



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему «Гидродинамическое моделирование новороссийской боры и связанных
с ней метеорологических условий»

Исполнитель Зверько Полина Валерьевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 17 » февраля 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
Введение.....	4
1 Краткая история развития моделирования природных процессов.....	8
2 Современные прогностические модели	11
3 Мезомасштабные атмосферные процессы	14
3.1 Местные циркуляции.....	16
3.2 Бора	20
3.3 Новороссийская бора	23
3.4 Певекский южак	28
4 Мезомасштабные атмосферные модели.....	31
4.1 Модель WRF.....	33
4.2 WRF-ARW.....	34
5 Описание численных экспериментов.....	41
5.1 Выбор конфигурации модели.....	41
5.2 Описание численных экспериментов по моделированию новороссийской боры	44
5.2.1 Бора 06-08 февраля 2012 года.....	49
5.2.2 Бора 10-12 марта 2021 года	68
5.2.3 Бора 28-30 сентября – 01 октября 2021.....	79
5.3 Описание численных экспериментов по моделированию певекского южака.....	88
5.3.1 Южак 14-16 марта 2006.....	91
5.3.2 Южак 06-07 января 2015	100
5.3.3 Южак 16-19 ноября 2021.....	109
5.4 Общие и отличные черты новороссийской боры и певекского южака.....	119

Заключение.....	124
Список использованных источников.....	127

ВВЕДЕНИЕ

Заблаговременный и точный прогноз погоды очень важен практически во всех сферах человеческой деятельности. Так, например, в авиации, в агроиндустрии, в морском деле, в дорожно-транспортной области, а также, конечно, простым гражданам для решения своих вопросов. Поэтому прогноз погоды волнует людей уже очень много столетий. Первые упоминания о «метеорологии» встречаются в работах таких древнегреческих философов, как Платон и Аристотель. Как самостоятельная наука, метеорология возникла в XVII после изобретения термометра и барометра. Далее были внедрены регулярные наблюдения за погодой. После наука начинает активно развиваться.

Сейчас же наука пришла к тому, что прогноз погоды, на несколько дней вперед для любой области мира за несколько минут может составить компьютер. Начался рассвет гидродинамического моделирования. То есть моделирования, основанного на решении гидродинамических уравнений, которые в свою очередь описывают все метеорологические процессы в атмосфере, от глобальных волн Россби до мелкомасштабных вихрей. Сейчас для каждого масштаба явления существуют свои модели. В данной работе особое внимание уделено мезомасштабной модели WRF-ARW, так как именно с её помощью производилось моделирование мезомасштабной местной циркуляции – бора. Бора – локальное явление, которое связано с общей циркуляцией атмосферы, но претерпевающее изменение под действием местной топографии. Поток воздуха при определенных синоптических обстоятельствах движется с холодного континента в сторону более теплого моря или другого крупного водоема. Встретив на пути препятствие в виде невысокого горного хребта, поток вынужден измениться. А именно поток сначала тормозится в подножья горы с наветренной стороны, а затем, переваливая через хребет, с огромной скоростью

обрушивается с подветренной стороны. И если с подветренной стороны хребта располагается какой-либо населенный пункт, бора способна нанести ему большой экономический ущерб. Оборванные линии электропередач, поваленные деревья, сорванные рекламные щиты, сорванные с якорей корабли, выброшенные на берег морские лодки, завалены большие грузовые машины, в конце концов, люди, находившиеся во время боры на улице, могут получить серьезные травмы. Поэтому заблаговременный и с хорошей оправдываемостью прогноз очень важен для регионов, где это явление наблюдается. А именно в таких местах как: город Новороссийск, Певек, побережье Адриатического моря, побережье Байкала, город Баку, побережье Франции.

Объектом исследования этой работы является бора в городе Новороссийск и южак в Певеке. Само исследование, как было сказано выше, проводилось с помощью гидродинамической модели WRF-ARW версии 4.3.6. Город Новороссийск средних размеров по площади, численность города почти триста тысяч человек, город сейчас активно развивается, поэтому прогноз этого опасного явления очень актуален для города. Город Певек несколько меньше по площади и численность населения всего порядка пяти тысяч человек. Однако это город, который имеет на своей территории золотодобывающие предприятия, атомный плавучий электрический блок, а также морской арктический порт федерального значения, для нормального функционирования этих объектов также необходим заблаговременный и точный прогноз погоды и особенно сильного ветра – южака.

Также численное моделирование этих явлений позволит провести анализ их трёхмерной структуры, а это приблизит к пониманию возникновения этих явлений. Так как, на данный момент природа возникновения бороподобных ветров до конца так и не изучена.

Цель данной работы: исследовать особенности бороподобных ветров, выделить их сходные и различные черты и адаптировать гидродинамическую модель WRF-ARW для прогноза этих явлений.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие *задачи*:

- 1) Изучить историю исследования бороподобных ветров;
- 2) Изучить физику атмосферных процессов при боре, а также местные особенности новороссийской боры и певекского южака;
- 3) Выявить случаи боры в Новороссийске и южака в Певеке;
- 4) Адаптировать гидродинамическую мезомасштабную модель WRF-ARW к регионам исследования;
- 5) Провести численные эксперименты по моделированию боры и южака;
- 6) Получить пространственно-временные поля (скорости ветра, температуры, давления, вертикальной компоненты скорости ветра) для случая сильной боры по средствам численного моделирования;
- 7) Прodelать анализ полученных результатов моделирования;
- 8) Выявить общие особенности для всех исследуемых случаев сильной боры и южака;
- 9) Выявить схожие и отличные черты при боре в Новороссийске и южаке в Певеке;
- 10) Оценить возможность прогноза боры с помощью численной мезомасштабной модели WRF-ARW.

ВКР состоит из введения, пяти глав, заключения. Список использованных источников содержит 44 наименования.

Во введении рассмотрена актуальность, поставлена цель исследования и определены задачи.

Первая глава посвящена краткой истории развития гидродинамического моделирования атмосферных процессов.

Во второй главе говорится о современных прогностических гидродинамических моделях. Сказано о глобальных моделях, которые способны давать прогноз по всему земному шару, немного рассказано о мелкомасштабных моделях.

Третья глава посвящена мезомасштабным атмосферным процессам, к которым относятся все виды местных циркуляций. Основное внимание уделено боре.

В четвертой главе подробно рассказано о мезомасштабных моделях, в частности о модели WRF-ARW.

В пятой главе представлен ход работы с моделью WRF-ARW, а также все результаты моделирования новороссийской бору и павского южака. А также проведен сравнительный анализ этих ветров.

В заключение описана проделанная работа и сформулированы выводы.

1 КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Моделирование – особый метод познания, цель которого исследовать объект, явление, процесс на его модели. Также можно сказать, что моделирование это практическое или теоретическое исследование объекта или же это построение и изучение моделей реально существующих объектов, процессов или явлений, для того чтобы получить больше сведений о них, объяснить их, предсказать их, управлять ими и т.д.. Сейчас моделирование применяется практически во всех научных дисциплинах, в биологии, экономике, экологии, геологии и, конечно, в метеорологии. Гидродинамическое моделирование – это численное математическое моделирование, в основе которого лежит решение системы дифференциальных уравнений (уравнений гидротермодинамики атмосферы) в частных производных. А именно таких прогностических уравнений как:

- уравнения движения;
- уравнение сохранения тепла;
- уравнение сохранения влаги;
- уравнение неразрывности;

плюс диагностические уравнения (уравнения состояния, уравнение статики и т.д.).

Активное развитие в области термо- и гидродинамики началось с середины 19 века. С этого времени появились идеи о рассмотрении атмосферы, как физической среды, к которой можно применять известные физические законы, то есть прогноз погоды стал рассматриваться как математическая задача.

Первым, кто предположил, что описать атмосферу можно с помощью законов физики и математических уравнений был немецкий ученый Герман фон Гельмгольц в 1850 г. В 1903 известный норвежский физик, метеоролог

Вильгельм Бьёркнес пошел дальше и высказал мнение, что зная начальные условия атмосферы и законы эволюции исследуемых величин, с помощью физики и математики можно описать атмосферу и дать прогноз метеорологических величин. Также Бьёркнес первым выделил переменные, которые описывают атмосферу. Это температура, давление, плотность, влажность и три компоненты скорости ветра. И назвал законы, которые должны использоваться:

- закон сохранения импульса,
- закон сохранения массы сухого воздуха,
- уравнение состояния идеального газа,
- закон сохранения энергии,
- уравнения сохранения влажности во всех ее фазах.

Однако пытаясь дать прогноз, упрощая полные уравнения, никакого реального прогноза ему получить не удалось, что во много связано с недостаточным на тот момент уровнем развития математики и вычислительной техники, недостаточностью информации об атмосфере.

Некоторое время спустя, в 1920-ых годах Льюис Фрай Ричардсон [15, 44] предпринял первую попытку дать прогноз погоды путем численного (приближенного) решения уравнений гидродинамики. Все расчеты проводились вручную и с помощью механических калькуляторов. Сама методика решения уравнений была верна, но вот результат имел огромную ошибку, которая связана с некорректностью начальных условий (из-за недостаточности данных), некорректностью использованных вычислительных схем. Идею Ричардсона приняли, много учёных занималось анализом причин ошибок Ричардсона, созданию новых схем решения уравнений, упрощению и фильтрации уравнений.

В СССР ученые тоже активно осваивали эту область науки. Вначале 1940–ых Илья Афанасьевич Кибель, можно сказать, совершил революцию в

метеорологии. Он нашел первый эффективный способ решения системы гидродинамических уравнений [15, 44].

Первых успехов численного гидродинамического моделирования атмосферы (то есть моделирования основанного на дискретизации непрерывного пространства и использовании приближенных методов решения уравнений) добились в 50-ых годах XX века и они неразрывно связаны с развитием динамической метеорологии, вычислительной математики и эволюцией электронно-вычислительной техники.

Когда уровень развития вычислительной техники возрос, появились первые ЭВМ, к идеям Ричардсона вернулись. И произошло это в 1946 году благодаря венгеро-американскому математику Джону фон Нейману и американскому метеорологу Джулу Чарни – именно они начали работу над первой гидродинамической моделью. И уже в 1950 году по заказу ВМФ США была создана вычислительная машина Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC), с помощью которой и осуществился первый математический прогноз погоды [15,44].

В ходе работы возникало много математических трудностей, но всё же команда Чарни их преодолела и получила адекватный результат. Это событие дало огромный скачок в развитие гидрометеорологии и послужило её дальнейшему развитию. После успеха американской команды многие страны начали активно работать в этой области.

2 СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Сейчас моделирование атмосферных процессов очень активно развивается, многие страны стремятся разработать собственные модели. Количество моделей постепенно растет и их уже классифицируют по пространственно-временному масштабу атмосферных процессов. Выделяют:

- глобальные модели – модели, которые дают прогноз по всему земному шару или полушарию (наиболее развитые и популярные GFS, ECMWF. В России это модель Гидрометцентра РФ ПЛАВ [34], спектральная модель);
- мезомасштабные (локальные/региональные) модели – используются для моделирования в определенной области (WRF, HIRLAM, COSMO).
- мелкомасштабные или вихреразрешающие модели [34].

Глобальные модели очень важны и полезны. С их помощью мы можем прогнозировать и анализировать положение очень важных погодообразующих планетарных волн, волн Россби, горизонтальный масштаб которых десятки тысяч километров, временной - месяцы. В том числе можем следить за циклонами и антициклонами с масштабом от десятков тысяч до тысяч километров и временем жизни до нескольких недель, а также за фронтами и тропическими и полярными мезомасштабными циклонами с горизонтальным масштабом от сотен до тысяч километров, числовые характеристики этих процессов представлены в таблице 1.1. Кроме этого, глобальные модели полезны тем, что предоставляют данные для граничных и начальных условий для моделей с большим разрешением (локальных, региональных моделей).

Таблица 1.1 – Глобальные процессы в атмосфере и их масштаб [21]

ПРОЦЕСС	МАСШТАБ	МАХ ШАГ СЕТКИ	ВРЕМЯ ЖИЗНИ
Планетарные волны	> 10 000 км	2500 км	месяц
Циклоны Антициклоны	10 000 - 2 000 км	500 км	1 месяц - 1 неделя
Фронты Тропические циклоны	2 000 км - 200 км	50 км	1 неделя - 1 сутки

Сейчас в мире насчитывается 15 глобальных оперативных моделей атмосферы и только 10 из них оригинальные. Оригинальны глобальные модели, созданные с нуля именно этими странами: Россия (ПЛАВ), США (GFS), Европейский центр (модель IFS, ECMWF), Великобритания (UKMET), Франция (ARPEGE), Германия (ICOM), Япония (GSM), Канада (GEM), Китай (BCC), Австралия (ACCESS) [24,25].

На данный момент самыми известными и самыми качественными моделями считаются ECMWF и GFS. В данной работе использовались данные модели GFS (для постановки начальных и граничных условий), поэтому ниже будет дано краткое описание именно этой модели.

GFS – Global Forecast System – гидростатическая глобальная спектральная модель атмосферы разработанная Национальным центром экологического прогнозирования США National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Модель способна давать прогноз на 16 дней с пространственным разрешением 13 километров [37]. Обновляется прогноз 4 раза в день с интервалом 6 часов, то есть в 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 по всемирному координированному времени. По вертикали модель имеет 127 слоев [36]. GFS предоставляет начальные и граничные условия для других моделей.

Сейчас глобальные модели атмосферы стремятся сделать такими, чтобы они могли воспроизводить процессы во всех временных и

пространственных масштабах. Однако сейчас невозможно реализовать такую атмосферную модель, которая бы воспроизводила все атмосферные процессы. Несмотря на то, что наука и компьютерные разработки шагнули далеко вперед на сегодняшний день пространственное разрешение глобальных моделей недостаточно высокое. Сейчас оно в среднем составляет 10-15 км. Ученые в данной области стремятся реализовать модель с шагом 1 км. Так как чем выше пространственное разрешение модели, тем точнее можно описать рельеф местности, а, следовательно, и взаимодействие воздушного потока с локальными неровностями. Более высокое пространственное разрешение в некоторых случаях позволяет отказаться от параметризации процессов, так как они уже становятся сеточными. К таким процессам можно отнести явления местной циркуляции, конвекции и другие. А это в свою очередь способствует уменьшению ошибок [24]. Поэтому чтобы разработать максимально точный прогноз погоды, например, в городе N, где имеются горные массивы, крупные водоемы и присутствует городской остров тепла необходима модель с хорошим пространственным разрешением. Для этой цели были разработаны мезомасштабные модели погоды.

3 МЕЗОМАСШТАБНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Мезомасштабные процессы – атмосферные процессы, горизонтальный масштаб которых находится в пределах 2 000 км – 2 км, а временной масштаб изменяется от колебаний плавучести $\frac{2\pi}{N}$ до суточных колебаний (где N – частота плавучести, она же частота Брента-Вяйсяла).

В атмосфере присутствуют процессы, отличающиеся большим спектром пространственных и временных масштабов. Пространственный масштаб определяется размерами или длиной волны атмосферных возмущений, а временной – временем существования возмущения или периодом колебания.

Надо отметить, что четких границ между спектрами атмосферных процессов не существует. Однако чтобы как-то разделить все процессы в атмосфере их классифицируют по пространственно-временному масштабу. На данный момент существует несколько таких классификация: Orlansky (1975), Thunis-Bornstein (1996), Peilke (2002), Хромов-Петросянц (2004) [10]. И так как мезометеорология довольно молодая научная дисциплина, общепринятой точки зрения на границы пространственно-временных масштабов мезо- процессов не существует. Однако чаще используют классификацию Orlansky (1975) [4].

В классификации Orlansky выделяется 3 подгруппы мезопроцессов:

- мезо- α - процессы и явления, горизонтальный масштаб которых 200—2000 км, время жизни этих процессов от суток до недели. К таким процессам относят: фронты, тропические циклоны.
- мезо- β - процессы и явления, горизонтальный масштаб которых 20—200 км, время существования этих процессов от часа до суток. Это скопление облаков, грозовая облачность, орографические возмущения (ветры и волны), морской бризы, местные циркуляции.

- мезо- γ - процессы и явления, горизонтальный масштаб которых 2—20 км, время жизни этих процессов от нескольких минут до часа. Это, например, развитие кучевого и кучево-дождевого облака, турбулентность ясного неба, гравитационные волны, городская циркуляция, турбулентность [4].

Однако при классификации атмосферных процессов важен не только масштаб процесса, но и соотношение сил, действующих при данном процессе. То есть силы, действующие в атмосфере, по-разному оказывают влияние на процессы разных масштабов.

Соотношение различных сил может служить критерием для классификации атмосферных движений. Так, например, для крупномасштабных процессов, таких как циклон/антициклон, наибольшее значение имеет равновесие между силой Кориолиса и силой барического градиента [5]. Источником их кинетической энергии является потенциальная энергия горизонтальных контрастов температуры. А вот вертикальная скорость частиц атмосферы при этих процессах очень мала по сравнению с горизонтальной. Для мезомасштабных процессов главную роль играет сила плавучести, в то время как действие силы Кориолиса значительно меньше. Источником энергии этих процессов является статическая неустойчивость, а значением вертикальной скорости уже нельзя пренебрегать.

Одним из самых популярных методов численного решения уравнений гидродинамики это метод сеток и для описания волны (волнового процесса) в атмосфере, требуется, чтобы волна была, как минимум четырёхшаговой. Поэтому, строго говоря, чтобы описать процессы α - мезомасштаба необходимо, чтобы шаг модельной сетки был не больше 50 км. Для β - мезомасштабных процессов — шаг сетки не более 5 км, и для γ - мезомасштабных — шаг сетки не более 500 м.

3.1 Местные циркуляции

Изучение локальных (местных) метеорологических особенностей, очень важно для большего понимания основ формирования погоды и климата в конкретных районах, позволяет объяснить причины их возникновения, а, следовательно, знание этих индивидуальных черт региона, в значительной степени может повысить точность метеорологических прогнозов погоды в данной местности. И местные циркуляции являются ярким примером локальных мезометеорологических процессов.

А.Х. Хргиан в своей работе 1958 года [30] определяет местные циркуляции так - воздушные течения небольшой протяженности, возникающие из-за особенностей подстилающей поверхности, которые вызваны неоднородностью нагрева разных участков подстилающей поверхности или орографическими неровностями, которые создают возмущения в поле ветра и температуры [2]. Это определение довольно хорошо описывает местные ветры, однако оно не учитывает роль общей циркуляции атмосферы (ОЦА). С учетом ОЦА местные ветры можно определить как воздушные течения небольшого горизонтального масштаба, от нескольких сотен метров до десятков километров, возникающие из-за локального возмущения в поле ветра общей циркуляции [2]. Только взаимодействие определенного типа воздушных течений с определенными местными условиями может привести к возникновению местного ветра. Определение, данное местным циркуляциям выше, является довольно полным и современным. Однако чтобы к нему прийти, учеными было проведено много исследований.

Изучение местных ветров ведется уже достаточно давно, опубликовано много теоретических и экспериментальных исследований. Однако в основном эти работы направлены на изучение отдельных видов ветров, а не

по всему классу явлений. Тем не менее, существуют работы, объединяющие все местные циркуляции и приводящие их к единой классификации.

Так, например, Гемфрис В. в своей работе еще в 1929 года классифицируя атмосферные движения, выделяет три группы локальных ветров:

- 1) ветры, возникающие из-за локального нагрева поверхности – бризы, горно-долинные ветры;
- 2) ветры, возникающие из-за местного охлаждения – ледниковые, стоковые ветры, бора;
- 3) вынужденные ветры, ветры которые возникают из-за других ветров: фен, вихри, торнадо.

Данная классификация была интересна на момент её публикации, она содержит генетические признаки ветров, однако и содержит серьезные недостатки. Так как совсем не объясняет причины ветров третьей группы.

После Воронцовым П.А. [6] была представлена своя классификация местных ветров, в которой местные ветры подразделяются на ветры термического, орографического и смешанного происхождения. Более полную и современную классификацию местных ветров можно найти в работе Бурмана Э.А. [2].

С энергетической точки зрения по происхождения местные ветры можно разделить на две группы:

- ветры свободной конвекции (развивающиеся под влиянием силы Архимеда);
- ветры, которые могут существовать только за счет кинетической энергии общего переноса.

Из этого ясно, что для возникновения местных циркуляций важен характер поля общей циркуляции в конкретном районе.

По характеру возмущения в поле общей циркуляции ветры можно подразделить на: термические; механические.

Термические ветры - ветры, возникающие из-за термического возмущения в поле ветра (термической конвекции) вследствие неоднородности нагрева или охлаждения подстилающей поверхности. Поэтому причина их возникновения горизонтальные градиенты температуры. Возникают такие ветры, как правило, при ослабленной общей циркуляции. К таким ветрам относятся бризы и горно-долинные ветры.

Бриз – это местный периодический реверсивный ветер, возникающий на берегах больших водоемов. Днем у поверхности земли этот ветер направлен с водоема на сушу, ночью у поверхности с суши в сторону водоема. Наверху направления противоположны.

Горно-долинные ветры – это местные периодические ветры, господствующие в горных районах. Днем эти ветры направлены из долины в горы, ночью – из гор в долины

Механические ветры – ветры, возникающие при вынужденной конвекции из-за механического возмущения в поле ветра, вызванного перетеканием воздушного потока через препятствие. К таким ветрам относятся фен, бора.

Фен – теплый сухой сильный порывистый ветер на подветренной стороне горного хребта.

В данной работе главное внимание уделено местной циркуляции бора, поэтому в следующей главе 3.1 о ней будет сказано более подробно.

Если говорить о ветрах, которые связаны с орографическими препятствиями, то это первостепенно: фен и бора. Орографические неровности Земли оказывают сильное влияние на погоду и климат. Рельеф влияет на циркуляцию атмосферы во всех масштабах, от глобального до микромасштаба.

Горные массивы это локальный постоянный или периодический возбудитель колебаний в атмосфере. Влияние орографии на циркуляцию

атмосферы в мезомасштабе можно подразделить на: термическую и механическую.

Механическое воздействие проявляется как отклонение (вбок, вверх) набегающего воздушного потока. Термическое проявление – создание локальных областей нагрева или охлаждения. Однако это подразделение довольно условно, так как в атмосфере чаще бывает так, что механическая деформация приводит к изменению термодинамического состояния. А термическое воздействие связано с механическим. Так как форма движения воздушного потока, вызванного нагревом, будет зависеть и от механического воздействия.

Механизм влияния орографии на воздушный поток следующий. Воздушный поток двигается к хребту и достигнув его начинает тормозиться у его подножья, особенно при устойчиво стратифицированной атмосфере. Происходит блокирование потока. В это же время наклон горного препятствия создает вынужденный подъем воздуха вдоль его поверхности. Скорость восходящего потока будет зависеть от горизонтальной составляющей скорости ветра и угла наклона горного препятствия. Поднимаясь, водяной пар воздушной массы будет конденсироваться, что приводит к образованию облачности над хребтом и выпадению осадков с наветренной стороны. При переваливании воздуха через хребет наблюдается усиление потока воздуха. Если при этом воздух успел адиабатически нагреться, и если пришедшая воздушная масса была теплая, то у подножья подветренной стороны он будет теплым (наблюдается фен), если же воздух не успел нагреться, и пришедшая воздушная масса была холодная, то с подветренной стороны обрушится сильный холодный ветер (бора).

Также можно отметить, что изучение фенов и боры продолжается по сегодняшний день. До конца механизм их образования не изучен. Существует несколько мнений относительно причин возникновения сильного ветра на подветренной стороне горного хребта. Так, например,

некоторые ученые считают, что фен и бора по происхождению представляют одно и то же явление. Фен (теплый фен) приносит повышение температуры воздуха, бора (холодный фен) сопровождается понижением температуры воздуха [4]. Изменение температуры воздуха связаны с типом (температурой) воздушной массы, которая переваливает через хребет и предшествующей погодой в месте действия ветра.

3.2 Бора

Бора – сильный холодный порывистый ветер, направленный по подветренному склону с невысоких гор вниз в сторону моря. Вертикальный масштаб явления примерно 1 км, горизонтальный несколько километров. Наблюдается бора преимущественно в холодной время года (октябрь-апрель), когда над холодной сушей устанавливается область повышенного давления, а за орографическим препятствием, над более теплым водоемом наблюдается область низкого давления. И так как ветер направлен из области более высокого давления в зону более низкого, воздушный поток направляется в сторону более теплого водоема.

Когда скорость основного воздушного потока мала, а препятствие имеет большую высоту, поток, обладающий малой кинетической энергией, будет либо накапливаться с наветренной стороны хребта либо будет стремиться преодолеть его с краев. А если поток обладает большой кинетической энергией и препятствия не сильно велико, то воздух преодолеет его по кратчайшему пути. При этом поток испытывает сжатие в вертикальной плоскости, а так как воздух стремится пройти препятствие на участках с наименьшей высотой, в ущельях, перевалах, то дополнительно он испытает сжатие в горизонтальной плоскости. И, как известно, из аэродинамики сужение потока в вертикальной и горизонтальной плоскостях сопровождается усилением скорости этого потока.

Усиленный сжатием воздушный поток, приобретает форму струи и, преодолев пик препятствия, опускаясь к поверхности земли, может либо усилиться на подветренной стороне либо ослабнуть. Зависит это от термических условий. Если на подветренной стороне хребта неустойчиво стратифицирована атмосфера, то поток холодного воздуха усилится, опускаясь по нему, а если стратификация устойчива, то опускаясь, поток будет замедляться, расходуя свою кинетическую энергию.

Поэтому можно сказать, что для образования этой мощной местной циркуляции необходимы:

- невысокий горный хребет, ориентированный перпендикулярно основному воздушному потоку,
- крупный водоем по одну из сторон хребта,
- большие температурные контрасты между водоемом и сушей за хребтом,
- соответствующее распределение давления (над сушей высокое, над морем низкое) горизонтальный градиент которого направлен с суши на море,
- неустойчивая стратификация атмосферы.

Такие условия наблюдаются в холодное время года на берегах относительно теплых морей.

Таких мест на Земле несколько.

В России:

- Новороссийск (норд-ост),
- Байкал (местное название ветра – сарма),
- Певек (певекский южак),
- архипелаг Новая Земля (новоземельская бора),
- Кизеловская бора (Средний Урал).

