянов В. В. Фёны Горного Алтая / Д-р геогр. наук, профессор В. И. Русанов. — Томск: ТПУ, 2000. — 139 с
- М.А. Герман Космические методы исследования в метеорологии - Ленинград, Гидрометеоиздат, 1985. - 351 с.
- 29) Спутниковый архив космических снимков LAADS DAAC в канале видимого диапазона и водяного пара [Электронный ресурс].
 Режим доступа: <u>https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/</u> (Дата обращения: 18.05.2023)
- 30) Архив данных реанализа CFSR [Электронный ресурс]. –
 Режим доступа:

<u>https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?model=cfsr</u> (Дата обращения: 18.05.2023)

31) Архив данных реанализа Merra [Электронный ресурс]. –
 Режим доступа: <u>https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/classic_merra2</u>
 (Дата обращения: 18.05.2023)