В мире:

- побережье Адриатического моря (северо-восток Италии, север Хорватии и др.),
- Франция (мистраль).

Как уже было сказано выше, важным показателем боры является изменение в поле давления, а именно - падение давления на подветренной стороне и рост на наветренной. Создается суммарная сила давления, которая направлена перпендикулярно препятствию. Такое резкое падение давления на подветренной стороне и рост давления с наветренной стороны хребта, связан не с синоптическими процессами, а с мезомасштабным эффектом обтекания потоком препятствия, а также из-за различных других особенностей, волновой динамики (распространения внутренних гравитационных волн (ВГВ)), блокирования потока. Вклад мезомасштабного увеличения градиента давления в моменты кульминации боры может значительно превышать вклад синоптических процессов.

Бора очень турбулизированное явление, из-за того что ветер при ней крайне порывистый. За одну минуту скорость ветра может меняться несколько раз [34]. Другая особенность боры в том, что скорость ветра при удалении от берега в открытое море очень быстро ослабевает. Так как море имеет меньшую шероховатость в отличие от подстилающей поверхности, то и скорость боры при переходе с поверхности на море должна увеличиться, но в действительности этого не происходит. И уже на расстоянии примерно 10 км от берега бора почти не ощущается.

До настоящего момента бора и бороподобные (феноподобные) ветры до конца не изучены. Существует две теории образования таких ветров:

- гидравлическая теория – связана с гидравлическим эффектом, который характеризуется образованием быстрого течения в узком канале. А создается этот канал ограничением сверху тропопаузой или приподнятой температурной инверсией. Схематическое представление гидравлической теории представлено на рисунке 3.1.

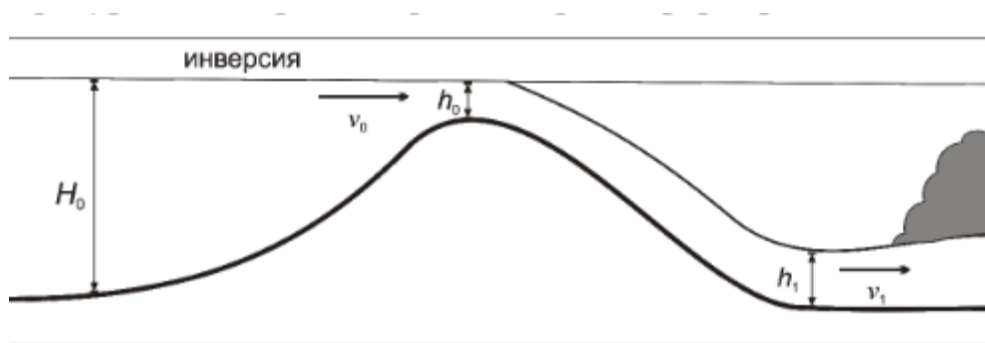


Рисунок 3.1 - Схематическое распределение воздушного потока в соответствии с гидравлической теорией образования подветренных волн [4].

- волновая теория — связана с волновыми процессами в окрестностях орографического препятствия, которое их порождает. Строится эта теория на том, что гравитационные волны, возникшие от горного хребта, распространяются вверх от него и на некотором расстоянии отражаются обратно и вступают в резонанс с волнами, только начавшими движение вверх. Результатом резонанса является усиление воздушного потока с подветренной стороны хребта. При этом скорость потока будет зависеть от высоты (критической высоты), на которой происходит обратное отражение гравитационных волн.

Однако существует и еще одно мнение, которое объединяет эти гипотезы. Оно гласит, что на начальных стадиях развития бороподобных ветров основную роль играет волновая теория, а на более поздних гидравлическая.

3.3 Новороссийская бора

Новороссийск — город на черноморском побережье РФ. Расположен на берегу Цемесской бухты между Черным море и Маркотхским хребтом. Город имеет следующие географические координаты: 44°43'00''с.ш. 37°46'00''в.д.

Вдоль всего Новороссийска с северо-запада на юго-восток протянулся невысокий (400 – 500 м) Маркотхский хребт общая протяженность которого 90 км). Максимальная высота – гора Сахарная голова 550 метров. Расположение хребта относительно города представлено на рисунке 3.2. С западной стороны теплое незамерзающее зимой Черное море. И наличие двух этих объектов создают самые классические и благоприятные условия для развития бory [34].



Рисунок 3.2 – Географическое расположение Маркотхского хребта (белой стрелкой указано преобладающее направление ветра при боре)

Вообще, бора на черноморском побережье РФ наблюдается на участке от города Анапа до Туапсе, но наибольшую силу достигает в городе Новороссийске. В Геленджике скорость ветра при боре несколько меньше, это связано с тем, что в этом районе высота Маркотхского хребта выше, чем в районе Новороссийска, а это приводит к большему блокированию потока.

Продолжительность бору в Новороссийске от 1 до 7 дней. Также можно отметить, что черноморская бора может сопровождаться характерной для неё валовой облачностью, фото облачности при боре в Новороссийске представлено на рисунке 3.3, но может быть и без облачности, это скорее зависит от метеорологических характеристик воздушной массы, которая идет с континента к морю.



Рисунок 3.3 – Облачность при боре в Новороссийске [48]

Первые упоминания о боре в Новороссийске относятся еще к началу-середине 19 века, во времена основания города. А первая работа, посвященная причинам возникновения бору в Новороссийске, была написана русским географом Ф.Ф. Врангелем в 1876 году [7]. В 1907 году Н.А. Коростолевым была написана работа «Новороссийская бора» [17], в которой были представлены данные о продолжительности бору, о её повторяемости, изменчивости метеорологических характеристик [34].

Очень важная работа в изучении и понимании боры, которая внесла большой вклад в теорию явления бора – работа Л.Н. Гутмана и Ф.И. Франкля 1960 года [9]. В ней сделан важный вывод, что условия образования боры зависят от соотношения высоты горного препятствия и мощности натекающего воздушного потока с одной стороны и величины температурного контраста с другой.

Монография «Новороссийская бора» под редакцией А.М. Гусева 1959 года [17] – еще один шаг для понимания процессов формирования боры на подветренной стороне хребта. В работе рассматривается поведение свободной струи, прорывающейся через горный перевал [2]

Так же Гусевым А.М. [17] на примере новороссийской боры были выделены пять типов боры, процессов с наветренной стороны хребта, которые вызывают большую скорость потока при переваливании через препятствие.

Стоковая бора образуется при переваливании через хребет тонкого слоя воздуха (относительно высоты хребта). Усиление скорости ветра на подветренной стороне хребта возникает из-за действия силы тяжести.

Внутримассовая бора образуется при переваливании через хребет мощного, относительно высоты хребта, холодного потока воздуха.

Муссонная бора образуется при переваливании двухслойного воздушного потока, когда мощность нижнего холодного потока соизмерима с высотой препятствия. При этом нижний и верхний слой разделены инверсией и движутся в разных направлениях.

Фронтальная бора образуется при переваливании через хребет холодного фронта [2].

Смешанная бора образуется при наложении одного из выше указанных режимов на другой, так как в чистом виде описанные режимы случаются крайне редко [2].

По синоптической ситуации в районе черноморского побережья новороссийскую бору подразделяют на циклоническую и антициклоническую.

Циклоническая (черная) бора возникает при прохождении циклонов по морю, развивается в тыловых частях средиземноморских и атлантических циклонах, в зоне холодного фронта и при вторжениях холодного арктического воздуха, при этом бора сопровождается сплошной облачностью и осадками.

Антициклоническая (белая) бора наблюдается при ультраполярных процессах, на южной периферии холодных антициклонов (арктического, сибирского, скандинавского) на суше. При такой боре облачности практически не наблюдается, но ветер очень сильный [5,1].

Циклоническая/антициклоническая бора названы по аналогии с черной и белой адриатической борой [29].

Однако часто бора в Новороссийске возникает, когда в средних широтах европейской России устанавливается антициклон, а по субтропикам смещается циклон, на черноморском побережье Кавказа начинают «гудеть вентиляционные трубы» [1,42]. Создается большой горизонтальный градиент давления направленный с суши на море. И если к хребту подходит холодный фронт, то холодный воздух, преодолев препятствие, с огромной скоростью скатывается по подветренному склону Маркотхского хребта, достигая скорости 40 м/с. При этом происходит и сильное похолодание, температура воздуха может опуститься на 15°C. Холодный воздух, обрушившейся на Цемесскую бухту, наносит огромный ущерб городу. Ветер такой силы способен оборвать линии связи и электропередач, рекламные щиты, опрокинуть большие фуры и даже сорвать корабль с якоря и унести в открытое море и выбросить его на берег. Отчего ясно, что заблаговременный прогноз этого явления очень важная задача для синоптиков районов, где она наблюдается.

3.4 Певекский южак

Певек – самый северный город России, город-порт в Чукотском автономном округе. Географические координаты Певека $69^{\circ}42'$ с.ш., $170^{\circ}19'$ в.д. [46]. Расположен город на восточном берегу пролива Средний (пролив Певек), который соединяет Чаунскую губу и Восточно-Сибирское море. Получается, на западе города расположен широкий пролив, а на востоке город подпирает Певекский хребет, протянувшийся с юго-запада на северо-восток на 20 км. Максимальная высота – гора Валькумей 616 метров. Ширина хребта около 5 км [29]. Географическое положение Певека представлено на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Географическое расположение города Певек [45] (белой стрелкой указано преобладающее направление ветра при южаке)

Южак – сильный юго-восточный ветер. По происхождению южак похож на новороссийскую, новоземельскую бору, шпицбергенский фен.

Певекский южак вместе с ними относится к подветренным бурям (downslope windstorms).

Возникает южак, когда поток воздуха начинает двигаться с юга, юго-запада, с материка в сторону арктического побережья. Разгоняясь в тундре, достигая побережья, он упирается в певекский хребет, протяженность которого около 20 км и, преодолев его, с силой обрушивается на город.

Большая работа, посвященная певекскому южаку, была выполнена Зимичем в 1991 [12]. По данным его наблюдений в среднем южак в Певеке наблюдается 62 дня в году. В отличие от новороссийской боры южак чаще наблюдается в теплый период года, однако наиболее сильные случаи отмечаются в период с ноябрь-декабрь. В работе [12] представлено четыре типа циклонических южака и один антициклонический. Циклон над континентальной частью Якутии и антициклон с центром к востоку от Чукотки – типичная синоптическая ситуация для развития певекского южака, представлена на рисунке 3.5. При этом прохождение теплого фронта сопровождается южаком и повышением температуры воздуха в Певеке, что отличает южак от боры. Поэтому певекский южак ещё называют фёном. Однако причиной изменения температуры воздуха и влажности в Певеке является не адиабатическое нагревание воздуха при его скатывании с хребта, как при классических фенах, а адвекция теплой воздушной массы [29]. Зимой воздух при южаке может прогреться с -30°C до -15°C , а то и до 0°C .

Южак, как и бора в Новороссийске, наносит большой ущерб городу. Во время южака люди стараются на улицу не выходить, школы и детские сады закрывают до завершения ветра. Ветер срывает рекламные щиты, крыши многоэтажных домов, сбивает с ног людей, переворачивает машины. Из сказанного понятно, что заблаговременный прогноз этого явления, очень важен.

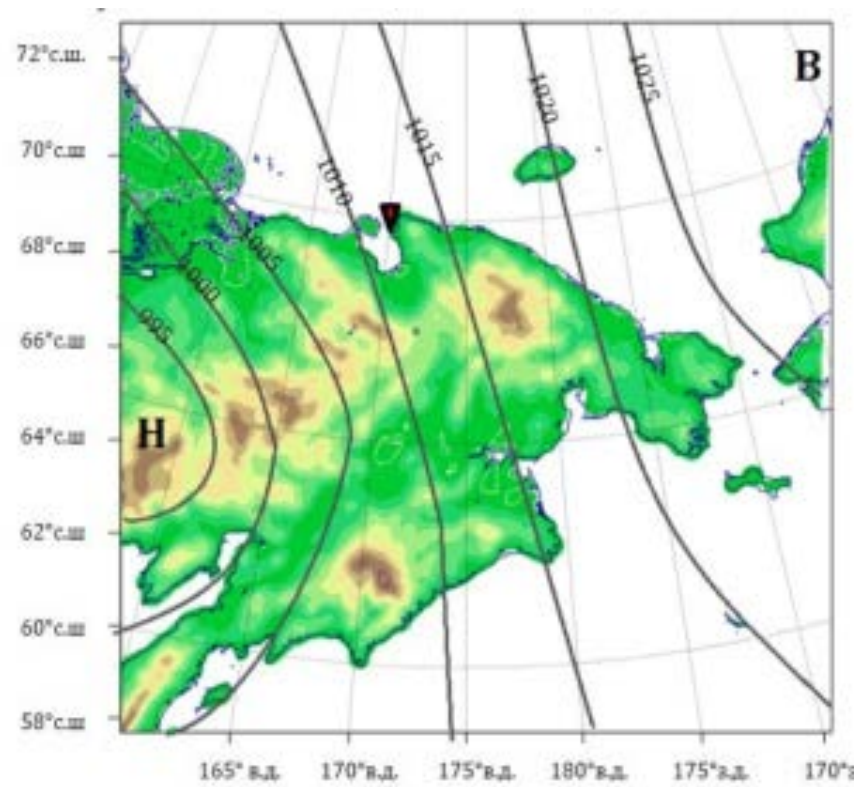


Рисунок 3.5 – Типичная синоптическая ситуация для развития южака [29]

4 МЕЗОМАСШТАБНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ МОДЕЛИ

В основе мезомасштабных моделей атмосферы лежат те же принципы, что и в глобальных моделях, а именно численное решение системы дифференциальных уравнений гидротермодинамики, которая была предложена В.Бьеркнесем ещё в 1904 году. Для описания атмосферных процессов используется система из 7 уравнений с 7 неизвестными. Уравнения:

- три уравнения движения (закон сохранения импульса);
- уравнение неразрывности (закон сохранения массы);
- уравнение притока тепла (закон сохранения энергии);
- уравнение баланса влаги;
- уравнение состояния идеального газа.

Данная система уравнений в полном виде описывает все имеющиеся волны в атмосфере – и медленные длинные волны синоптических процессов и быстрые короткие гравитационные и звуковые (акустические) волны более мелких процессов [19].

Если в модели не учитываются гравитационные волны, а отфильтровываются с помощью гипотезы геострофичности, то есть ветер принимается равным геострофическому ветру, а значит, баланс силы барического градиента и силы Кориолиса не нарушается, то такие модели называются фильтрованными. Раньше считали, что гравитационные волны не оказывают сильного влияния на атмосферные процессы (и на прогноз), однако, они очень важны для качественного прогноза, поэтому сейчас все модели погоды и глобальные и локальные нефильтрованные.

А вот если воспользоваться гидростатическим приближением, то есть третье уравнение движения, описывающее вертикальные изменения, упростить и положить, что вертикальная компонента зависит только от силы

барического градиента и силы тяжести, то получим модель, не учитывающую мелкие акустические волны, то есть гидростатическую модель. Гипотеза гидростатичности, исключая уравнение для вертикальной скорости, предполагает, что вертикальные изменения ускорения очень малы по сравнению с ускорением свободного падения. То есть вес столба воздуха не меняется, а если и меняется, то мгновенно восстанавливается. Однако такое приближение возможно только для моделей с горизонтальным шагом больше 10 км. Поэтому сейчас все мезомасштабные модели негидростатические (так как там шаг по пространству значительно меньше 10 км и акустические волны уже учитываются), а вот глобальные модели всё еще могут быть как гидростатические, например, модели климата или квазигидростатические, или негидростатические [19,13].

Все оперативные мезомасштабные модели погоды связаны с глобальными моделями. Тем, что глобальные модели предоставляют начальные и граничные прогностические данные для мезомасштабной модели.

Мезомасштабные модели, так же как и глобальные очень сложны и дороги в реализации, поэтому они имеются только у страны с сильной экономикой. А сейчас даже происходит объединение нескольких стран, с целью развивать конкретную мезомасштабную модель. Так, например, модель ALADIN (Aire Limitee Adaptation dynamique Developpement International) – основу составляет работа метеослужбы Франции, однако сейчас над этой моделью трудятся и следующие страны Австрия, Венгрия, Румыния, Словакия, Словения, Чехия, Хорватия. Модель COSMO (Consortium for Small-scale Modelling) – основу составляют разработки метеослужбы Германии, а сейчас в концерн COSMO входят Польша, Румыния, Россия, Швейцария, Италия, Греция, Израиль [14]. Модель HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) – разработка скандинавских стран и Испании. Также свои локальные модели имеют США, Япония, Великобритания [19].

4.1 Модель WRF

Модель WRF – это численная негидростатическая (с возможной опцией гидростатичности) мезомасштабная модель исследования и прогнозирования погоды. Современная система моделирования атмосферы, предназначенная как для метеорологических исследований, так и для численного прогнозирования погоды. Модель WRF способна описывать множество атмосферных процессов в масштабах от десятков метров до тысяч километров [38].

Полное название WRF - Weather Research and Forecasting. Разработана модель была во второй половине 1990-х годов, совместно несколькими известными организациями США. Такими как:

NCAR - National Center for Atmospheric Research - Национальный центр атмосферных исследований США;

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration - Национальное управление океанических и атмосферных исследований (США);

NCEP - National Centers for Environmental Prediction - Национальные центры по прогнозированию окружающей среды в США;

AFWA - Air Force Weather Agency – Погодное агентство ВВС США;

NRL – Военно-морская исследовательская лаборатория.

Большим преимуществом этой модели является её открытость, она имеет свободный пользовательский доступ, то есть каждый желающий может скачать её программный код и запустить модель для прогноза. WRF имеет большое количество зарегистрированных пользователей во многих странах мира.

Модель WRF написана на различных языках программирования в основном на Fortran 90 и работает в ОС Linux. Модель способна

воспроизводить атмосферные явления в масштабах от десятков метров до тысяч километров.

Модель WRF имеет два различных динамических ядра ARW (разработано NCAR) и NMM (разработано NCEP) [35].

В данной работе все вычисления проводились с помощью модели WRF с динамическим ядром ARW версии 4.3.6.

4.2 WRF-ARW

WRF-ARW - Weather Research and Forecasting - Advanced Research WRF – мезомасштабная модель исследования и прогнозирования погоды с динамическим ядром ARW. Ядро разработано NCAR - National Center for Atmospheric Research. Эксплуатировать модель в США начали с конца 2004 года [5].

WRF-ARW современная эффективная модель, основанная на решении упругих негидростатических уравнениях движения для сжимаемой жидкости, разработана специалистами из США. WRF-ARW сейчас используют, как ученые в таких областях как динамика, физика, климат, погода на Земле, так и ученые из области прикладных программ о Земле, например, из области гидрологии, экологии и других. Также модель используют специалисты в гидрометеорологических центрах по всему миру для прогноза погоды. Масштабный диапазон описываемых процессов от метров до тысяч километров. Также по этой модели можно получить не только численный прогноз погоды, но и описание таких важных атмосферных процессов, как конвекция, бароклинные волны и многое другое.

Негидростатическая модель, как было сказано выше, значит, что в модели фильтрация звуковых волн не происходит. Модель, основана на уравнениях Эйлера, в основе лежат уравнения, которые описывают

составляющие движения атмосферы по всем трем компонентам. Моделируемая область модели разделена на ячейки, как по горизонтали, так и по вертикали, то есть область дискретизируется, образуя сетку. Уравнения записываются в декартовой системе координат по горизонтали, а по вертикали используется орографическая координата η , у которой поверхности равных значений η у нижней границы области моделирования повторяет рельеф, а при удалении от орографических неровностей стремится к поверхности равного гидростатического давления.

«Сжимаемая жидкость» говорит о том, что используется модель жидкости, при движении которой её плотность переменная величина и зависит от давления и температуры.

Модель WRF-ARW состоит из большого количества блоков, общая схема которых представлена на рисунке 4.1.

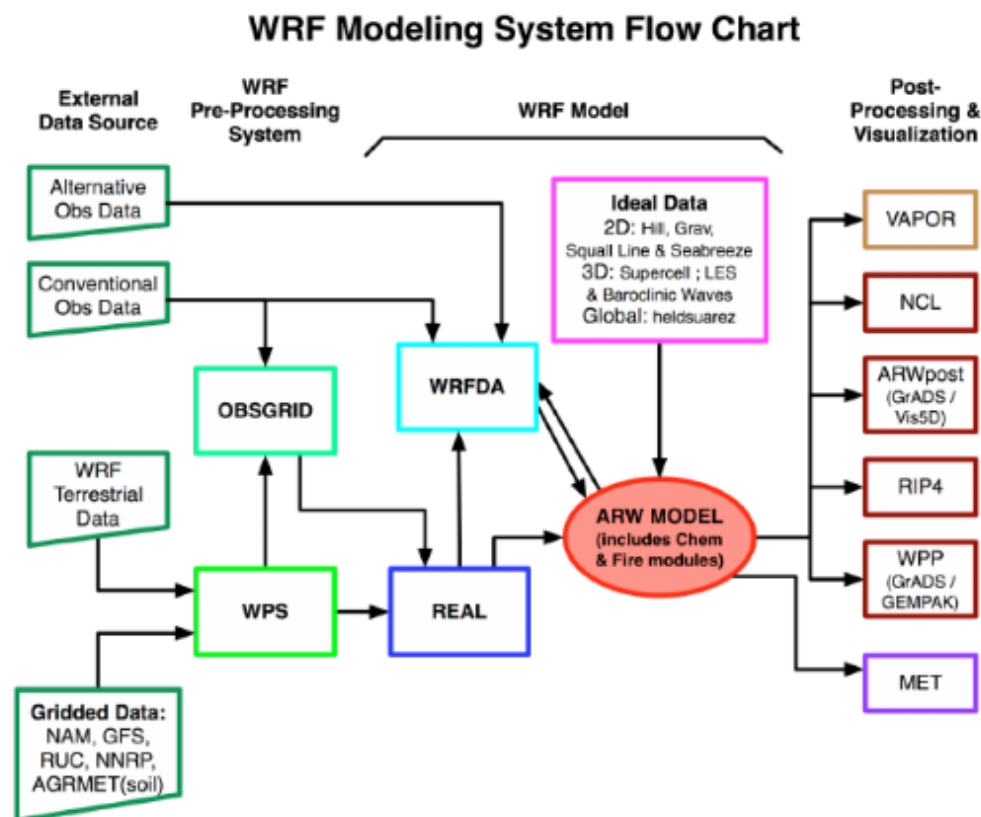


Рисунок 4.1 Общая схема взаимодействия блоков модели WRF [33]

В WRF-ARW можно выделить три основных блока. Это:

- WRF Pre-processing System (WPS) - блок подготовки входных данных, обеспечивает модель начальными и граничными данными;
- динамическое ядро ARW – основной блок, который отвечает за все вычислительные процессы;
- WRF Post-processing System & Visualization - блок последующей обработки и визуализации данных – [28].

В свою очередь блок WPS состоит трех важных программы:

- *geogrid* – определяет размер области моделирования, интерполирует статические и географические данные на выбранную сетку.
- *ungrib* – извлекает нужные данные, расшифровывает их из формата GriB и записывает их в нужном формате. Файлы GriB это метеорологические данные из глобальной модели GFS.
- *metgrid* – производит горизонтальную интерполяцию метеорологических полей, извлеченной программой *ungrib*, в узлы сетки области моделирования, которая была выбрана в программе *geogrid* [31].

Дальше эти данные поступают в динамическое ядро ARW, а именно в программу *real*. Краткая схема представлена на рисунке 4.2

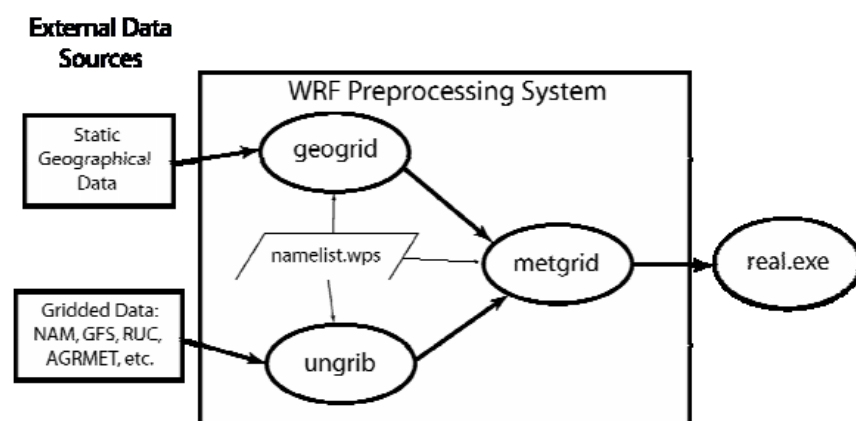


Рисунок 4.2 Схема блока препроцессинга WRF [31]

Дальше следует собственно динамическое ядро модели - ARW, основной блок системы моделирования в котором производятся все вычисления, именно создается прогноз путем решения термодинамических уравнений.

После успешного выполнения расчетов динамическим ядром формируются выходные файлы, которые могут быть визуализированы при помощи различных программ, в данной работе использовалась программа ARWpost с последующей обработке при помощи системы анализа и визуализации GrADS [28].

Пространственная дискретизация в динамическом ядре ARW производится на расштанной сетке «С» Аракавы, то есть компоненты скорости смещены на половину шага от термодинамической переменной, которая располагается в центре.

Другой важной особенностью этой модели является возможность использовать вложенные сетки. Причем возможны разные конфигурации сеток. При моделировании всегда имеется одна внешняя (родительская/материнская) сетка, а также может быть несколько вложенных (внутренних, дочерних) сеток. Каждая вложенная сетка должна полностью находиться в одной более крупной родительской сетке. Дочерние сетки также могут выступать в роли родительской при использовании нескольких уровней вложений. Родительская сетка может содержать одну или несколько дочерних сеток, именно такое вложение использовалось при моделировании боры в данной работе, пример, как это выглядит представлено на рисунке 4.3.

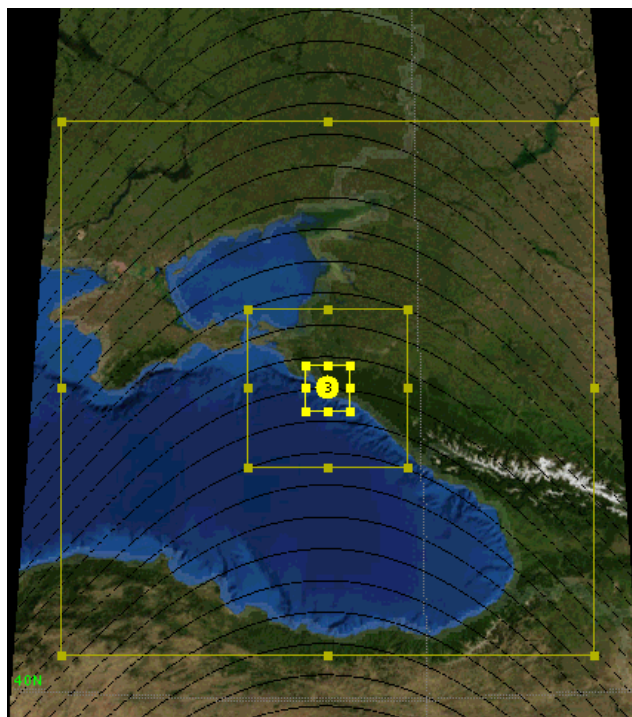


Рисунок - 4.3 Вариант конфигурации вложенных сеток

А также одна родительская сетка может содержать несколько дочерних на одном уровне гнездования, что представлено на рисунке 4.4.

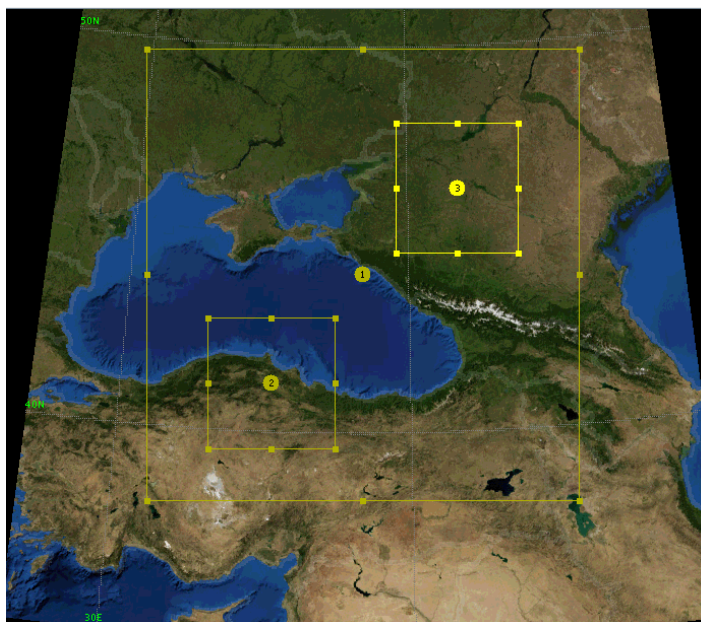


Рисунок - 4.4 Вариант конфигурации вложенных сеток

Однако надо заметить, что перекрытие дочерних сеток между собой происходить не должно, а также, у внутренних сеток, не допускается наличие более одной родительской сетки.

Другая главная черта вложенных сеток WFR-ARW, это то, что дочерняя сетка может быть как статичной, так и движущейся (подвижной). Причем сетка может двигаться по заданной траектории или же движение может быть автоматическим, например, закрепленным за изобарой 800гПа [32].

Однако при использовании вложенных сеток существует и еще одно важное ограничение. Вложенные сетки могут располагаться только в горизонтальной плоскости. Плюс шаг каждой дочерней сетки должен быть в целое число раз меньше, чем шаг родительской (предпочтительнее в три раза) [34].

Интегрирование по времени происходит методом Рунге-Кутты второго и третьего порядка с использованием метода расщепления. Методы Рунге-Кутта – это группа численных методов решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений (то есть неизвестная функция зависит только от одной переменной) и их систем. Интегрирование по времени методом Рунге-Кутта в данной модели состоит из двух основных циклов. Внешний цикл с большим шагом по времени, внутренний цикл имеет меньший шаг по времени и используется для описания акустических волн, кстати, это еще одно достоинство этой модели.

Другим большим преимуществом модели WRF-ARW является широкий набор параметризаций физических процессов. Параметризация физических процессов в моделях – определение влияния подсеточных (не описывающихся на модельной сетке) процессов на сеточные поля через характеристики сеточных полей. Задача параметризации – описать процессы, которые на сетке не описываются явно, через параметры (характеристики) процессов, которые на сетке явно описываются. Модель распределяет

параметры подсеточного процесса на всю ячейку модели и подсеточный процесс вносит изменения в свойства полей целой ячейки.

Процессы, которые параметризуются в модели WRF-ARW:

- микрофизика влаги;
- длинноволновое излучение;
- коротковолновое излучение;
- приземный слой;
- планетарно-пограничный слой;
- конвекция.

5 ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1 Выбор конфигурации модели

Перед началом непосредственно моделированием необходимо:

- создать область моделирования, то есть выбрать необходимый участок на Земном шаре;
- выбрать нужный тип картографической проекции;
- выбрать пространственное разрешение;
- выбрать нужное количество вложенных сеток, соотношение вложенных сеток.

Всё это можно сделать с помощью пакета WRF Domain Wizard – приложения, которое позволяет интерактивно работать с системой препроцессинга (предварительной обработки) WRF-ARW. Запускается оно с помощью команды `portal` в строке `linux`. На фото рисунка 5.1 представлено, как выглядит выбор нужного региона.



Рисунок – 5.1 Выбор области моделирования в WRF-ARW

Далее нужно загрузить набор входных данных и создать на него ссылку. Происходит это с помощью команды:

`./link_grib.csh /data1/ncep/год начала прогнозирования цифрами/fnl_год месяц день* дата начала прогноза /data1/ncep/ год конца прогнозирования цифрами/fnl_год месяц день* дата конца прогноза`

При счете модель использует начальные и граничные данные глобальной модели GFS с горизонтальным разрешением $1,0^\circ$ на $1,0^\circ$ с сервера NCEP - <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov> [16].

После этого запускается модуль препроцессинга, который состоит из трех команд:

`./geogrid.exe` – эта команда обрабатывает статистические данные выбранного региона, такие как рельеф, гидрография, типы почв, альбедо.

`./ungrib.exe` – команда для распаковки начальных данных. Выбирает нужные данные, извлекает их из начальных полей (например, результатов анализа и/или прогноза глобальной модели GFS), расшифровывает из формата GriB и записывает их в виде более простого формата (формат начальных данных и рабочий формат можно выбирать при задании характеристик модели).

`./metgrid.exe` – команда производит горизонтальную интерполяцию метеорологических данных, полученных программой `ungrib`, в граничные узлы сетки области моделирования.

Далше эти данные поступают в динамическое ядро ARW, в котором с помощью численных методов происходит решение дифференциальной системы уравнений в частных производных. Этот процесс состоит из двух команд:

`./real.exe` – команда выполняет вертикальную интерполяцию начальных данных и формирует граничные условия. Real, так как прогноз производится по реальным данным.

`./wrf.exe` – собственно запуск счета модели.

Более подробные параметры моделирования новороссийской боры представлены в главе 5.2, певекского южака в главе 5.3.

В данной работе для всех исследуемых случаев срок прогноза составил 24 часа. В среднем для всех трёх сеток модель затрачивала на расчёты 2-3 часа.

Все настройки моделирования содержатся в файлах `namelist.wps` и `namelist.input`, которые создаются по окончании выбора и настройки области моделирования. В этих файлах указаны такие важные параметры, как шаг сетки по горизонтальным осям (dx , dy) в метрах, шаг по времени (dt) в секундах. А также выбранные схемы параметризаций: микрофизики, длинноволновой радиации, коротковолновой радиации, приземный слой, поверхность суши, пограничный слой, конвекция, соответственно. Часть файлы `namelist.input` с определением параметризаций представлена на рисунке 5.2.

```
&physics
mp_physics           = 3,           3,           3,
ra_lw_physics        = 1,           1,           1,
ra_sw_physics        = 1,           1,           1,
radt                 = 30,          30,          30,
sf_sfclay_physics    = 1,           1,           1,
sf_surface_physics    = 2,           2,           2,
bl_pbl_physics       = 1,           1,           1,
bldt                 = 0,           0,           0,
cu_physics           = 1,           1,           0,
```

Рис 5.2 Пример записи определения параметризаций в файле
`namelist.input`

После успешного завершения счета модели, возможно, провести визуализацию полученных результатов:

`./ARWpost.exe` - данная команда полученный результат моделирования записывает в файлы бинарного формата и файлы описания (файлы метаданных `ctl`) для дальнейшей работы в GRADS.

GRaDs – программа для визуализации геофизических данных.

5.2 Описание численных экспериментов по моделированию Новороссийской боры

Численные расчеты в данной работе проводились с использованием современной мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW версии 4.3.6. Прогноз для всех случаев оставлялся на 24 часа. При моделировании использовались три вложенные сетки, с пространственным разрешением 9, 3 и 1 км. Конфигурация вложенных сеток при моделировании новороссийской боры представлена на рисунке 5.3.

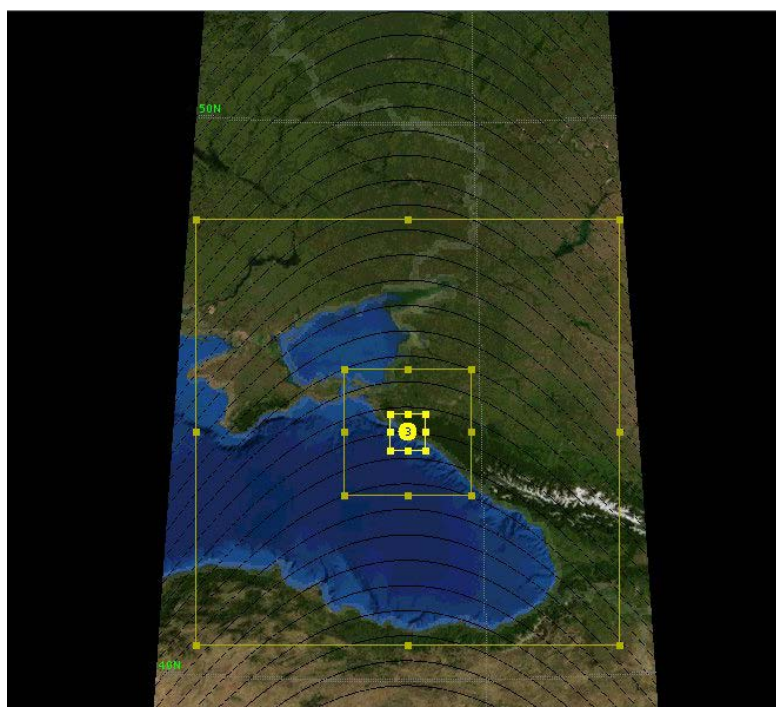


Рисунок 5.3 – Размер и расположение вложенных сеток при моделировании

По вертикали использовалась учитывающая рельеф η координата с 35 уровнями (верхняя граница на уровне 50 гПа) для всех сеток. Шаг

интегрирования по времени 60 секунд на крупной сетке, 20 секунд на средней сетке, 6,7 секунд для мелкой сетки. Во всех экспериментах использовалась полярная стереографическая проекция. Начальные и граничные условия получены из глобальной модели GFS с пространственным разрешением $1,0^\circ \times 1,0^\circ$, которые обновлялись каждые 6 часа. Во всех проведенных расчетах схемы параметризации использовались следующие.

Микрофизика описывает процессы преобразования водяного пара в атмосфере, в облаках, осадках. В работе использовалась схема *Single-Moment (WSM)* 3. Данная схема описывает три состояния гидрометеоров: водяной пар, облачная вода/лед, дождь/снег [32,41].

Для описания длинноволновой радиации использовалась схема RRTW - *Rapid Radiative Transfer Model*. Схема использует заранее известные табличные данные для точного представления длинноволнового диапазона радиации. Схема учитывает процессы, связанные с водяным паром, озоном, углекислым газом и другие [32,41].

Для коротковолновой радиации использовалась схема *Dudhia*, которая учитывает поглощение и рассеяние радиации при ясном небе и облаками [32,41].

Приземный слой описывается с помощью схемы *подобия Монино-Обухова* [41].

Для описания поверхности суши применялась схема *Noah Land-Surface*, которая учитывает температуру и влажность почвы в четырех слоях [32,41].

Параметризация пограничный слой реализовывалась по схеме *Yonsei University Scheme (YSU)* [32,41].

Конвекция описывалась с помощью схемы *Kain-Fritsch* только в доменах с разрешением 9 и 3 км. Во вложенной сетке с разрешением 1 км параметризация конвекции не использовалась [32].

Сводная таблица используемых параметризаций представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Используемые параметризации при моделировании боры

Смоделированные случаи боры	Параметризации					
	Микрофизика	Длинноволновая радиация	Коротковолновая радиация	Приземный слой	Планетарно-пограничный слой	Конвекция
25-28.01.2012	Single-Moment (WSM) 3	RRTW - Rapid Radiative Transfer Model	Dudhia	MM5 - теория подобия Монино-Обухова	Yonsei University Scheme (YSU)	Kain-Fritsch
06-09.02.2012						
09-11.03.2014						
28-30.11.2018						
10-12.03.2021						

Расчетная область моделирования задана тремя сетками:

d01 с размером 95 узлов с запада на восток , 95 узлов с юга на север 39,6° – 49,1° с.ш. и 31,3° – 44,7° в.д.;

d02 - 85 узлов с запада на восток, 85 узлов с юга на север 42,4° – 46,6° с.ш. и 35,5° – 40,7° в.д.;

d03 - 73 узлов с запада на восток, 73 узлов с юга на север 43,2° – 45,8° с.ш. и 36,7° – 39,7° в.д.. На рисунке 5.4 представлено положение используемых вложенных сеток.

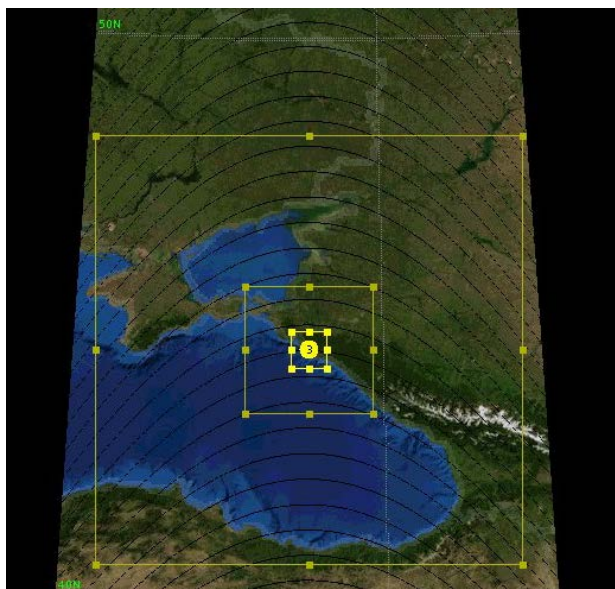


Рисунок 5.4 Положение используемых вложенных сеток при моделировании новороссийской боры

Для исследования было выбрано 5 случаев сильной боры в городе Новороссийске.

А именно:

06-08 февраля 2012 года,

25-27 октября 2014 года,

09-11 марта 2014 года,

10-12 марта 2021 года.

28-30 сентября – 01 октября 2021

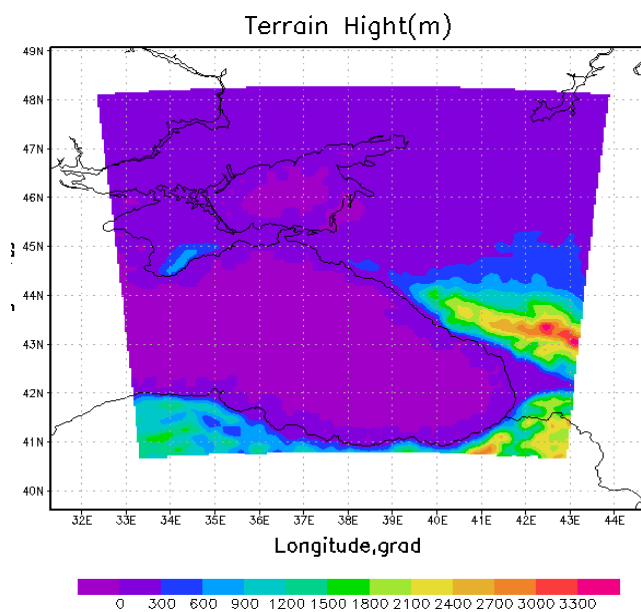
Для всех указанных случаев были смоделированы и проанализированы поля таких метеорологических параметров как скорость ветра и температура воздуха для всех трёх сеток. Также были построены вертикальные разрезы (до уровня 850 гПа, 550 гПа, 250 гПа) для указанных параметров плюс вертикальный разрез вертикальной компоненты скорости ветра. Для всех случаев результаты были получены через каждый час. Для каждого случая боры была представлена и проанализирована синоптическая ситуация.

Перед моделированием метеорологических характеристик при боре визуально был воспроизведен такой параметр, как Terrain hight – высота местности, чтобы убедиться, что на воздушный поток оказывают влияние орографические неровности той высоты, о которых говорится в теории этого явления. Модельные данные параметра Terrain hight представлены на рисунке 5.5.

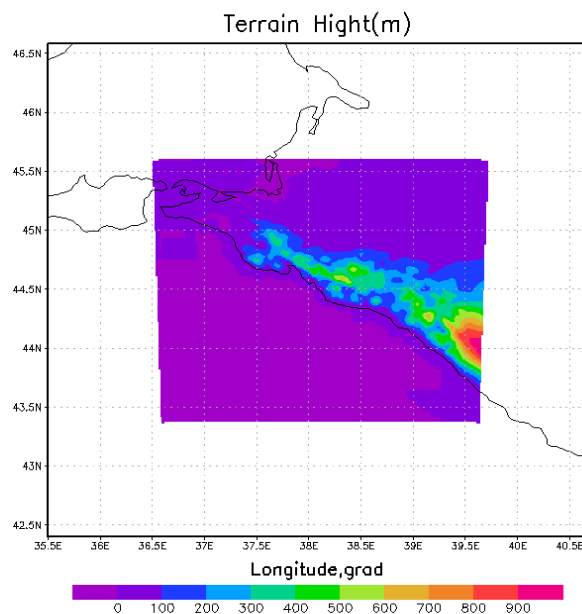
Самым информативным для анализа высоты местности оказался рисунок г. На нем отлично видно, что в районе Цемесской бухты имеются орографические возвышенности. А именно горы, высота которых достигает 500-550 метров, что в свою очередь совпадает с натурными топографическими данными в этом районе, подробнее об этом написано в главе 3.3.

5.2.1 Бора 06-08 февраля 2012 года

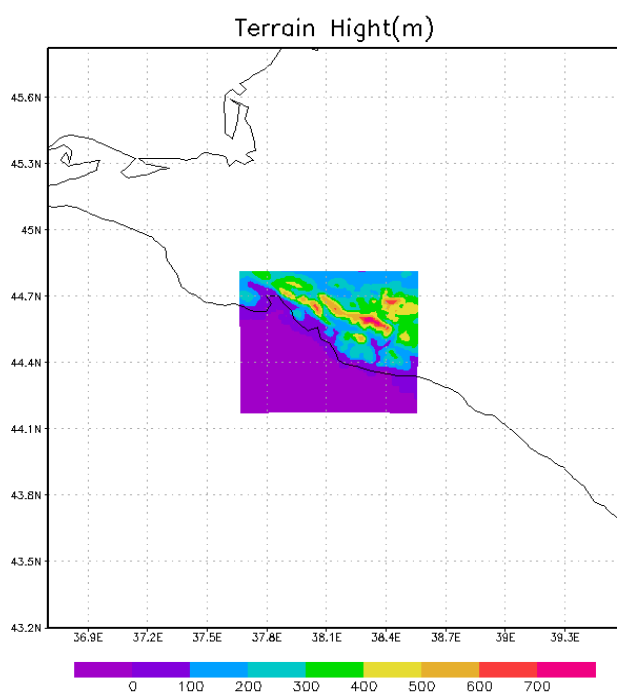
Для возникновения боры, как говорилось выше, необходимы особые синоптические условия. Синоптическая обстановка за 7 февраля 2012 года показана на рисунке 5.6.



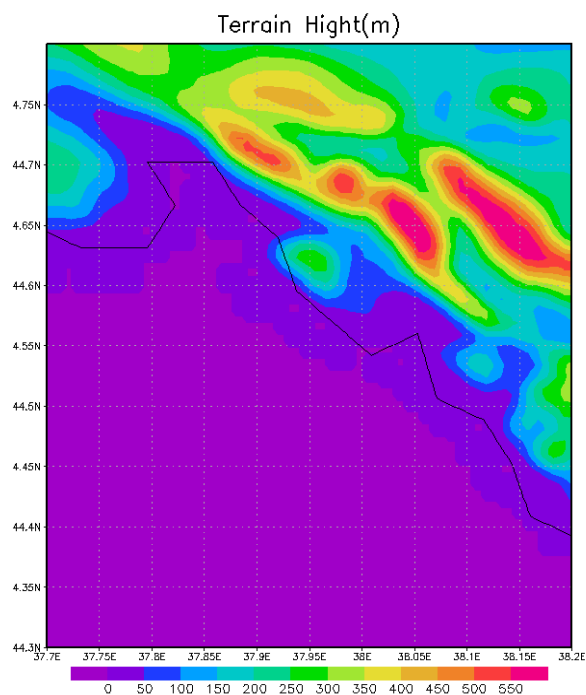
а



б



в



г

Рисунок 5.5 – Результаты моделирования высоты местности для а - материнской сетки, б – вложенная сетка среднего размера, в – вложенная сетка малого размера, г – вырезанная область района города Новороссийск.

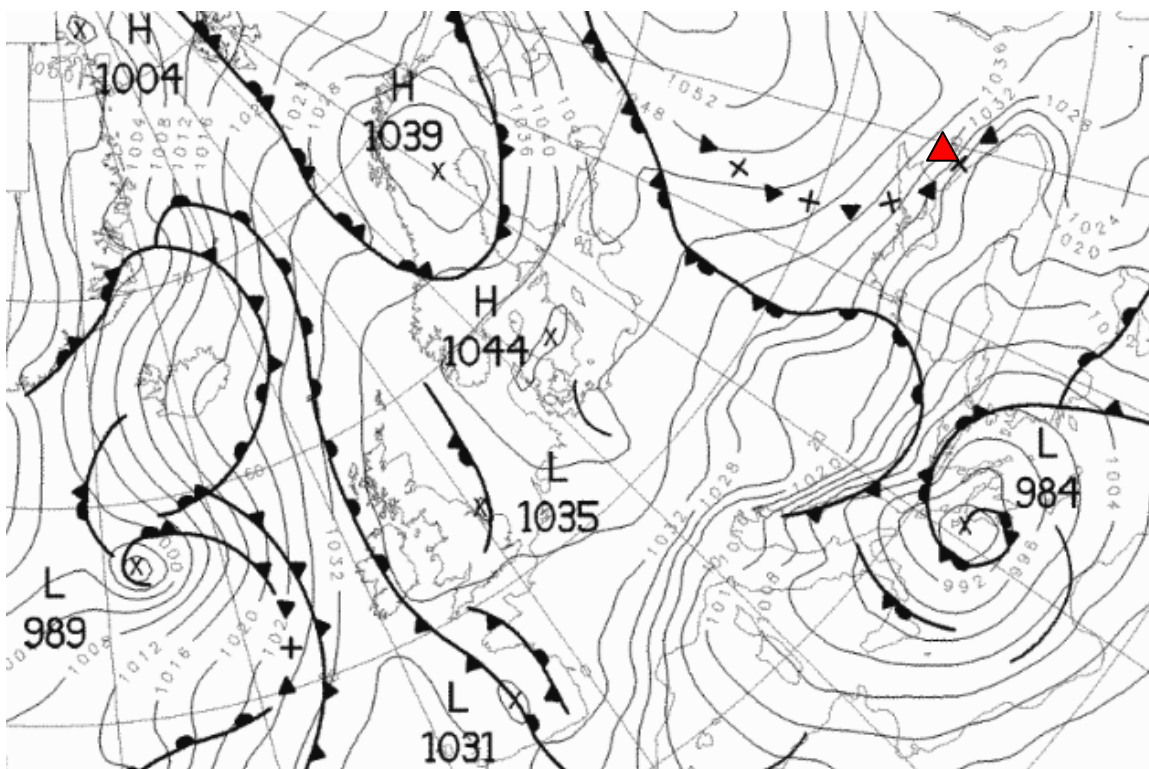


Рисунок 5.6 – Синоптическая ситуация 07 февраля 2012 года. Красным треугольником обозначен город Новороссийск [47]

Анализируя синоптическую обстановку 07.02.2012 можно отметить, что на севере Скандинавского полуострова господствует антициклон, в то время как на юге, в Средиземном море циклон. В районе черноморского побережья наблюдается большой барический градиент 55 гПа на 3,5 тысячи километров, а также фронт окклюзии. По синоптическим условиям, полученным по данным метеорологической службы Великобритании (UKMO) с сайта WETTERCENTRALE [<https://www.wetterzentrale.de>], бора в районе Новороссийска должна быть. Чтобы в этом убедиться, далее был смоделирован и проанализирован главный параметр при боре, пространственное поле ветра и другие метеорологические параметры. Результаты моделирования поля ветра представлены на рисунках 5.7 – 5.15.

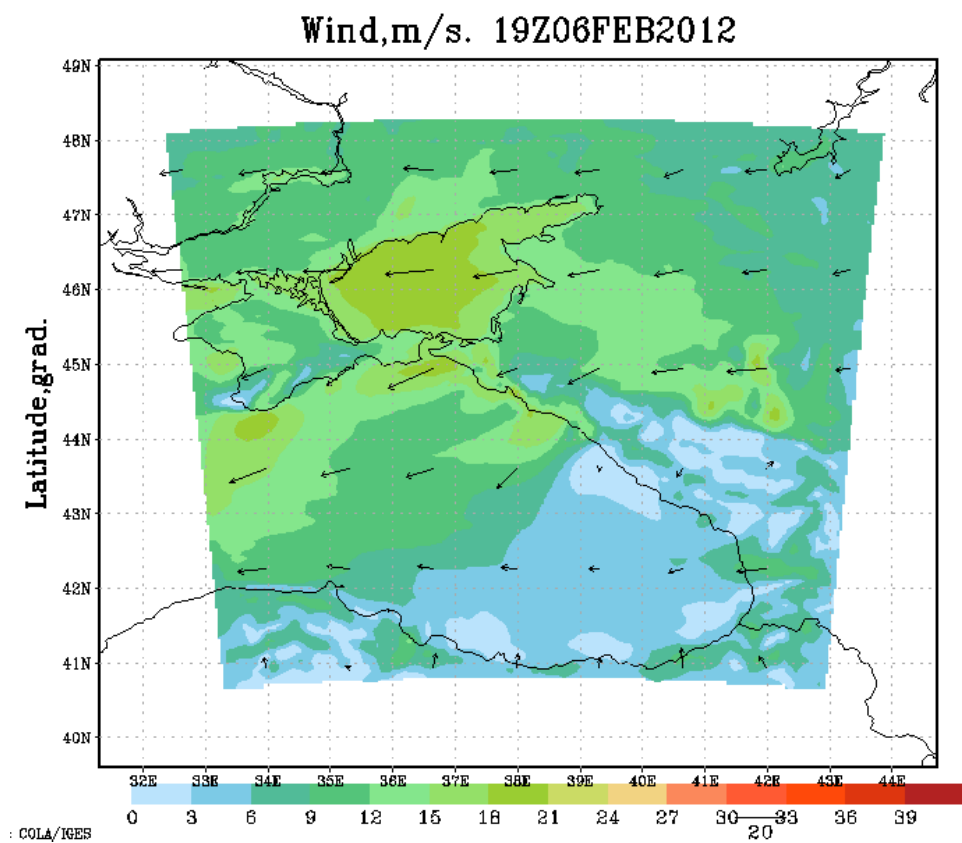


Рисунок 5.7 – Поле ветра в момент зарождения боры на материнской сетке

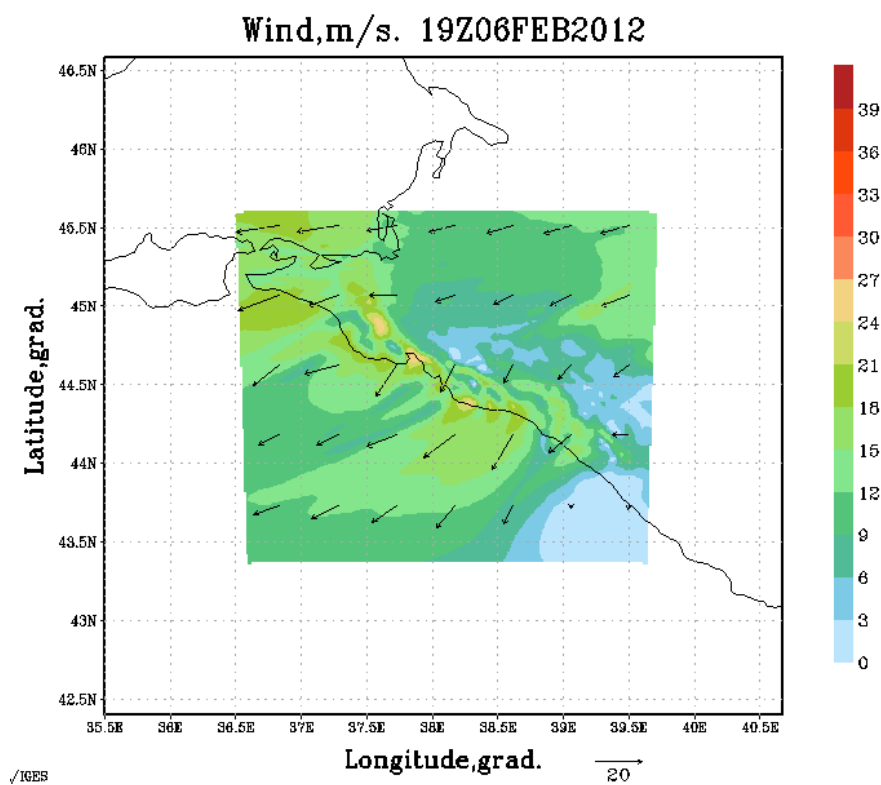


Рисунок 5.8 – Поле ветра в момент зарождения боры на средней сетке

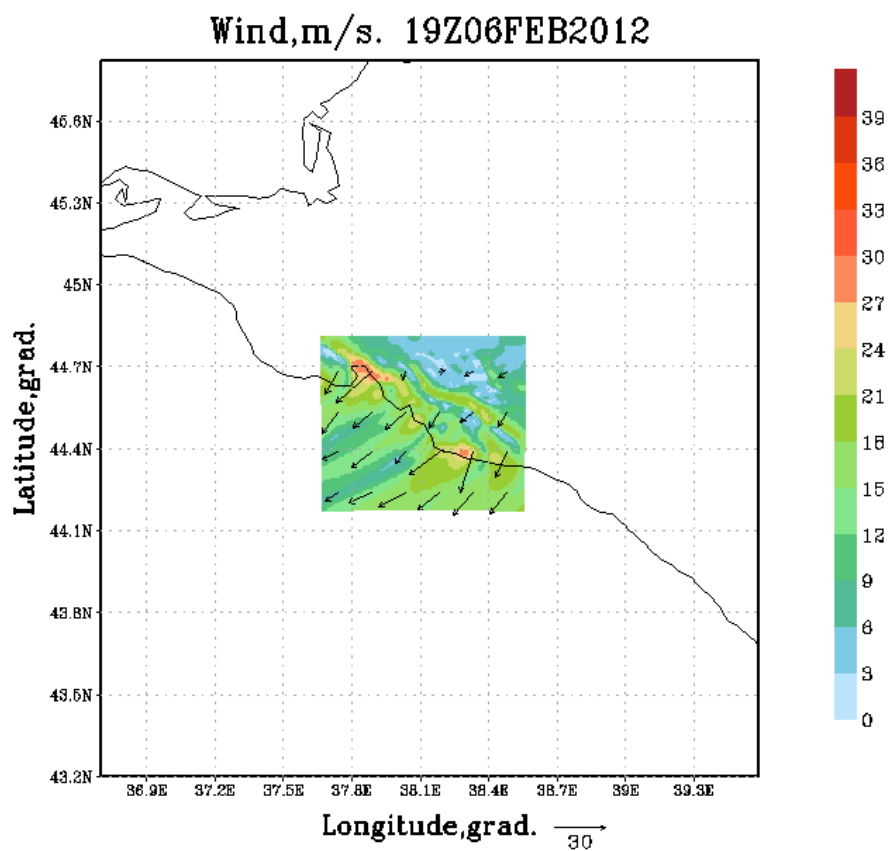


Рисунок 5.9 – Поле ветра в момент зарождения боры на мелкой сетке

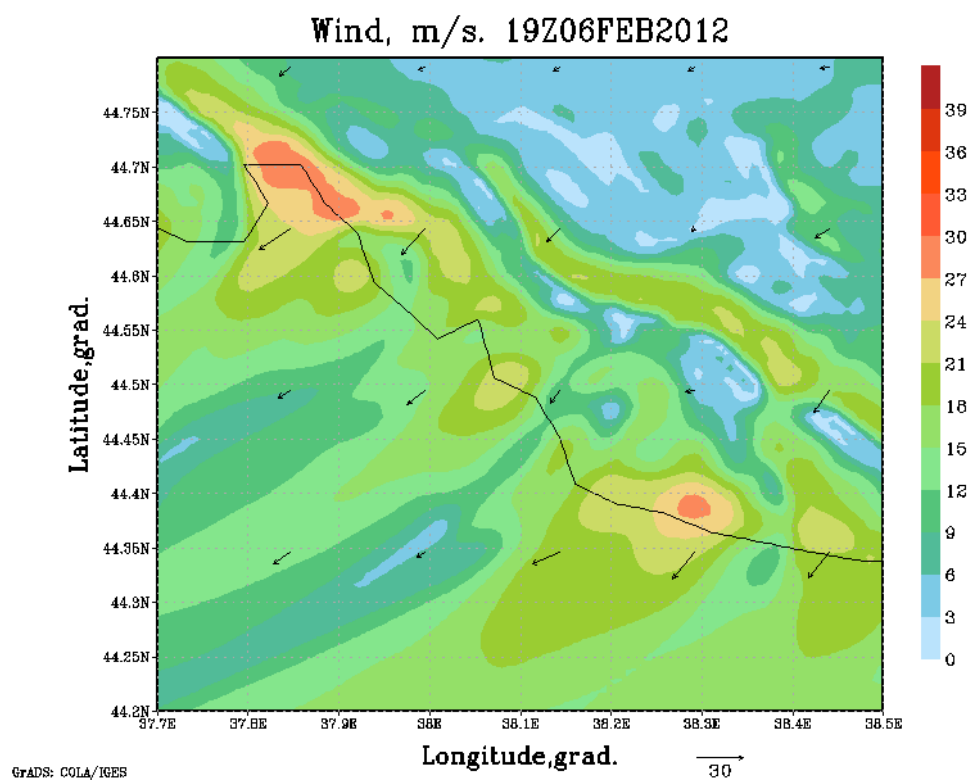


Рисунок 5.10 – Поле ветра в момент зарождения боры на мелкой вырезанной сетке

При моделировании на мелкой сетке модель выдает область, которая представлена на рисунке 5.9, с белыми полями по краям, чтобы рисунок был более информативен незадействованные поля обрезаются. Происходит это путем задания диапазона географической широты и долготы, результат показан на рисунке 5.10. Далее везде мелкая сетка при моделировании боры будет выглядеть так.

Проанализировав поля, представленные на рисунках 5.7 - 5.10 можно отметить, что на самой мелкой сетке, пространственное разрешение которой составляет 1км, 6 февраля в 19 часов в Цемесской бухте ветер достигает значений 27-30 м/с. В то время как на большой и средней сетке воспроизводятся значения скорости ветра несколько ниже – на большой сетке 12-15 м/с, на средней 24-27 м/с. Однако, данные о направлении ветра в целом воспроизведены одинаково правильно на всех сетках - северо-восточное направление ветра при боре в Новороссийске преобладает. Из этого можно сделать вывод, что оценивать фазу боры и говорить о более точных значениях скорости ветра, анализируя результаты материнской сетки с пространственным разрешением 9 км – нельзя. Для этого надо использовать мелкую сетку с разрешением 1 км. Однако результаты на крупной сетке так же очень полезны. С их помощью можно оценить реальный пространственный масштаб этого явления. Модель его хорошо воспроизводит. Как описано в теории боры, так и воспроизводит модель – около 100 км. Ниже будут представлены поля ветра при боре в момент ее зарождения по результатам моделирования на мелкой сетке.

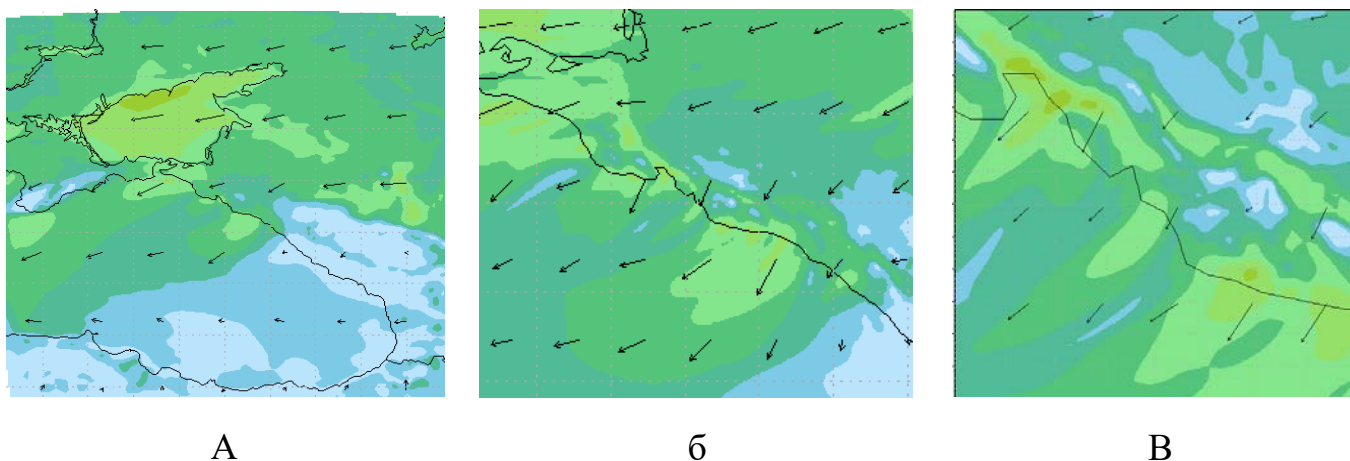


Рисунок 5.11 – Поля ветра в момент зарождения боры 13 часов 06.02.2012, где а – крупная модельная сетка, б – средняя сетка, в – мелкая сетка

Затем были проанализированы данные за весь исследуемый срок 06-09 февраля, и было выявлено, что кульминация боры приходится примерно на 22 часа 07 февраля. Далее на рисунках 5.12 – 5.14 будет представлено поле ветра в момент кульминации боры.

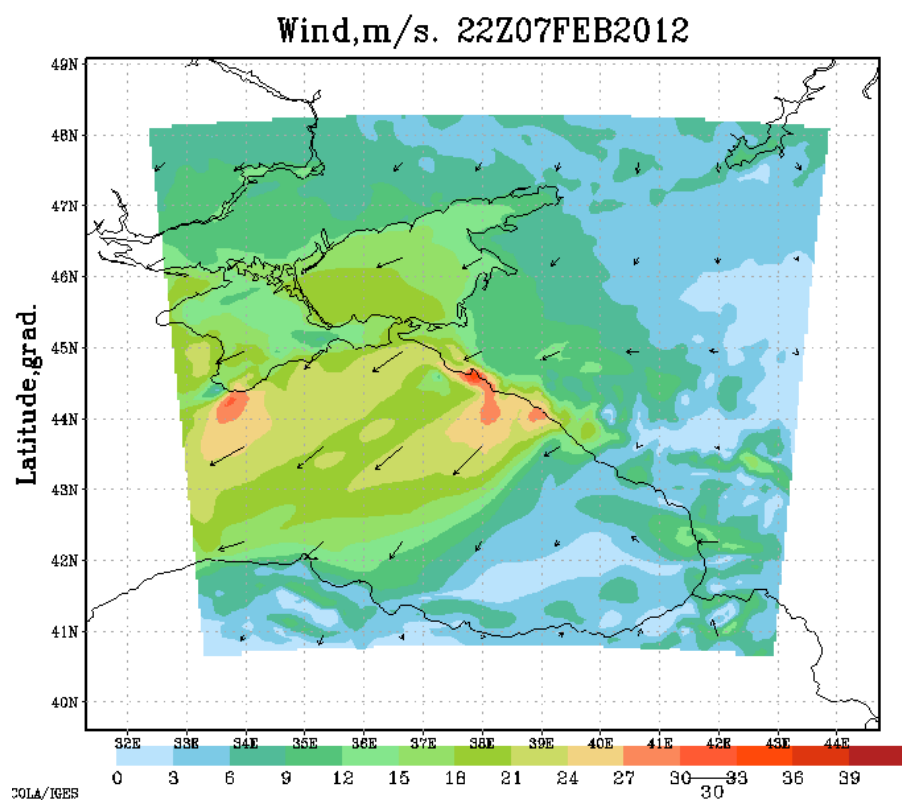


Рисунок 5.12 – Поле ветра в момент кульминации боры (материнская сетка)

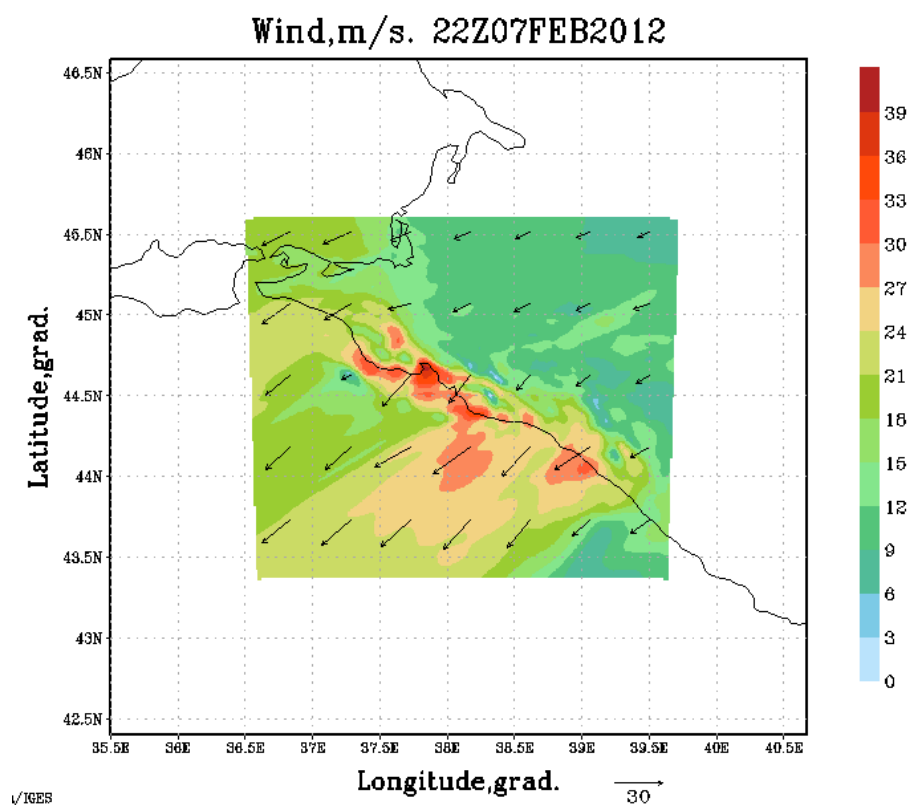


Рисунок 5.13 – Поле ветра в момент кульминации боры (средняя сетка)

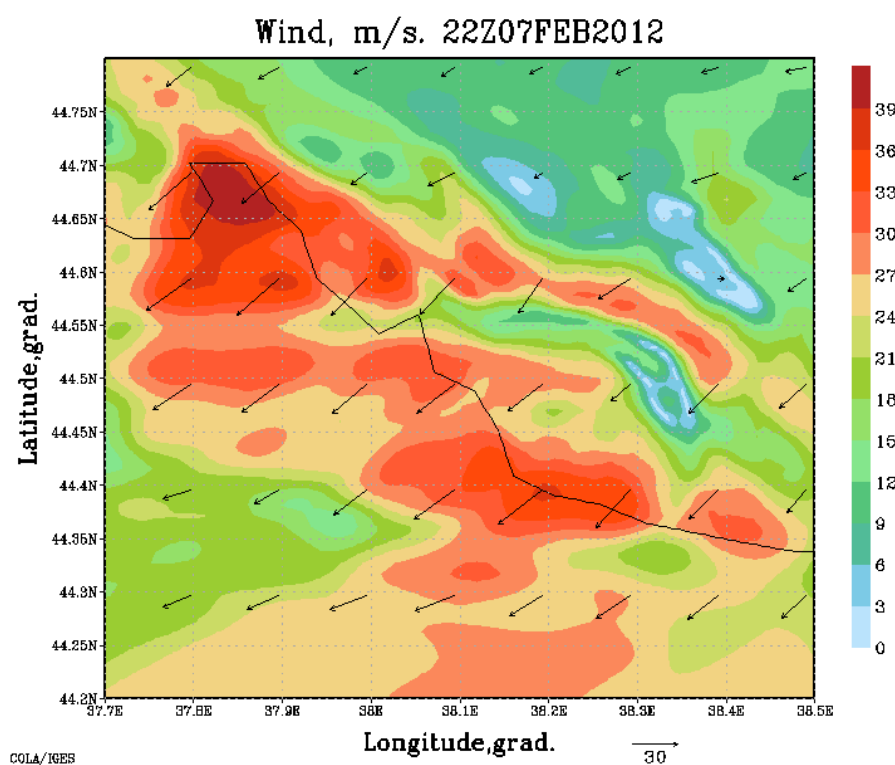


Рисунок 5.14 – Поле ветра в момент кульминации боры (мелкая сетка)

Анализируя поле ветра в момент кульминации бory можно отметить, что наибольшие скорости ветра наблюдаются на береговой линии на участке, примерно, от Анапы до Туапсе. Однако максимальные скорости присутствуют именно в Цемесской бухте, на берегу которой расположен город Новороссийск. Модель верно описывает усиление скорости ветра в восточной части Цемесской бухты и ее уменьшение в западной части Новороссийска и в Геленджике, что возможно связано с увеличением высоты Маркотхского хребта и увеличением блокирования потока. Это полностью характерно для бory в этом регионе. Скорость ветра в момент кульминации бory на мелкой сетке достигает 40 м/с. На рисунках в момент кульминации бory, особенно на рисунке 5.12, отлично видно, что это локальное, то есть модель верно описывает горизонтальные размеры этого явления. По мере удаления от берега в море скорость ветра быстро уменьшается, что также характерно для бory.

Для наглядного представления поля ветра при боре ниже представлен момент кульминации на трех используемых сетках.

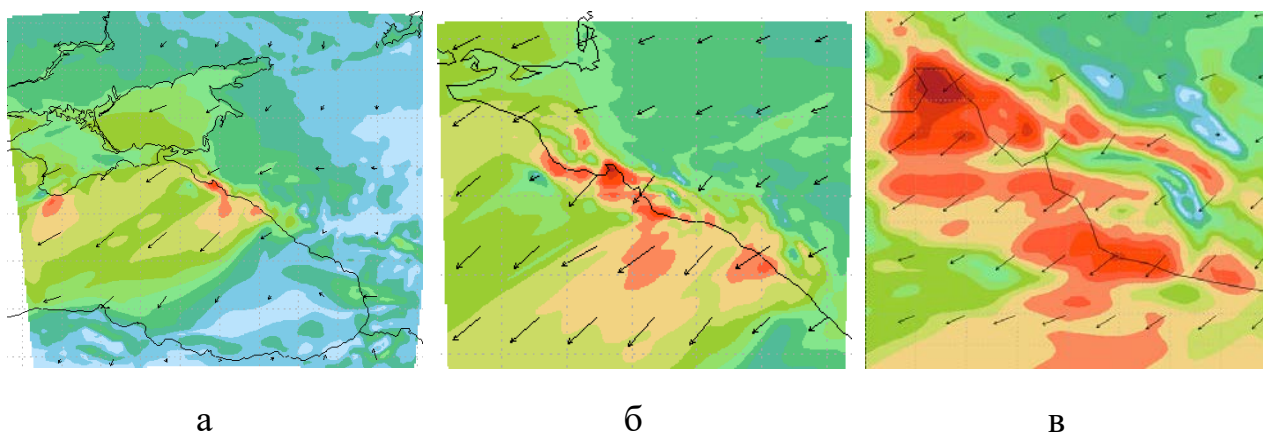


Рисунок 5.15 – Поле ветра в момент кульминации бory, где а – поле ветра на крупной сетке, б – средняя сотка, в – мелкая сетка.

В моменты завершения боры поле ветра очень похоже на поле при ее зарождении, ветер после кульминации уже сильно ослаб, но направление сохраняется северо-восточное.

Другим важным метеорологическим параметром при боре является температура воздуха. С помощью модели для всех трех сеток были получены поля температуры воздуха за период 06-09.02.2012 с дискретностью 1 час. Результаты моделирования в определенные сроки представлены на рисунке 5.16 – 5.18. Проанализировав эти данные, было выявлено, что на мелкой сетке (географическая область: 37.7 – 38.5 в.д., 44.2 – 44.8 с.ш., с пространственным разрешением 1x1 км) температура воздуха менялась в диапазоне от -22°C до 5°C. В районе Цемесской бухты с 00:00 до 13:00 06.02.2012 температура была около 2-4° С (рисунок 5.16), с 13 часов утра начинается активное падение температуры. Через сутки температура в бухте упала до -10°C. К кульминации боры 22:00 07.02 температура упала еще на 5° градусов, достигнув своего минимума в -16°C (рисунок 6.76). С 12:00 часов 08.02 температура начинает расти, на последний исследуемый срок она составила (-6°C) – (-8)°C (рисунок 5.18).

Можно отметить, что такой ход температуры при боре вполне естественен, причем он повторяет (обратно) ход поля скорости ветра. В момент зарождения боры начинает возрастать скорость ветра в этот момент начинает падать температура воздуха, в момент кульминации боры, во время максимальной скорости ветра в бухте отмечается и минимальная температура. По мере затухания боры температура в бухте начинает повышаться. Такая корреляционная связь скорости ветра и температуры воздуха характерна для мезомасштабного явления - бора.

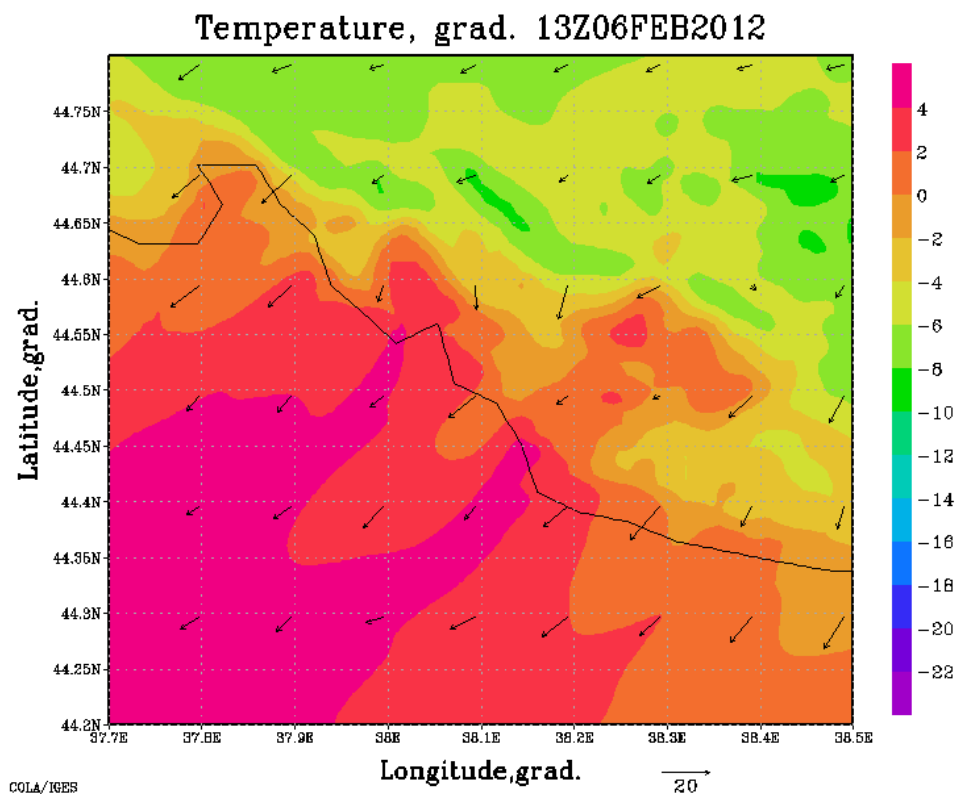


Рисунок 5.16 – Поле температуры в момент зарождения боры

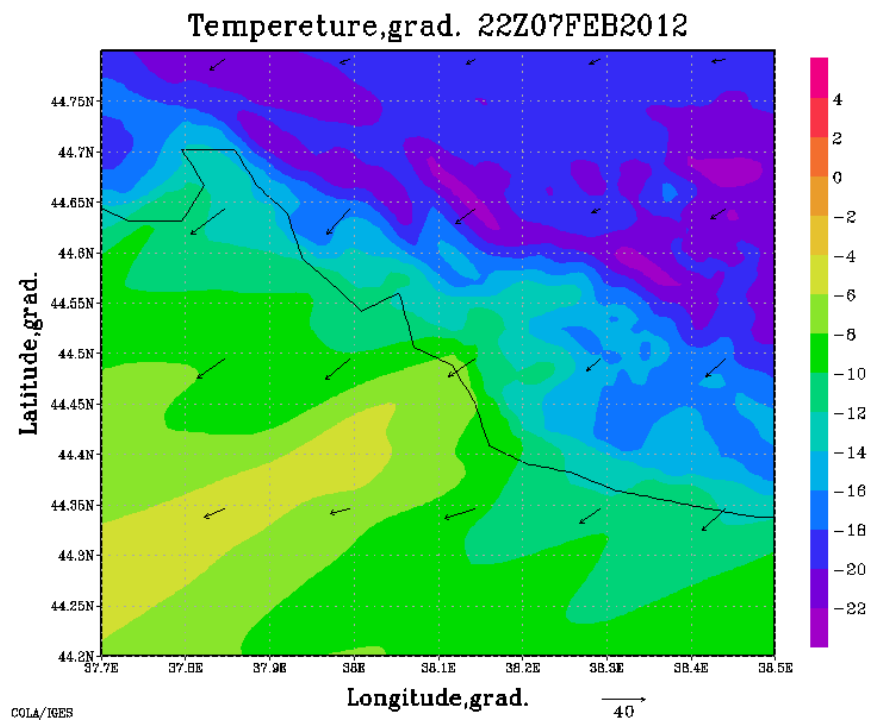


Рисунок 5.17 – Поле температуры в момент кульминации боры

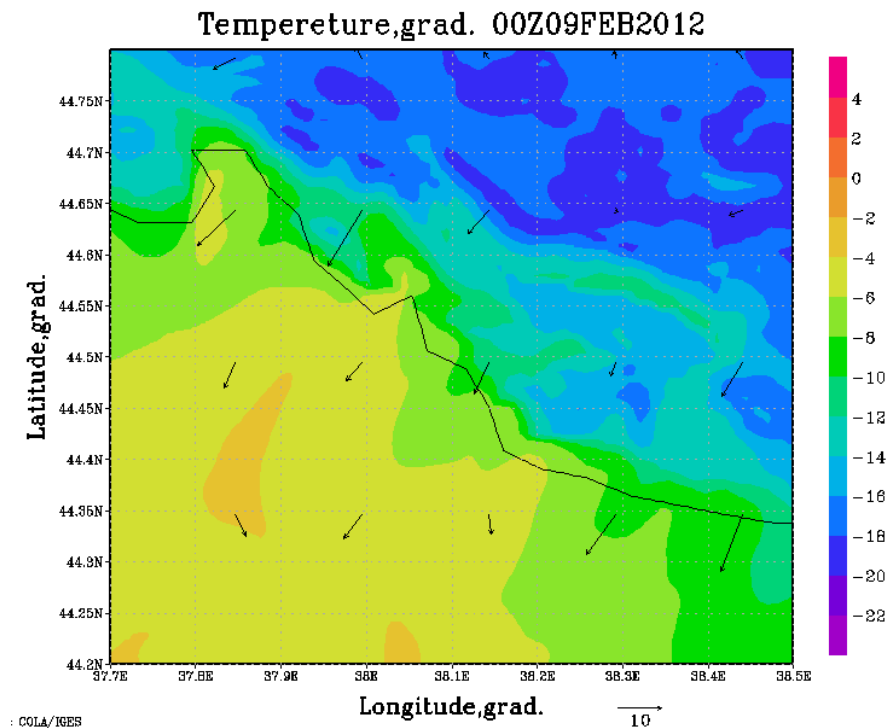


Рисунок 5.18 – Поле температуры в период завершения боры

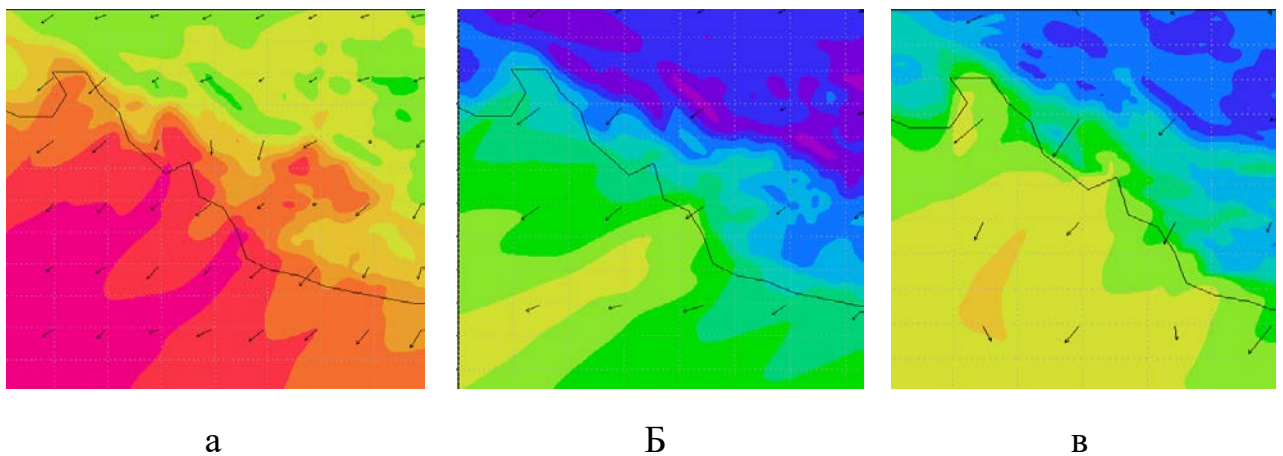


Рисунок 5.19 – Поля температуры воздуха в разные моменты времени а – поле температуры в момент зарождения боры, б – поле температуры в момент кульминации боры, в – поле температуры в период завершения боры

Модель неплохо воспроизводит поле температуры в данном районе. Во всех полученных полях температура над водной поверхностью в холодное время года остается выше температуры над земной поверхностью. А также отлично видно, что с севера, северо-востока надвигается более холодная

воздушная масса. При подходе в хребту, с наветренной стороны происходит блокирование потока и его выхолаживание (об этом еще будет сказано при анализе профиля температуры), модель это хорошо воспроизводит, на наветренной стороне наблюдаются локальные минимумы температуры.

С помощью результатов на крупной сетке (рисунок 5.20) можно оценить общее распределение температуры в данной области.

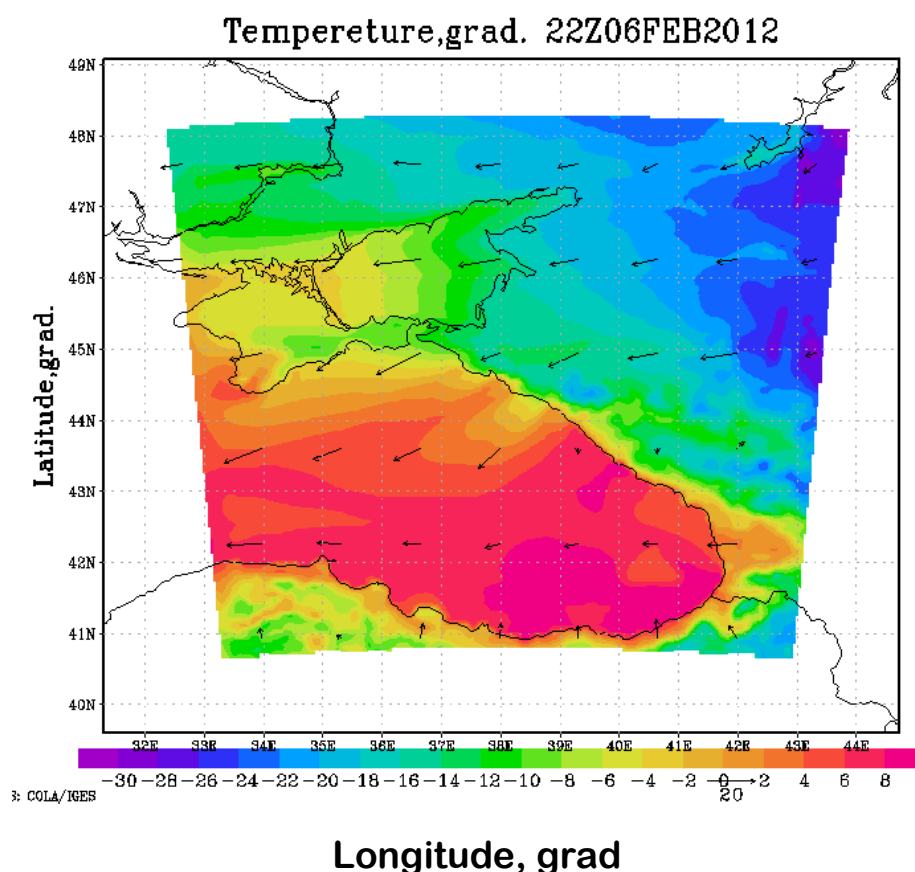


Рисунок 5.20 – Поле температуры в момент кульминации бора на крупной сетке

Для того чтобы убедиться, что это бора и более детально изучить это явление были построены профили важных метеорологических величин.

Для построения профилей была выбрана область $36,9^{\circ} - 39,6^{\circ}$ долготы, вертикальный разрез проводился вдоль широты $44,7^{\circ}$.

По оси OY использовались изобарические уровни в гПа, по оси OX долгота в градусах для всех исследуемых случаев боры.

На рисунке 5.21 представлен профиль скорости ветра в момент кульминации боры.

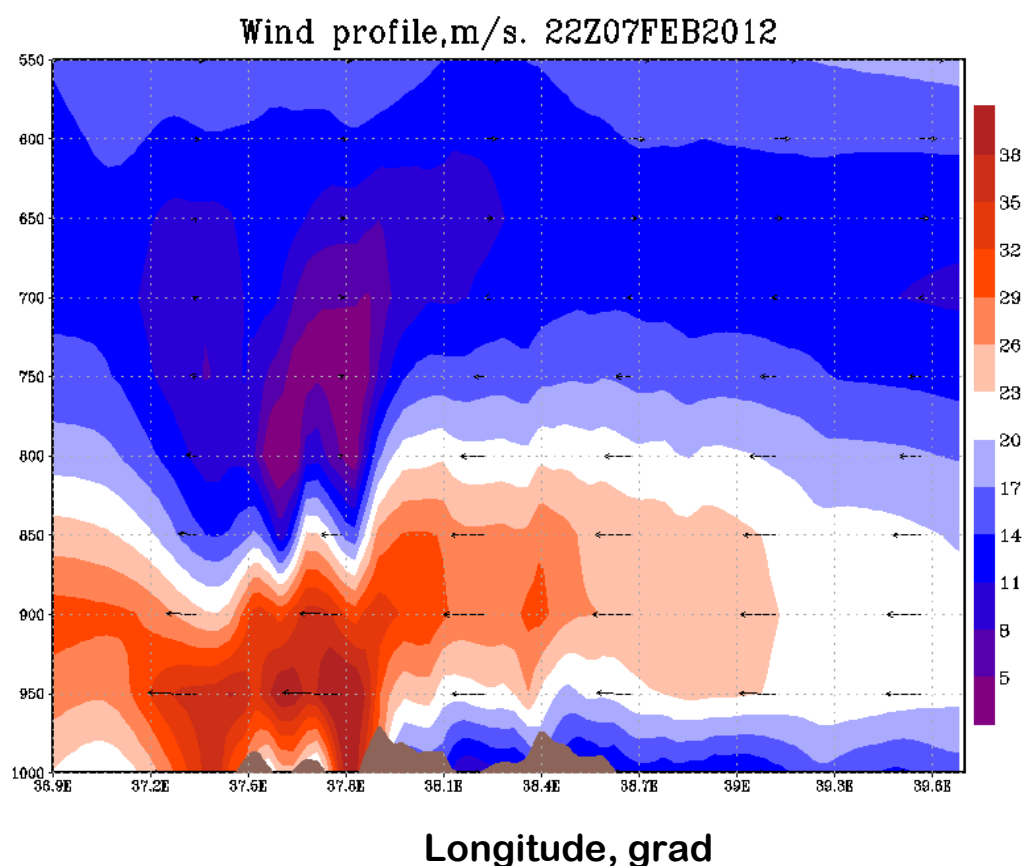


Рисунок 5.21 – Профиль скорости ветра в момент кульминации боры 22 часа 07 февраля 2012

Анализируя данные, представленные на рисунке 5.21, сразу можно отметить, что все возмущения и усиления, связанные со скоростью ветра сосредоточены в слое от поверхности земли до уровня 850 гПа, что примерно равно 1-2 км. Можно сказать, что возникает тонкий слой воздуха над горами, который имеет большие скорости ветра и низкие значения температуры воздуха (рисунок 5.23), о чем еще будет сказано ниже. Максимальные скорости ветра, как и характерно для боры, наблюдаются на подветренной стороне хребта. Именно там скорость ветра достигают 30 м/с, что возможно

связано с обрушением внутренних гравитационных волн над подветренным склоном.

На наветренной стороне хребта возникает блокирование воздушного потока. Образуется зона стагнации – область, где поток, встретив препятствие, тормозится у его подножья, так как еще не имеет нужной кинетической энергии для его преодоления. В этой области ветер не только сильно теряет скорости, но и может вовсе поменять направление на противоположное.

На уровне 650 гПа, высота примерно 3,5 км, наблюдается критический уровень – уровень обращения ветра с высотой. На этой высоте компонента скорости потока перпендикулярная хребту становится равной нулю или отрицательной. Возникает этот уровень за счет обрушения внутренних гравитационных волн и за счет крупномасштабных факторов. В данном эпизоде боры происходит изменение направления ветра с высотой с северо-восточного на северо-западное на высоте критического уровня. Однако наличие этого уровня не является обязательным фактором при действии боры. В таком случае ветер имеет северо-восточное направление во всей толще тропосферы.

Также были построены и проанализированы профили скорости ветра для большей площади и больших высот (250 гПа).

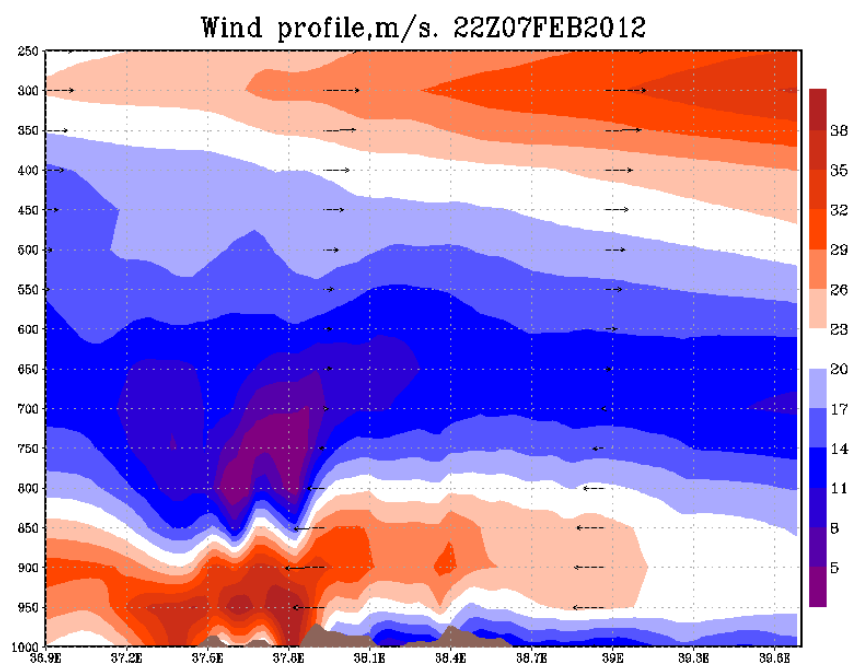


Рисунок 5.22 – Профиль скорости ветра в момент кульминации боры 22 часа 07 февраля 2012 для области ($36,9^{\circ} - 39,6^{\circ}$ в.д.) до уровня 250 гПа

Анализируя данные, представленные на рисунке 5.22, можно отметить, что скорость основного потока воздуха, потока, движущегося в сторону хребта, на наветренной стороне не такая большая, как на подветренных склонах хребта, что еще раз подтверждает тот факт, что усиление ветра происходит именно из-за орографии.

Далее будет представлен и проанализирован профиль температуры воздуха (рисунок 5.23).

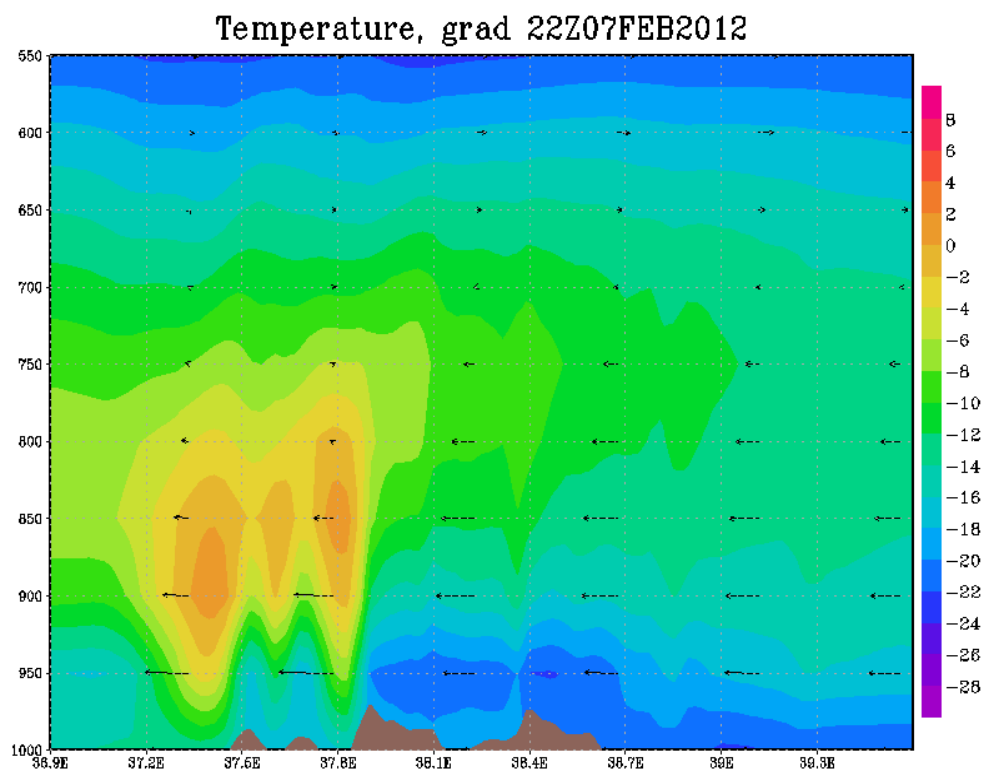


Рисунок 5.23 – Профиль температуры воздуха в момент кульминации боры
22 часа 07 февраля 2012

В момент кульминации боры на наветренной стороне хребта, в зоне, где происходит блокирование потока, наблюдается выхолаживание воздуха. Если на подветренной стороне хребта у подножья температура равна (-12°C) – (-14°C), то на наветренной (-20°C) – (-22°C).

А также на подветренном склоне наблюдается интенсивная и мощная приземная инверсия. Интенсивность 12°C , мощность 1,5 км.

Высота нижней границы инверсии и мощность инверсии в начальной, кульминационной и завершающей фазе существенно не меняется. Сильно меняется её интенсивность. Рано утром 06.02.2012 05 часов интенсивность ещё была около 7°C , затем она активно усиливается, но по мере затухания боры уменьшается и интенсивность инверсии.

Также был рассмотрен такой параметр как w - вертикальная компонента скорости ветра. Модельные данные этого параметра представлены на рисунках ниже.

На рисунке 5.24 представлен профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент отсутствия боры, то есть обычное стандартное состояние этого параметра. Как видно из рисунка поле спокойное, в среднем этот показатель равен 0 м/с.

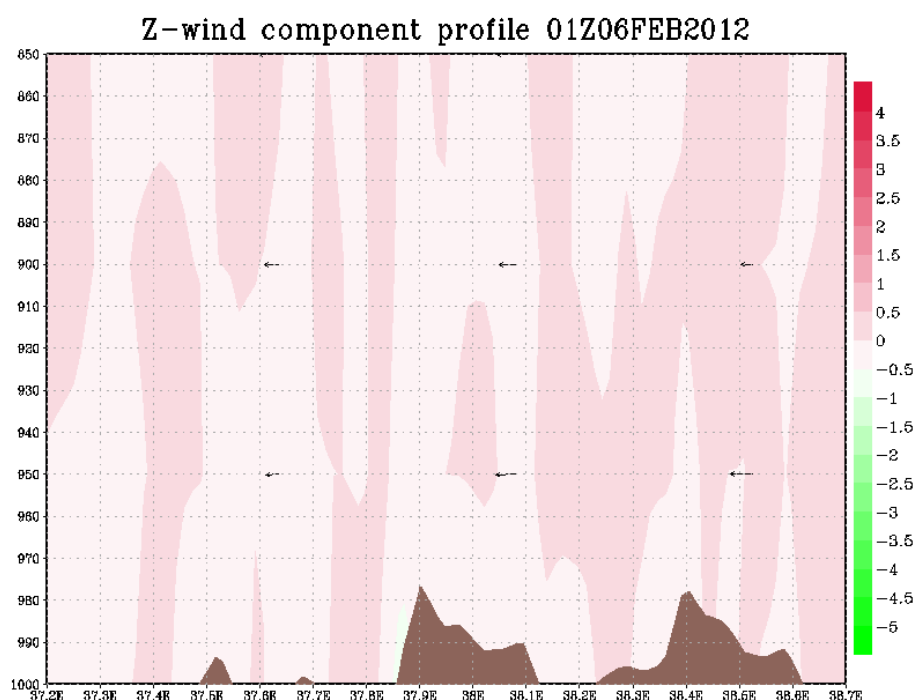


Рисунок 5.24 - Профиль вертикальной компоненты скорости ветра при
отсутствии боры

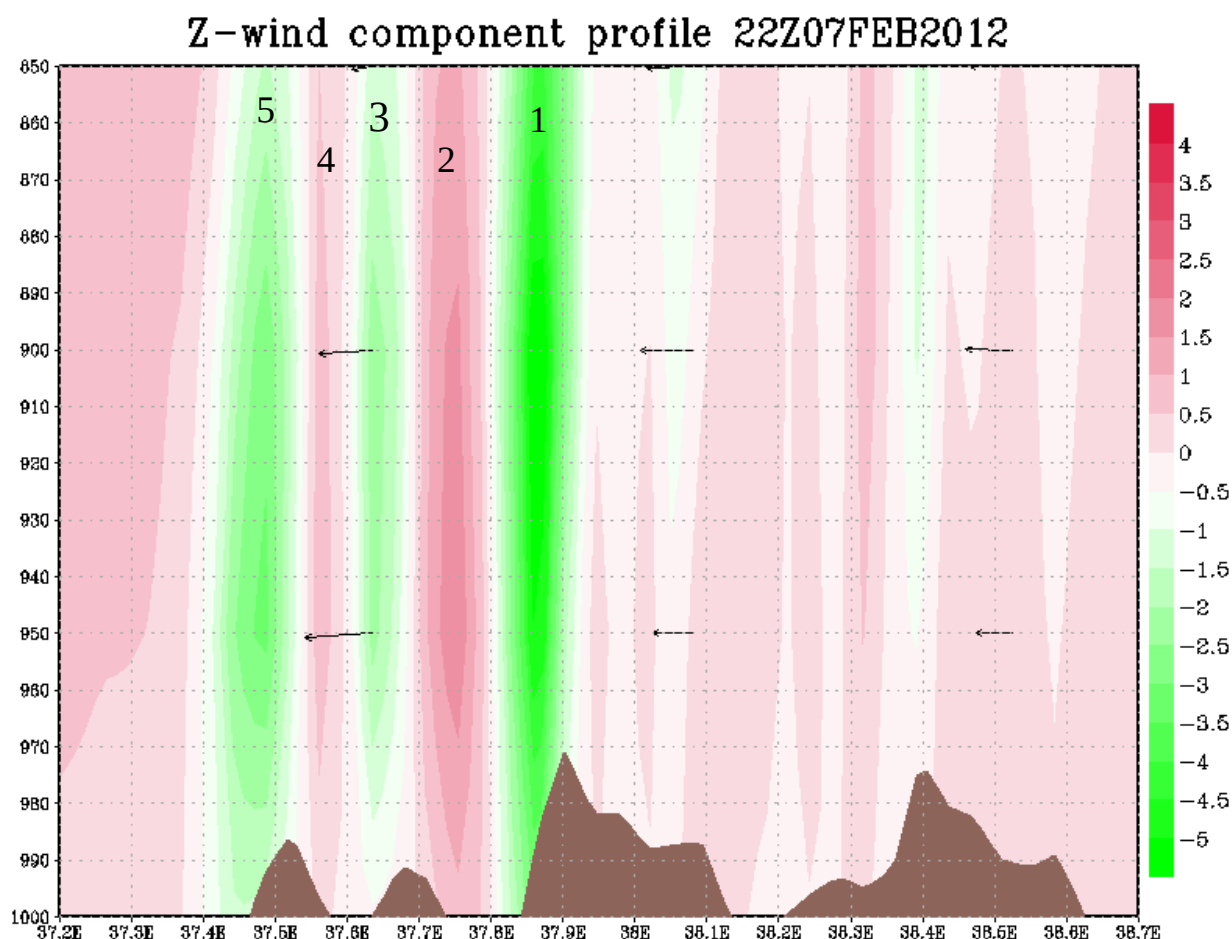


Рисунок 5.25 - Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации боры в 22 часа 07 февраля 2012

Однако в момент кульминации боры это поле выглядит иначе. Отлично видно, что на подветренной стороне хребта (на рисунке 5.15 они отмечены цифрами 1,3,5), вертикальная компонента имеет максимальные отрицательные значения, что говорит о возникновении в этой области очень сильных нисходящих потоков, что полностью характерно для боры. На наветренной стороне (на рисунке 5.15 они отмечены цифрами 2,4) наоборот возникают восходящие движения.

Ниже на рисунке 5.26 также представлен профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации боры, но уже до уровня 550 гПа.

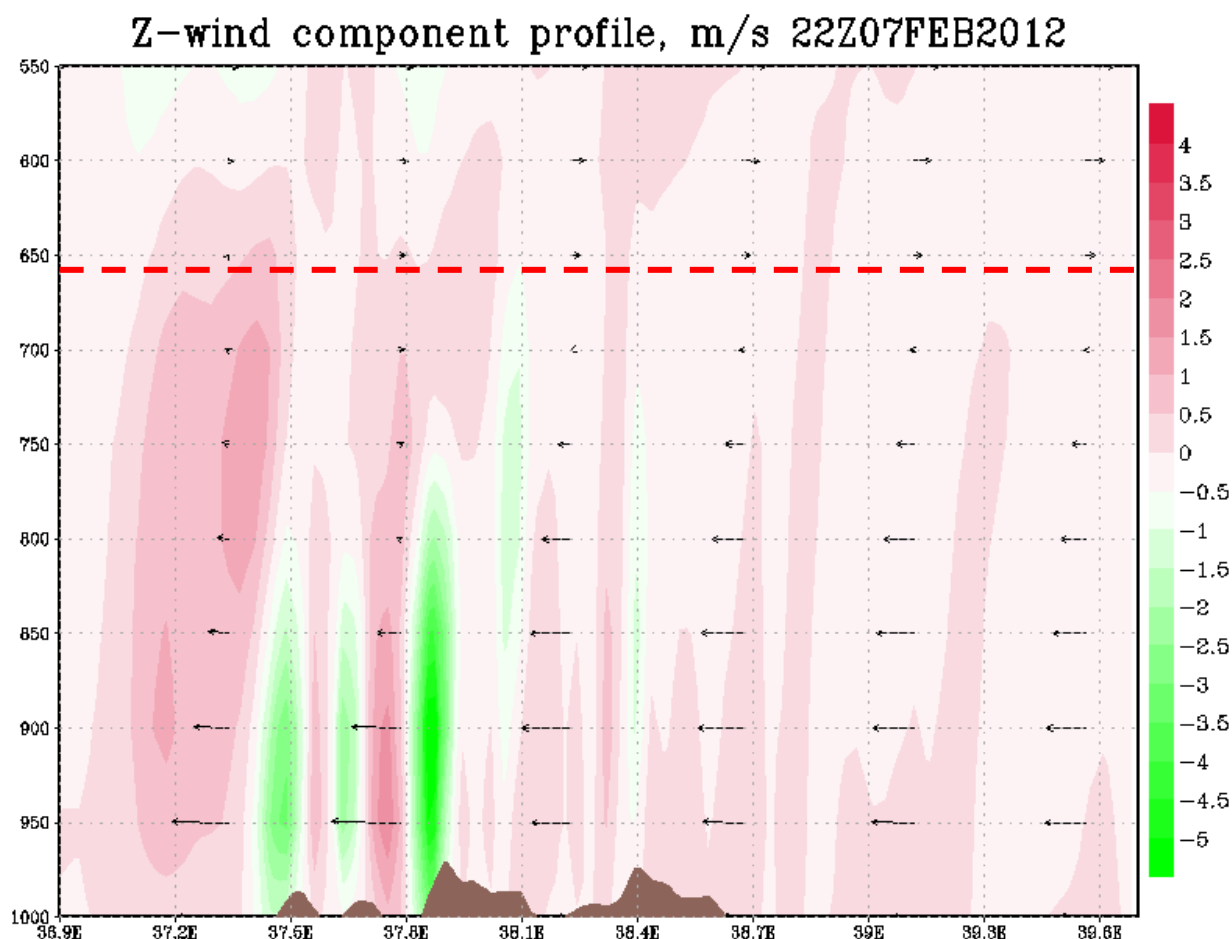


Рисунок – 5.26 Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации боры в 22 часа 07 февраля 2012 до уровня 550 гПа

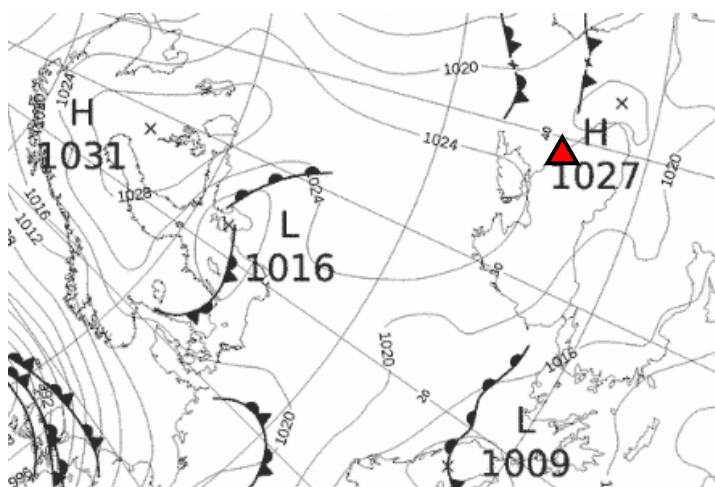
Модель воспроизводит чередующиеся восходящие и нисходящие движения воздуха, причем эти чередования происходят в слое тропосферы от поверхности земли до критического уровня, на рисунке 5.26 он отмечен красной пунктирной линией.

Также можно заметить, что над орографическим препятствием, центр которого располагается на координате 38,4E, восходящие и нисходящие движения слабо выражены, это может быть связано с тем, что этот хребет не имеет крутого подъема и спуска.

Модель верно воспроизвела горизонтальную и вертикальную структуру натекающего потока и пространственное распределение важных метеорологических величин для случая боры 06.02.2012-09.02.2012.

5.2.2 Бора 10-12 марта 2021 года

Бора это явление, которое связано с общей циркуляцией атмосферы, поэтому для ее возникновения необходимы особые синоптические условия. Ниже на рисунках представлены синоптические обстановки за 00:00 10 марта 2021 года и 11 марта 2021 за 00:00. Данные взяты с сайта [<https://www.wetterzentrale.de/>] по данным метеорологической службы Великобритании (UKMO).



Анализируя синоптическую обстановку за представленные сроки, можно заметить, что еще 10 марта в 00:00 над восточной частью Черного моря находится антициклон, с давлением в центре 1027 гПа, а ровно через сутки давление здесь упало до 1010 гПа, а вот над центральной Россией образовался антициклон с давлением 1031 гПа. Возник градиент давления 20 гПа на 2000 километров. Также видно, что 11 марта через Новороссийск прошел фронт, который мог вызвать усиление ветра. Чтобы в этом убедиться были построены и проанализированы поля скорости ветра, которые представлены на рисунках 5.29 и 5.30, и другие метеорологические параметры.

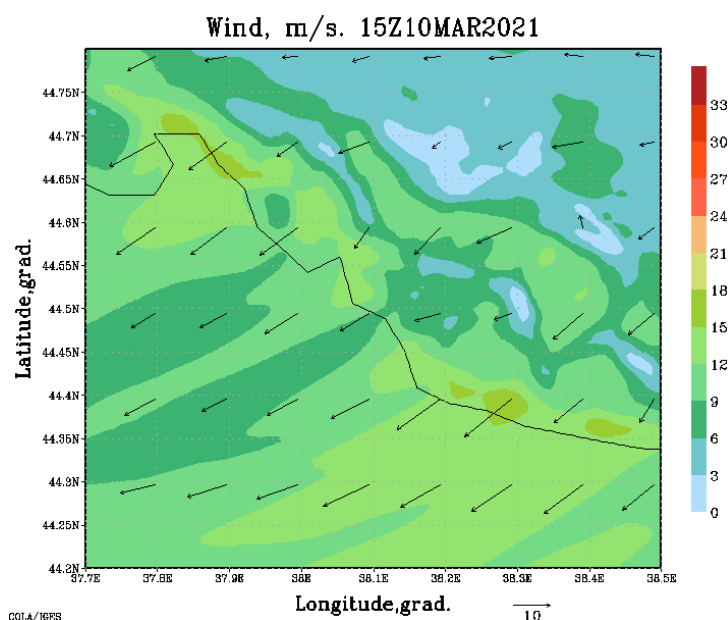


Рисунок 5.29 – Поле скорости ветра в момент зарождения боры 15 часов 10 марта 2021

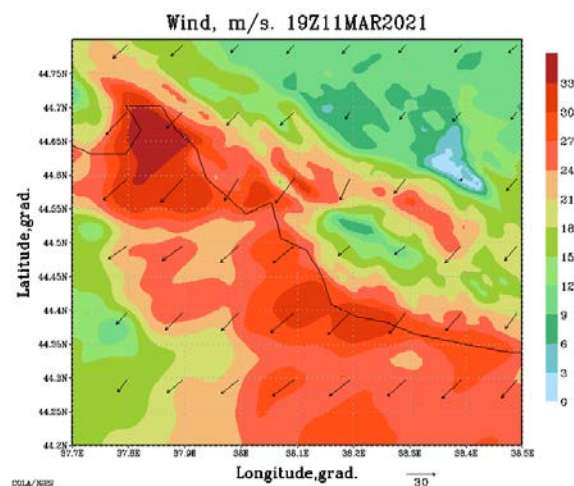


Рисунок 5.30 – Поле скорости ветра в момент кульминации боры 19 часов 11 марта 2021

Получив, построив и проанализировав данные о скорости ветра за срок 10-12 марта 2021 года, было выявлено, что максимальные порывы приходятся на 19 и 21 час 11 марта 2021. В период кульминации порывы ветра достигали 35 м/с, что показано на рисунке 5.30. На рисунках 5.29, 5.30 стрелками указано направление ветра и хорошо видно, что ветер имеет северо-восточное направление, что характерно для боры в этом регионе.

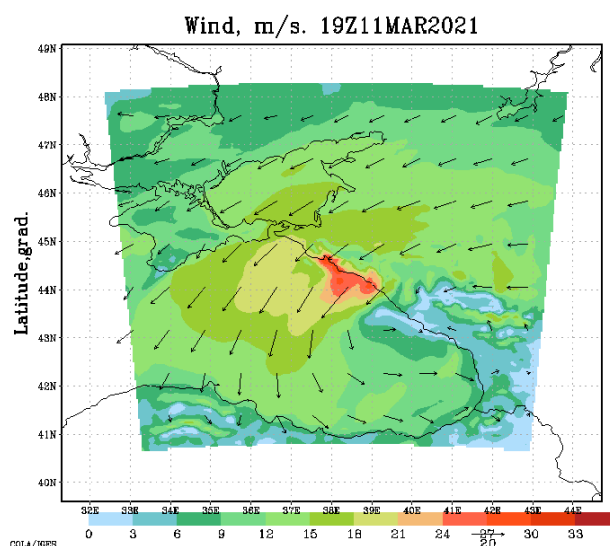


Рисунок 5.31 – Поле ветра в момент кульминации боры 19 часов 11 марта 2021 на большой сетке

Также были получены данные для этой бора на большой сетке. На рисунке 5.31 представлен момент кульминации на этой сетке. Анализируя представленные поля можно отметить, что модель точно воспроизводит горизонтальные размеры бора, её пространственную структуру. Бора наблюдается на береговой линии суши-моря от Цемесской бухты до, примерно, Туапсе, что характерно для черноморской бора. Также на рисунке видно, что в районе, который расположен южнее Туапсе, а именно Сочи, Абхазия, наблюдается зона очень слабых ветров, а связано это с орографией. Горы в этом районе значительно выше, относительно гор около Новороссийска, поэтому тут происходит блокирование северо-восточного потока и возникают условия характерные только для этого района. На востоке Черного моря видно, что ветер начинает поворачивать против часовой стрелки, что говорит о наличии циклона в этом районе, это подтверждает синоптическая ситуация представленная на рисунке 5.28.

Также анализируя поля рисунка 5.31 можно заметить, что основной поток, имеющий северо-восточное направление, направлен в сторону моря с относительно слабой скоростью. Сначала поток имеет скорость 6-9 м/с (северо-восток на рисунке 5.31), по мере приближения к Черному морю поток усиливается, по территории Краснодарского края он уже движется со скоростью 15-18 м/с. Затем несколько тормозится у подножья хребта, а после, переваливая через хребет, обрушивается на город. По мере удаления от берега в открытое море, скорость ветра уменьшается.

Далее было построено и проанализировано поле температуры воздуха.

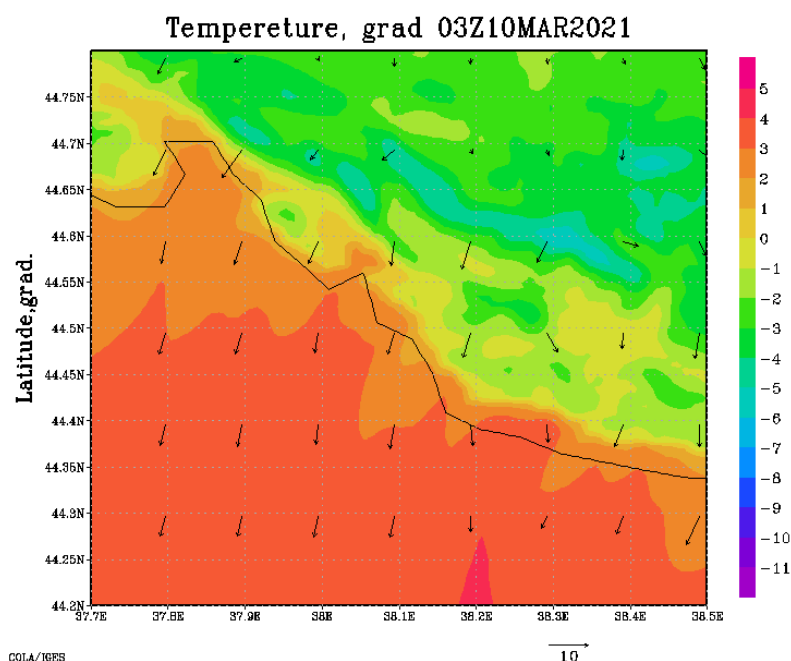


Рисунок 5.32 – Поле ветра в момент зарождения боры 03 часа 10 марта 2021

В момент зарождения боры скорость ветра невелика, около 10 м/с, о чем говорит длина вектора в районе Цемесской бухты, ветер, что и свойственно боре, имеет северо-восточное направление. Поле температуры воздуха в это время тоже довольно ровное. В Цемесской бухте температура воздуха на этапе зарождения бора составляет 1-2°C, что выше чем в момент кульминации боры, несмотря на то, что зарождение боры пришлось на 03 часа (06 по Москве), самое холодное время суток. Температура поверхности моря (3-4°C) по результатам моделирования выше температуры поверхности суши, что абсолютно верно для этого времени года и этого региона. На северо-востоке страны температура значительно ниже (-2 – (-3))°C. Также по мере приближения к берегу, где, как было сказано и показано выше, располагаются горы, наблюдается блокирование и выхолаживание потока. Температура в области блокирования (-4 – (-6))°C.

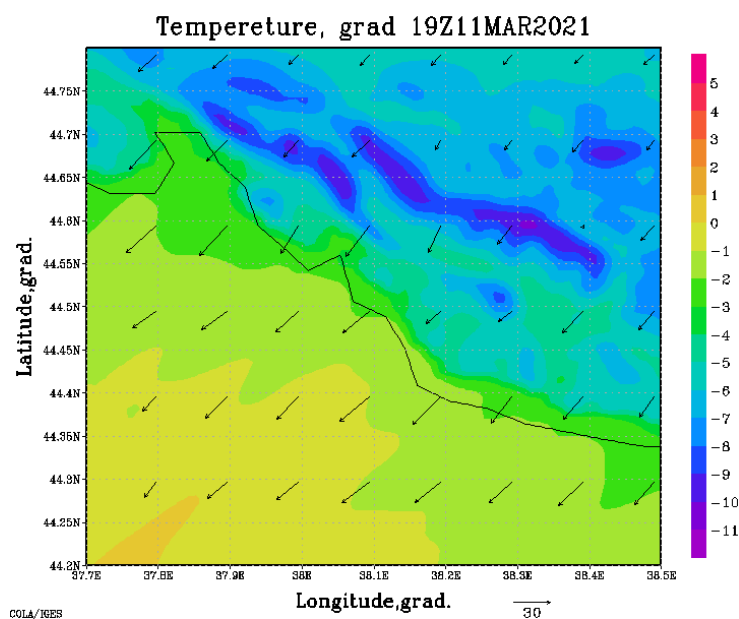


Рисунок 5.33 – Поле ветра в момент кульминации боры 19 часов 11 марта 2021

В момент кульминации боры температура воздуха на северо-востоке Цемесской бухты упала с $(1-2)^{\circ}\text{C}$ до $(-3 - (-5))^{\circ}\text{C}$. В районе блокирования и выхолаживания потока в момент кульминации боры температура упала до $(-9 - (-10))^{\circ}\text{C}$. Значит можно уверенно сказать – в момент кульминации боры температура воздуха упала на всей области моделирования, но особенно важен перепад в Цемесской бухте.

Далее будут представлены и проанализированы профили скорости ветра и температуры для боры 10-12 марта 2021 года. Для построения профилей была выбрана область $36,6^{\circ} - 39,6^{\circ}$ долготы вертикальный разрез проводился вдоль широты $44,7^{\circ}$. По оси ОХ – долгота в градусах, ОУ – изобарические уровни в гПа.

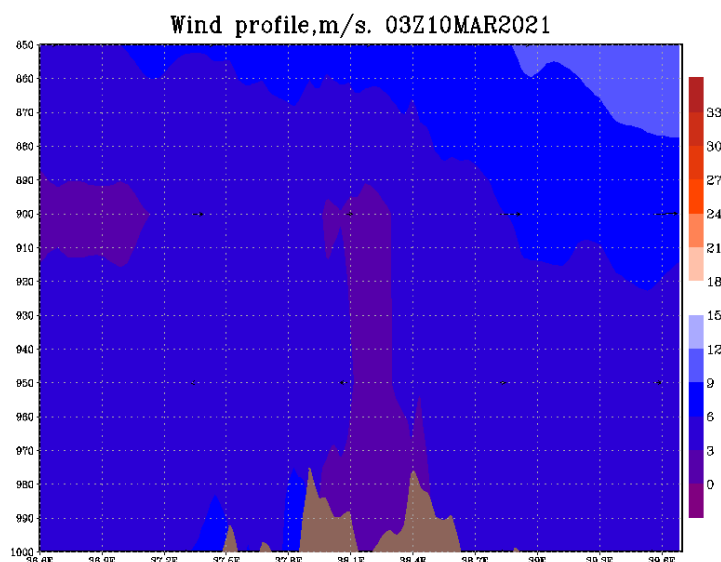


Рисунок 5.34 – Профиль скорости ветра в момент зарождения боры 03 часа 10 марта 2021

На рисунке 5.34 представлен профиль скорости ветра в момент зарождения боры. Профиль довольно однородный: ни усиления ветра на подветренной стороне, ни блокирования потока на наветренной стороне, на этом этапе не наблюдаются. Скорость ветра по всей области исследования составляет 3-9 м/с.

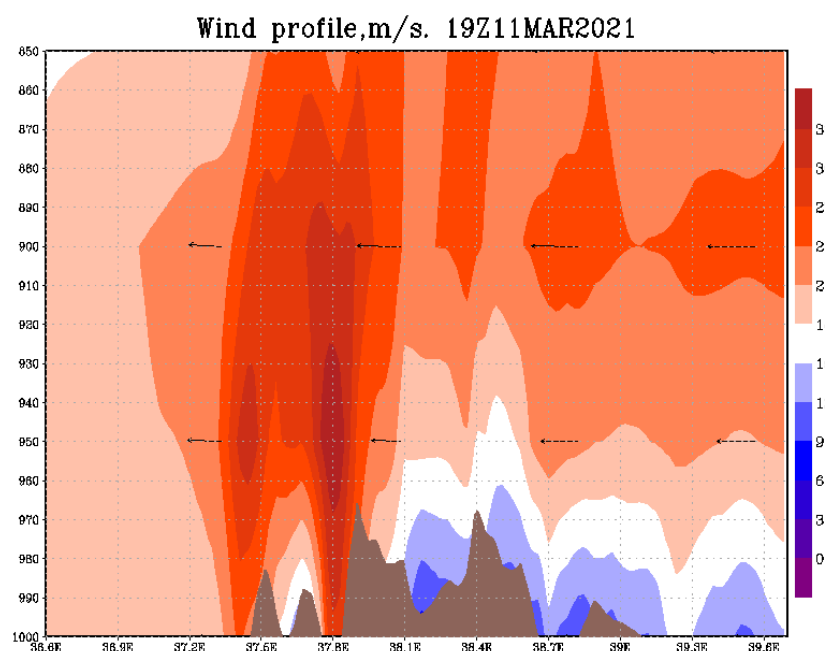


Рисунок 5.35 – Профиль скорости ветра в момент кульминации боры 19 часов 11 марта 2021

Анализируя профиль скорости ветра в момент кульминации боры, можно заметить, что на наветренной стороне происходит сильное блокирование потока, скорость ветра там равна 9-12 м/с, в то время как на подветренной стороне отмечается сильное усиление ветра, скорость ветра достигает 27-30 м/с.

Также был рассмотрен профиль скорости ветра до модельного уровня 550 гПа.

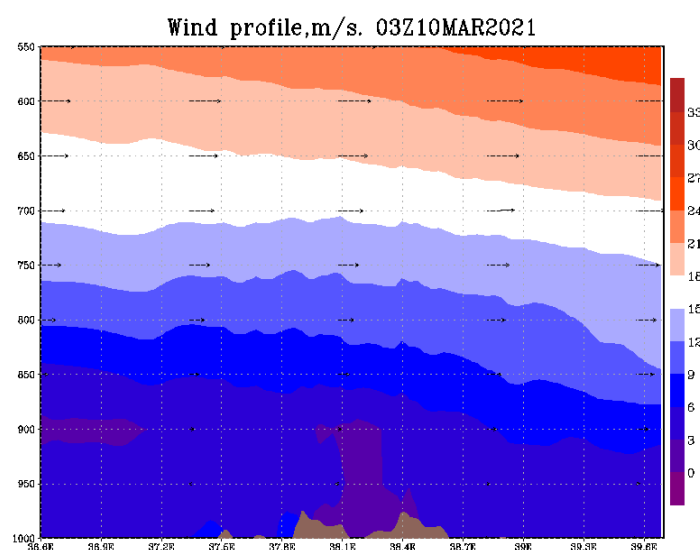


Рисунок 5.36 – Профиль скорости ветра в момент зарождения боры 03 часа 10 марта 2021 до уровня 550 гПа

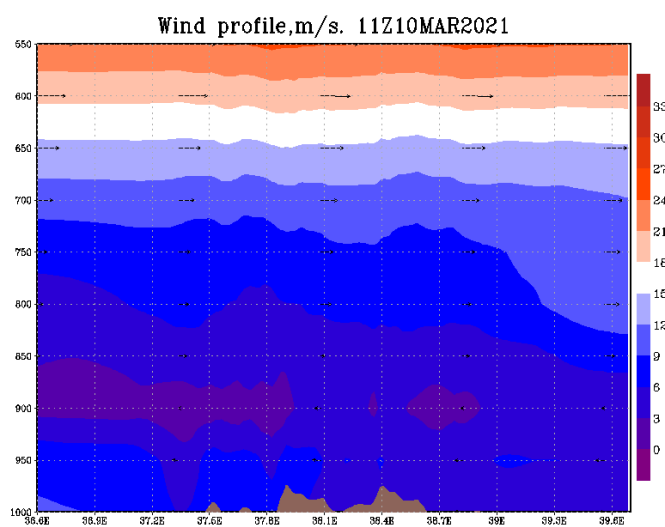


Рисунок 5.37 – Профиль скорости ветра в момент зарождения боры 11 часов 10 марта 2021 до уровня 550 гПа

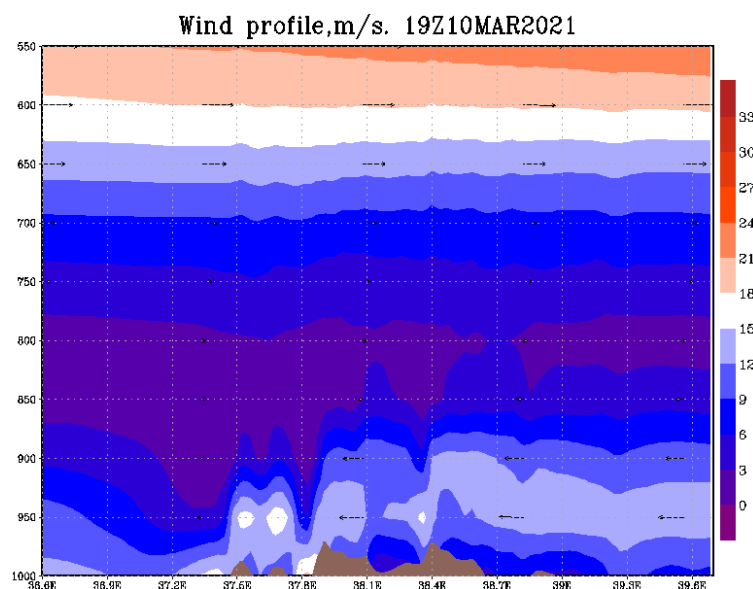


Рисунок 5.38 – Профиль скорости ветра в момент зарождения боры 19 часов 10 марта 2021 до уровня 550 гПа

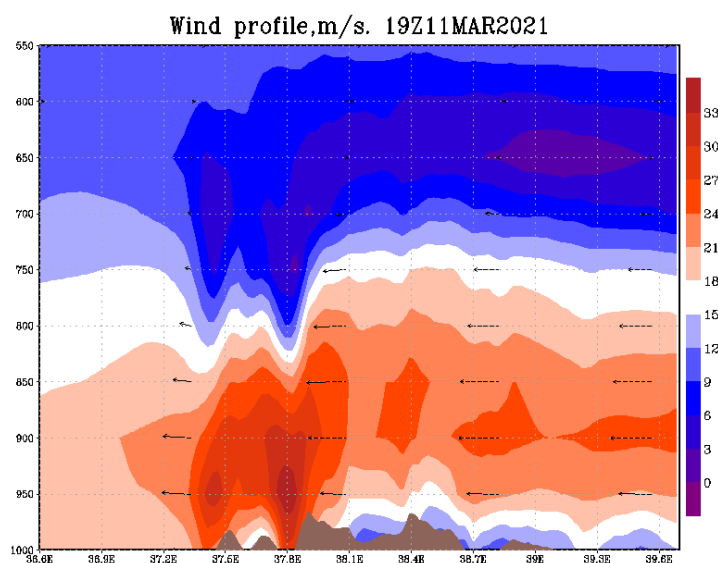


Рисунок 5.39 – Профиль скорости ветра в момент кульминации боры 19 часов 11 марта 2021 до уровня 550 гПа

Выше представлены четыре рисунка, на которых изображен профиль скорости ветра в разные моменты времени. Данные о профили скорости ветра до уровня 550 гПа очень важны. С их помощью можно оценить, как меняется высота критического уровня.

В момент зарождения боры в 03 часа 10 марта (рисунок 5.36) критического уровня нет, причем поток во всей исследуемой толще направлен с запада на восток. В 11 часов 10 марта (рисунок 5.37) от поверхности земли до уровня 900 гПа появляется слой воздуха, который движется с востока на запад, от 900 гПа до 550 гПа поток имеет направление с запада на восток. В 19 часов 10 марта (рисунок 5.38) слой воздуха, который направлен с востока на запад, становится выше, теперь он располагается от поверхности земли до уровня 800 гПа, то есть в 19 часов 10 марта критический уровень располагается на высоте 800 гПа (2 км). В момент кульминации боры, в 19 часов 11 марта (рисунок 5.39), критический уровень находится на высоте 650 гПа (3,5 км). Далее по мере затухания боры, высота критического уровня уменьшается и затем он вовсе исчезает.

Далее будут представлены результаты моделирования профиля температуры воздуха. Для построения профилей была выбрана область 37,7° – 38,5° долготы вертикальный разрез проводился вдоль широты 44,7°. По оси ОУ использовались изобарические уровни в гПа по ОХ долгота в градусах для всех исследуемых случаев боры.

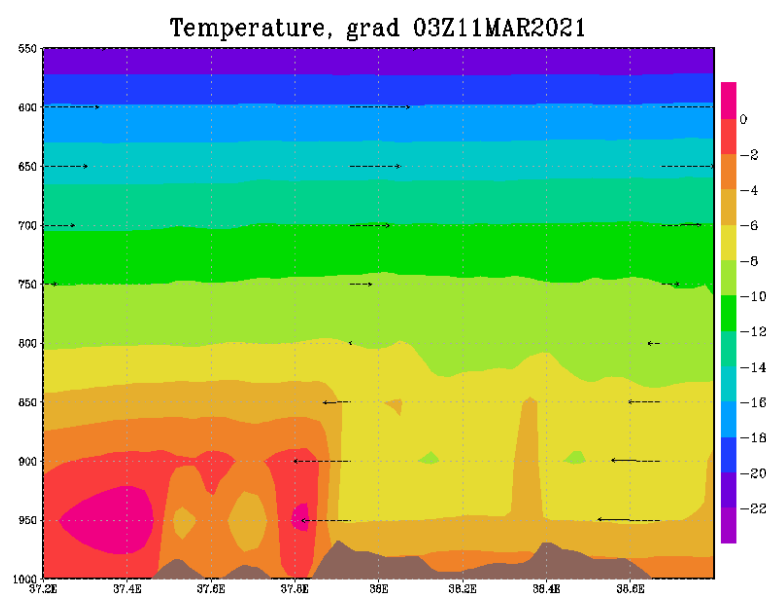


Рисунок 5.40 – Профиль скорости ветра в момент зарождения боры 03 часа
10 марта 2021

В момент зарождения боры, рисунок 5.40, над подветренной стороной начинает формироваться инверсия температуры.

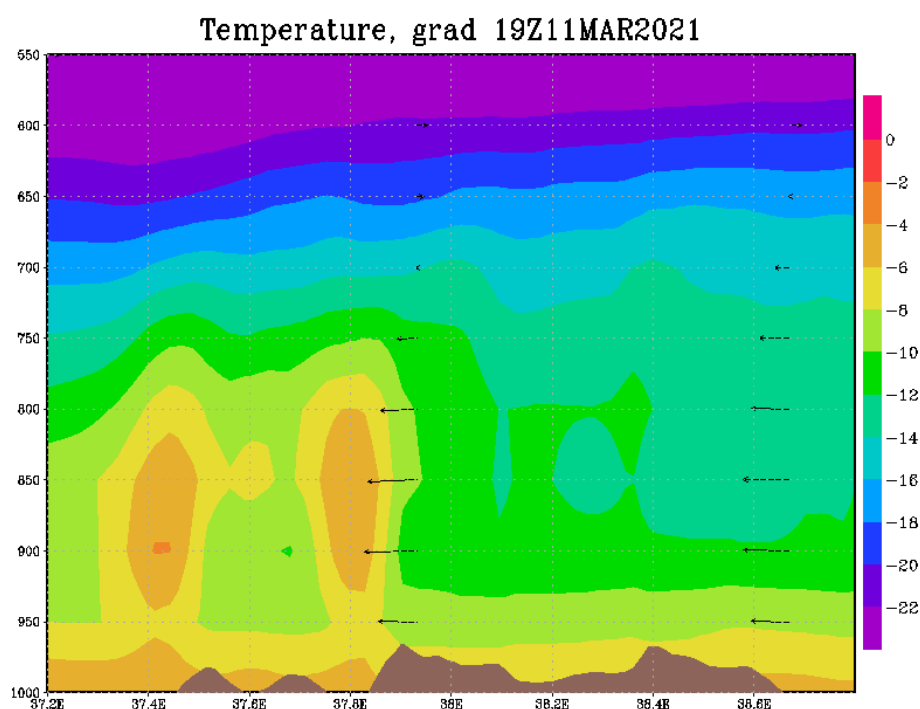


Рисунок 5.41 – Профиль температуры воздуха в момент кульминации боры
19 часов 11 марта 2021

В момент кульминации боры над подветренной областью хребта сформировалась температурная инверсия, не такая интенсивная и мощная как в случае боры 06-08.02.2012. Возможно, это связано с разными синоптическими ситуациями, при которых они наблюдались.

Последний параметр, который был рассмотрен для случая боры 10-12 марта 2021 года, это вертикальная компонента скорости ветра. На рисунке 5.42 представлен профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации боры.

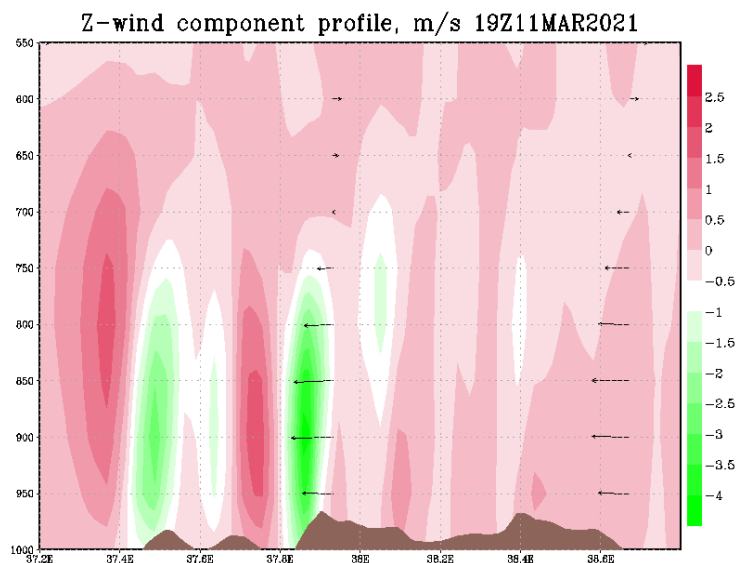


Рисунок 5.42 – Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации боры 19 часов 19 марта 2021

При анализе профиля вертикальной компоненты скорости ветра было выявлено, что сильные вертикальные движения происходят именно в момент кульминации боры. В профиле вертикальной компоненты скорости ветра (рисунок 5.42) отлично видно, что на подветренных сторонах хребта возникают сильные нисходящие движения (зеленые области), а на наветренной восходящие (красные области).

Модель верно воспроизвела горизонтальную и вертикальную структуру натекающего потока и пространственное распределение таких важных метеорологических величин как скорость ветра, температура для случая боры 10-12.03.2021 года.

5.2.3 Бора 28-30 сентября – 01 октября 2021

Возникновение мезомасштабного явления бора на территории Цемесской бухты связано с общей циркуляцией атмосферы, поэтому для ее возникновения необходимы особые синоптические условия. На рисунках

представлены синоптические обстановки за 00:00 28 сентября 2021 года и 29 сентября 2021 за 00:00. Данные взяты с сайта [https://www.wetterzentrale.de/] по данным метеорологической службы Великобритании (UKMO).

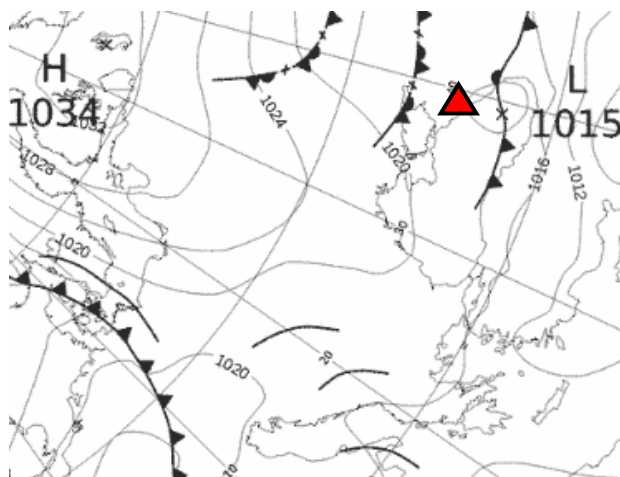


Рисунок 5.43 – Синоптическая ситуация 28 сентября 2021 года. Красным треугольником обозначен Новороссийск [47]

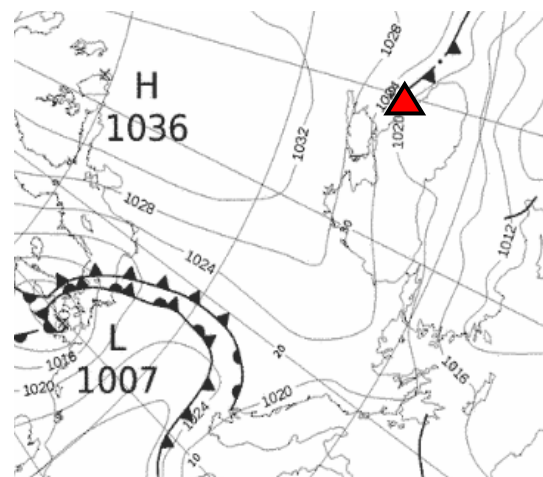


Рисунок 5.44 – Синоптическая ситуация 29 сентября 2021 года. Красным треугольником обозначен Новороссийск [47]

28 сентября 2021 сложилась благоприятная синоптическая ситуация для развития боры в Новороссийске. На северо-западе России расположился антициклон с центром 1034 гПа, а южнее Черного моря циклон (1015 гПа). По побережью Черного моря проходит фронт. 29 сентября 2021 года над центральной частью России продолжает господствовать антициклон, а на побережье Черного моря отмечен вторичный холодный фронт.

Далее будут представлены и проанализированы такие важные метеорологические поля при боре как поле скорости ветра и поле температуры.

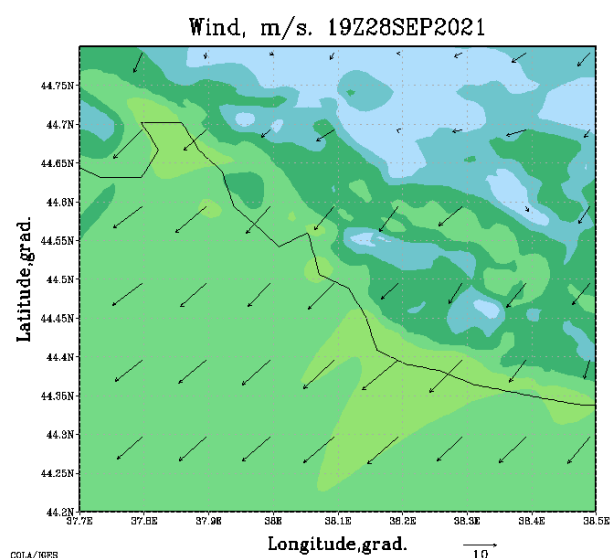


Рисунок 5.45 – Поле скорости ветра в зарождения боры 19 часов 28 сентября 2021

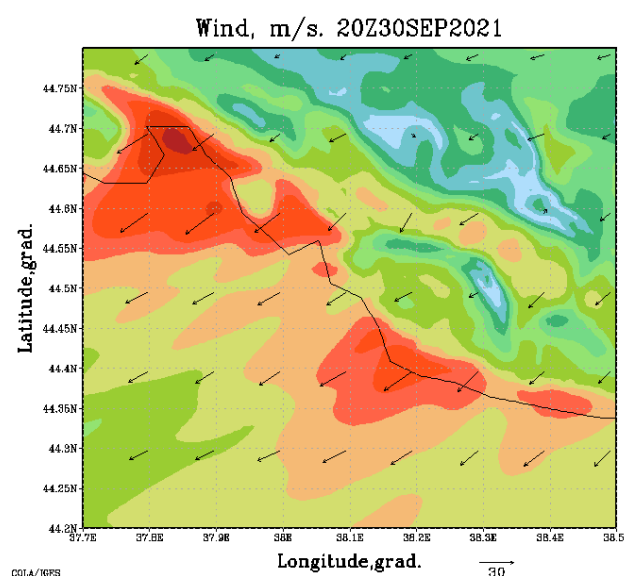


Рисунок 5.46 – Поле скорости ветра в момент кульминации боры 20 часов 30 сентября 2021

Построив и проанализировав данные о скорости ветра за период 28-30 сентября – 1 октября 2021 года было выявлено, что в этот период была бора в районе Цемесской бухты. Максимальные значения скорости ветра наблюдались 30 сентября в 20 часов, что представлено на рисунке 5.46.

Отлично видно, что в момент кульминации боры максимальные скорости ветра наблюдаются в Цемесской бухте Черного моря, причем в её северо-западной части. Также видно, что по мере удаления от берега в сторону открытого моря скорость ветра уменьшается. На наветренной стороне хребта, где поток воздуха встречается и горными хребтами, скорость ветра значительно ниже. В момент зарождения боры на наветренной стороне хребта так же наблюдается блокирование потока, но на подветренной усиления ветра еще не происходит, поле ветра довольно спокойно.

Далее будут представлены результаты моделирования поля температуры воздуха для случая боры 28-30 сентября – 1 октября 2021 года.

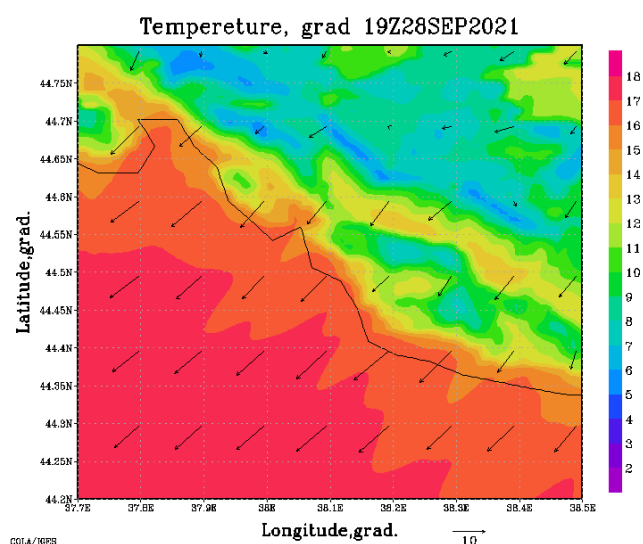


Рисунок 5.47 – Поле температуры воздуха в момент зарождения боры 19 часов 28 сентября 2021

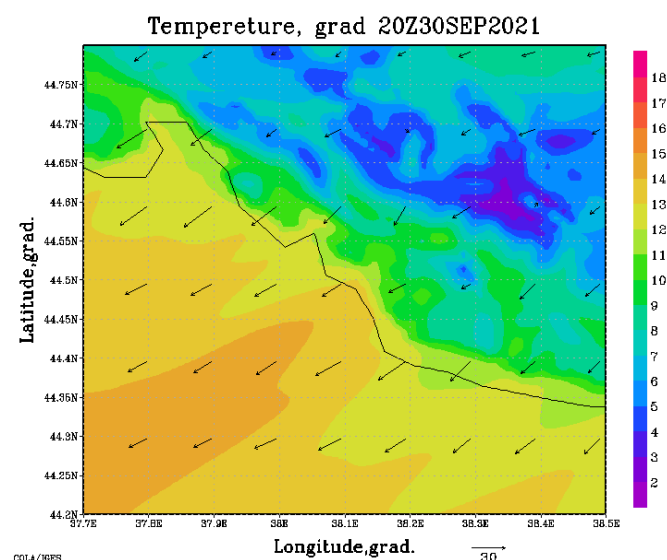


Рисунок 5.48 – Поле температуры воздуха в момент зарождения боры 19 часов 30 сентября 2021

Проанализировав данные за каждый час периода 28-30 сентября – 1 октября 2021 было выявлено, что минимальные значения температуры воздуха в Цемесской бухте наблюдаются именно в момент кульминации боры, сопровождая максимальные порывы скорости ветра.

На рисунках 5.47 и 5.48 представлено поле температуры воздуха в момент зарождения боры и в момент кульминации боры. На этапе зарождения боры температура на побережье Цемесской бухты равна, примерно, 15-16°C, в момент кульминации боры температура в бухте упала до 11°C.

На наветренной стороне, при движении к побережью поток воздуха, так же как и в других случаях тормозиться и сильно выхолаживается. Начинает это происходить в момент зарождения боры и усиливается к кульминации, температура за хребтом равна 5-7°C.

Далее будут представлены вертикальные разрезы скорости ветра и температуры воздуха. По оси OX – долгота в градусах, по OY –

изобарические уровни в гПа. Вертикальный разрез производился вдоль широты 44,71°.

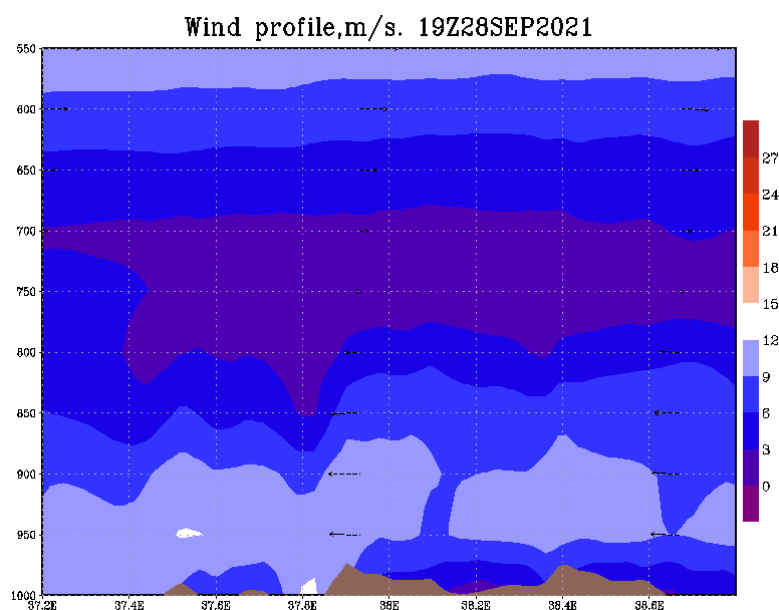


Рисунок 5.49 – Профиль скорости ветра в момент зарождения боры 19 часов 28 сентября 2021

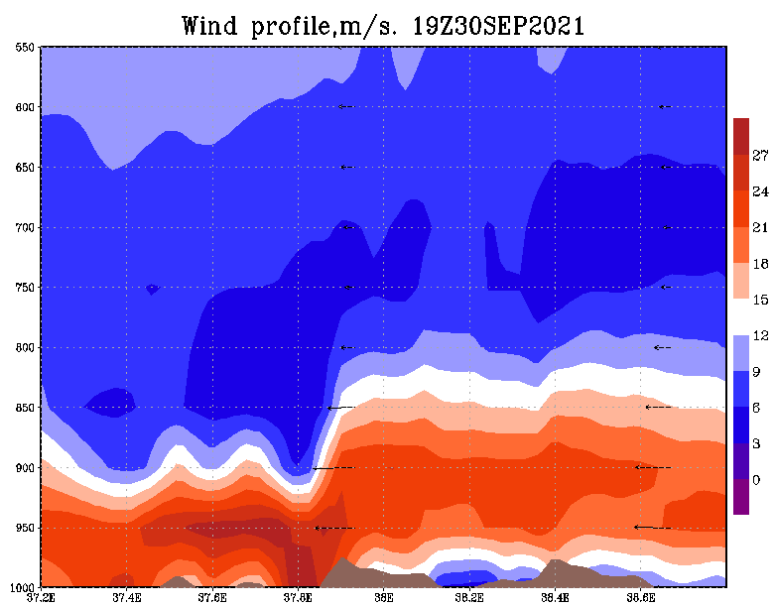


Рисунок 5.50 – Профиль скорости ветра в момент кульминации боры 19 часов 30 сентября 2021

В момент зарождения боры скорость ветра не велика, во всей толще скорость ветра от 0 до 12 м/с.

Сравнивая профили скорости ветра в разные моменты действия боры, отлично видно, что при кульминации очень сильно изменен профиль ветра. Очень сильные скорости ветра наблюдаются в слое от поверхности до уровня 900 гПа. Максимальные скорости отмечаются именно на подветренной стороне, что характерно для боры. На подветренной стороне наблюдается блокирование потока. Сильные скорости ветра при этом случае боры отмечены и на границах исследуемой области. Для лучшего понимания, на какие расстояния она распространяется, были построены профили для диапазона долгот $33,0^{\circ} - 43,5^{\circ}$.

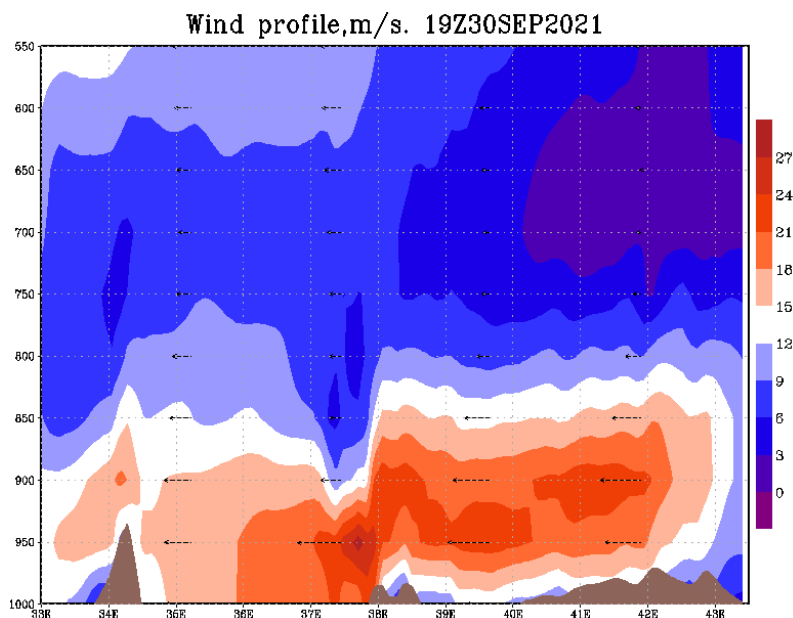


Рисунок 5.51 – Профиль скорости ветра в момент кульминации боры 19 часов 30 сентября 2021 для диапазона долгот $33,0^{\circ} - 43,5^{\circ}$

Анализируя профиль, представленный на рисунке 5.51, можно сказать, что область больших скоростей ветра формируется на уровне 900 гПа над долготой 42° , как раз районе подветренной стороны первого хребта на пути воздушного потока. Продолжая движение, на долготе 38°E поток снова встречает орографическое препятствие – Маркотхский хребет – и с

подветренной стороны, как видно на рисунке выше, происходит обрушение этого потока. Возможно, именно в этом месте произошла обрушение внутренних гравитационных волн, что на поверхности сопровождается усилением и порывистостью ветра. Далее несколько ослабленный поток продолжает движение по Черному морю, теряя свою скорость. На долготе 34°E поток воздуха снова упирается в гору, это уже горы юга Крымского полуострова. Однако видно, что этот хребет в три раза выше, ослабленный поток полностью блокируется или преодолевает это препятствие с боков горы. На подветренной стороне этой высокой гора скорости ветра минимальные.

Также были построены и проанализированы профили скорости ветра до модельного уровня 250 гПа, чтобы выявить высоту модельного уровня. Было обнаружено, что в момент кульминации боры критического уровня над исследуемой областью нет. Он был в момент зарождения боры на уровне 400 гПа в 16 часов 29 сентября 2021, после он пропадает.

Далее будут представлены профили температуры воздуха.

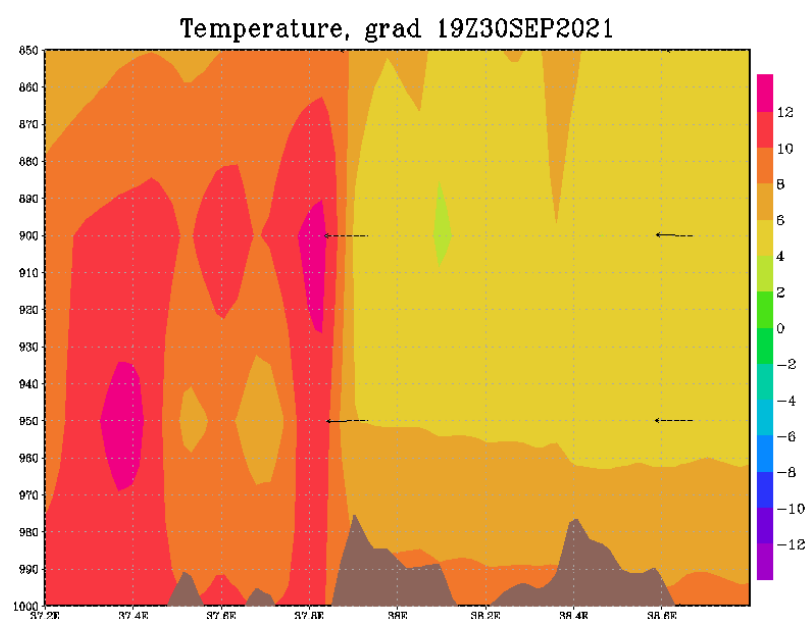


Рисунок 5.52 – Профиль скорости ветра в момент кульминации боры 19 часов 30 сентября 2021

В момент кульминации боры над подветренной частью хребта наблюдается несильная, в отличие от других рассмотренных случаев, инверсия температуры.

Также были построены и проанализированы профили вертикальной компоненты скорости ветра.

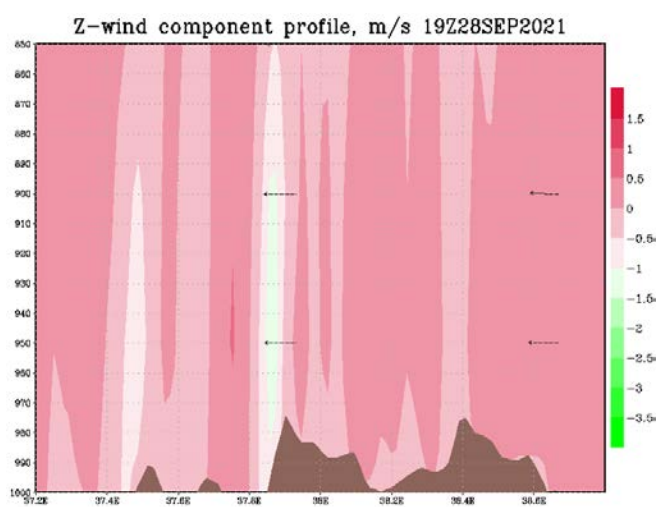


Рисунок 5.53 – Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент зарождения боры 19 часов 28 сентября

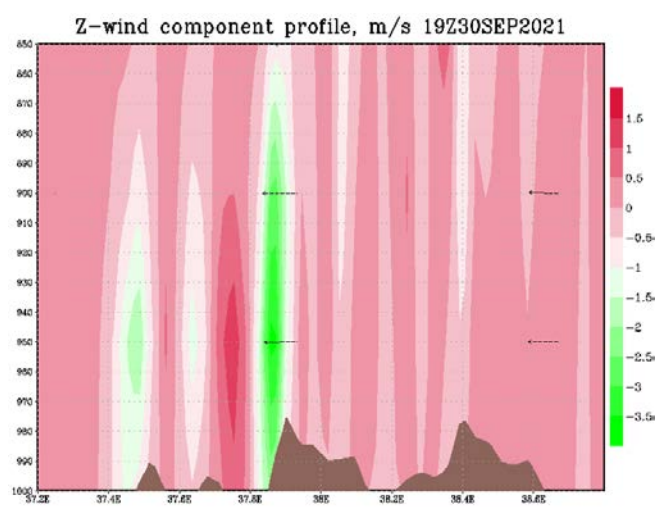


Рисунок 5.54 – Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации боры 19 часов 30 сентября

Сравнивая профили вертикальной компоненты скорости в момент зарождения боры и в момент кульминации, которые представлены на рисунках 5.53 и 5.54, легко можно увидеть, что четко над подветренными склонами формируется нисходящий поток (отрицательные значения скорости), над наветренными склонами восходящие (положительные движения скорости), что характерно для боры.

Модель верно воспроизвела горизонтальную и вертикальную структуру натекающего потока и пространственное распределение таких важных метеорологических величин как скорость ветра, температура для случая боры 28-30 сентября – 1 октября 2021 года.

В заключение этой под главы можно сделать несколько важных выводов о боре в Новороссийске, полученных с помощью моделирования. В ходе работы для всех случаев боры было выявлено:

- максимальные скорости ветра отмечаются именно в Цемесской бухте;
- при действии боры ветер имеет только северо-восточное направление;
- модель верно воспроизводит горизонтальный масштаб боры - 100-150 км, что видно на рисунках представляющих поле скорости ветра;
- модель верно воспроизводит вертикальный масштаб явления 1-2 км, что видно на профилях скорости ветрах, выше указанной высоты метеорологические величины приобретают свой нормальный ход;
- в большинстве случаев на вертикальном профиле скорости ветра можно заметить наличие критического уровня на высоте, примерно, 650 гПа;
- скорость ветра усиливается на подветренной стороне хребта;
- на наветренной стороне хребта отмечается блокирование потока, что видно как на профилях скорости ветра, так и на рисунках на которых представлено поле скорости ветра;
- у подножья наветренной стороны хребта происходит выхолаживание заблокированного потока, что видно на профилях температуры воздуха;
- во время боры над подветренной частью хребта отмечается температурная инверсия, что также представлено на вертикальных разрезах температуры воздуха;
- наличие сильных нисходящих потоков воздуха на подветренной стороне и восходящих на наветренной – представлено на вертикальных разрезах вертикальной компоненты скорости ветра;
- в момент кульминации боры, в максимальные порывы скорости ветра в Новороссийске происходит сильное падение температуры воздуха.

5.3 Описание численных экспериментов певекского южака

Все численные расчеты, как и для новороссийской боре, проводились с использованием современной мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW версии 4.3.6. Прогноз для всех случаев оставлялся с заблаговременностью 24 часа. При моделировании использовались три вложенные сетки, с пространственным разрешением 7800, 2600, 866 метров. Конфигурация вложенных сеток при моделировании певекского южака представлено на рисунке 5.55.

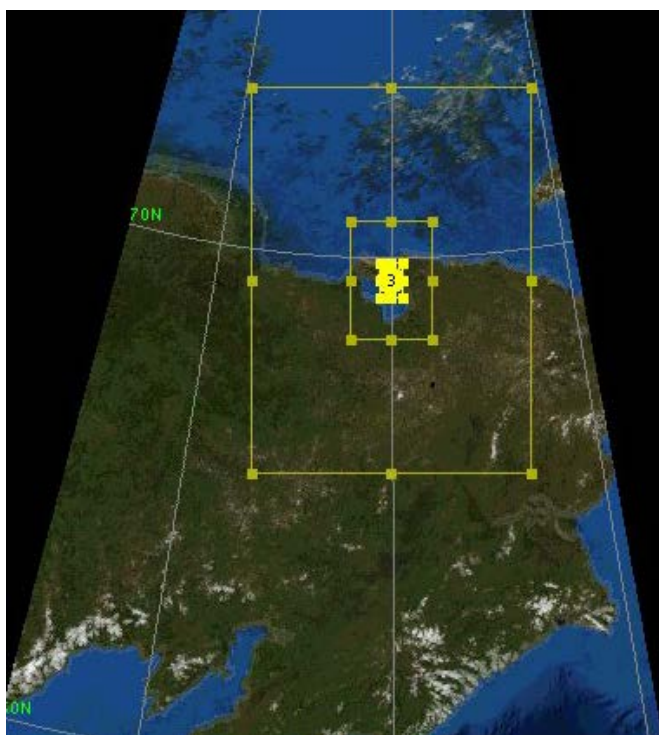


Рисунок 5.55 – размер и расположение вложенных сеток при моделировании певекского южака

По вертикали использовалась η координата, которая учитывает форму рельефа с 35 уровнями (верхняя граница на уровне 50 гПа) для всех сеток. Шаг интегрирования по времени 60 секунд на крупной сетке, 20 секунд на средней сетке, 6,7 секунд для мелкой сетки. Во всех экспериментах

использовалась полярная стереографическая проекция. Начальные и граничные условия получены из глобальной модели GFS с пространственным разрешением $1,0^{\circ} \times 1,0^{\circ}$, которые обновлялись каждые 6 часа. Во всех проведенных расчетах схемы параметризации использовались такие же, как и при моделировании новороссийской боры, таблица 5.1.

Расчетная область моделирования задана тремя сетками:

d01 с размером 80 узлов с запада на восток, 110 узлов с юга на север $64,6^{\circ} - 74,2^{\circ}$ с.ш. и $159,3^{\circ} - 180,2^{\circ}$ в.д.;

d02 - 70 узлов с запада на восток, 100 узлов с юга на север, $67,4^{\circ} - 71,7^{\circ}$ с.ш. и $166,4^{\circ} - 173,2^{\circ}$ в.д.;

d03 - 58 узлов с запада на восток, 88 узлов с юга на север $68,2^{\circ} - 70,9^{\circ}$ с.ш. и $168,2^{\circ} - 171,5^{\circ}$ в.д..

На рисунке 5.55 представлено положение используемых вложенных сеток.

Для исследования было выбрано 5 случаев сильного южака в Певеке.

А именно:

14-16 марта 2006 года,

06-08 декабря 2008 года,

06-08 января 2015 года,

13-14 октября 2019 года.

16-19 ноября 2021 года,

Для всех указанных случаев южака были смоделированы и проанализированы поля таких метеорологических параметров как скорость ветра и температура воздуха для всех 3 сеток. Также были построены вертикальные разрезы (до уровня 850 гПа и 550 гПа) для указанных параметров плюс вертикальная компонента скорости ветра. Для всех случаев результаты были получены через каждый час. В работе представлены результаты моделирования случаев выделенных курсивом.

Перед моделированием метеорологических характеристик визуально был воспроизведен такой параметр, как Terrain hight – высота местности, чтобы убедиться, что на воздушный поток оказывают влияние орографические неровности той высоты, о которых говорится в теории этого явления. Модельные данные параметра Terrain hight представлены на рисунке 5.56.

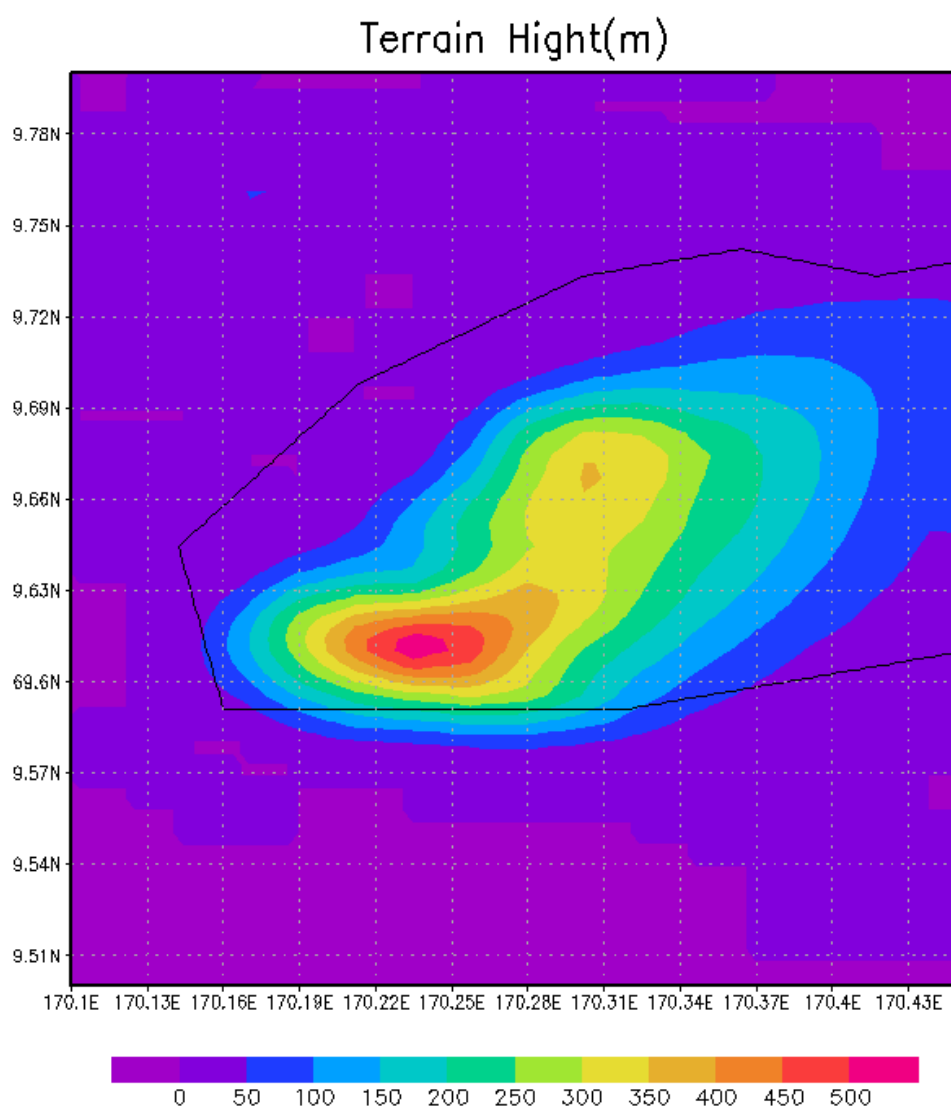


Рисунок 5.56 - Результаты моделирования высоты местности для Певека

На рисунке 5.56 видно, что на территории Певека имеется хребет с двумя пиками. Один на юге (гора Валькумея), высота которого 500-550

метров и на севере (гора Пээкиней/Певек) с высотой около 400 метров. Это в свою очередь совпадает с топографическими данными в этой области.

5.3.1 Южак 14-16 марта 2006

К сожалению, в открытом доступе нет архивных синоптических карт для региона города Певек. Отчего проанализировать синоптическую ситуацию по синоптическим картам в интересующие сроки, как в случае с Новороссийской борой, не представляется возможным.

Однако с помощью результатов реанализа ега-5 были построены и проанализированы поля приземного давления в момент зарождения, кульминации и затухания южака, что представлено на рисунках 5.57 – 5.59. По оси ОХ – долгота в градусах, по ОУ – широта в градусах.

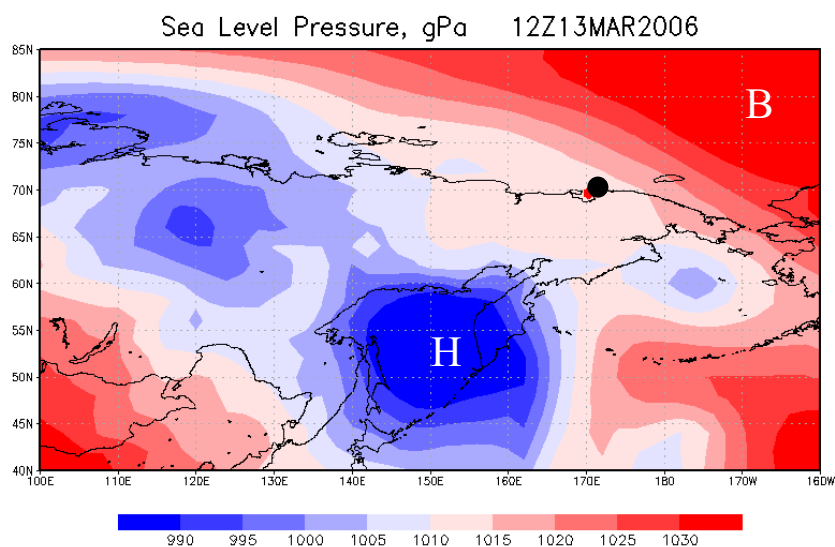


Рисунок 5.57 – Поле приземного давления в момент зарождения южака 13 часов 13 марта 2006 (черной точкой обозначен город Певек)

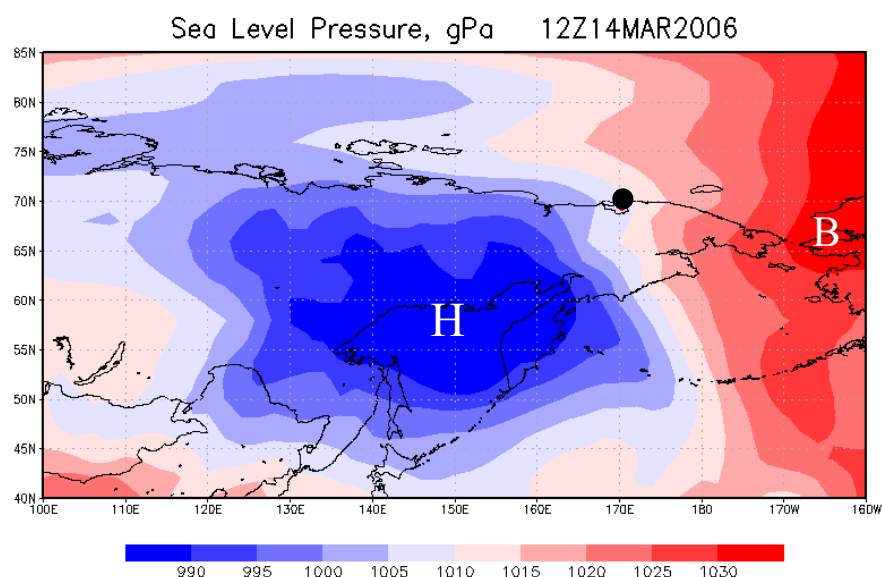


Рисунок 5.58 – Поле приземного давления в гПа в момент кульминации южак 12 часов 14 марта 2006 (черной точкой обозначен город Певек)

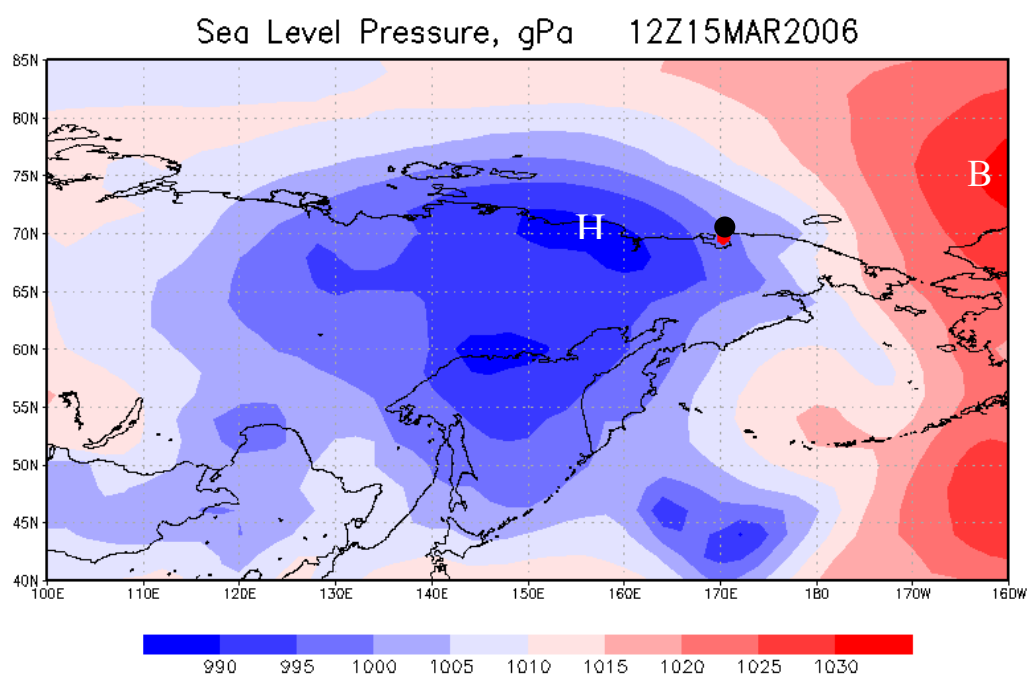


Рисунок 5.59 – Поле приземного давления в гПа в момент завершения южака 12 часов 15 марта 2006 (черной точкой обозначен город Певек)

Анализируя результаты моделирования приземного давления, можно отметить, что в момент зарождения (рисунок 5.57) и кульминации (рисунок 5.58) южака наблюдается благоприятная синоптическая ситуация для

развития и действия южака. А именно – циклон над континентальной частью Якутии и антициклон с центром к востоку от Чукотки, о чем подробнее говорилось в главе 3.4. К моменту завершения южака (рисунок 5.59) центр циклона смещается на север, благоприятное расположение циклона и антициклона относительно города Певек нарушается – южак затухает.

Важнейшим параметром при бороподобных ветрах является горизонтальное и вертикальное распределение скорости ветра. Поэтому ниже представлено пространственное распределение скорости ветра в районе города Певек. По оси ОХ – долгота в градусах, ОУ – широта в градусах.

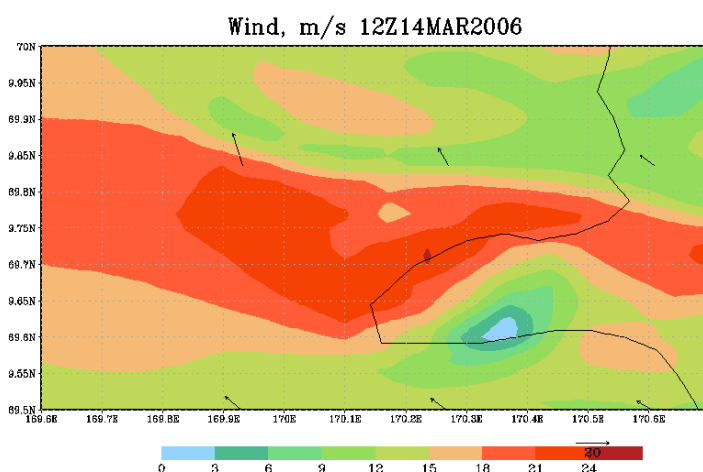


Рисунок 5.60 – Поле ветра в момент кульминации южака 12 часов 14 марта 2006

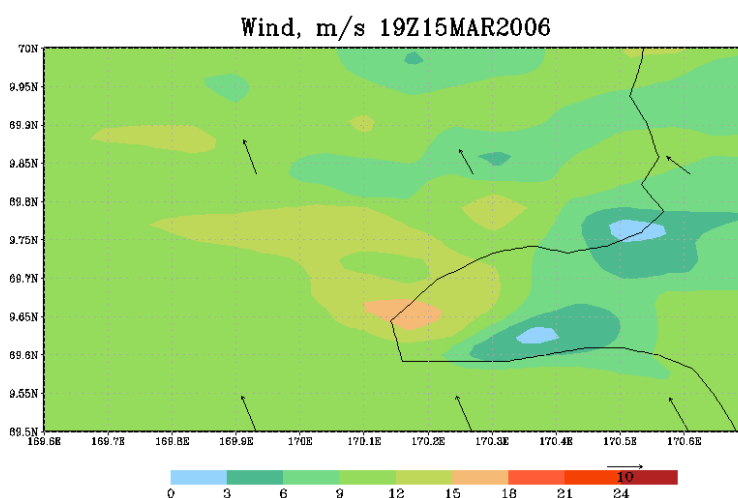


Рисунок 5.61 – Поле ветра в момент затухания южака 19 часов 15 марта 2006

В момент кульминации южака (рисунок 5.60) максимальные скорости ветра - 24 м/с отмечаются именно на побережье около города, по мере удаления от берега на северо-запад скорость ветра уменьшается, что характерно для бороподобных ветров. На наветренной стороне и при кульминации и при затухании южака наблюдается блокирование потока. Ветер имеет юго-восточное направление, что также характерно для южака в этом регионе. Поле ветра в момент затухания и зарождения южака выглядят очень похожими.

Также можно отметить, что в момент кульминации южака большие скорости ветра наблюдаются не только за горами на побережье, но и на обходе Певекского хребта с правого фланга. Режим обтекания орографического препятствия характеризуется также и частичным блокированием потока. Когда протяженность горного хребта не велика (а Певекский хребет не столь протяженный, всего около 20 км) в направлении перпендикулярном движению основного потока, увеличивается вероятность возникновения бокового обтекания препятствия в нижних слоях. Именно такая ситуация возникла при данном эпизоде южака. Для протяженных хребтов, например, протяженность Маркотхского хребта больше 50 км, обтекания не возникает, а происходит полное блокирование потока и образуется зона стагнации потока, о чем неоднократно было сказано и показано при анализе боры в Новороссийске. Однако обтекание произошло с правого фланга (северная часть хребта), относительно движения потока, в левой части хребта (южная часть) наблюдается блокирование. Связано это с тем, что высота хребта на юге несколько выше, что показано на рисунке 5.56.

Далее будут представлены и проанализированы поля температуры воздуха для данного случая южака.

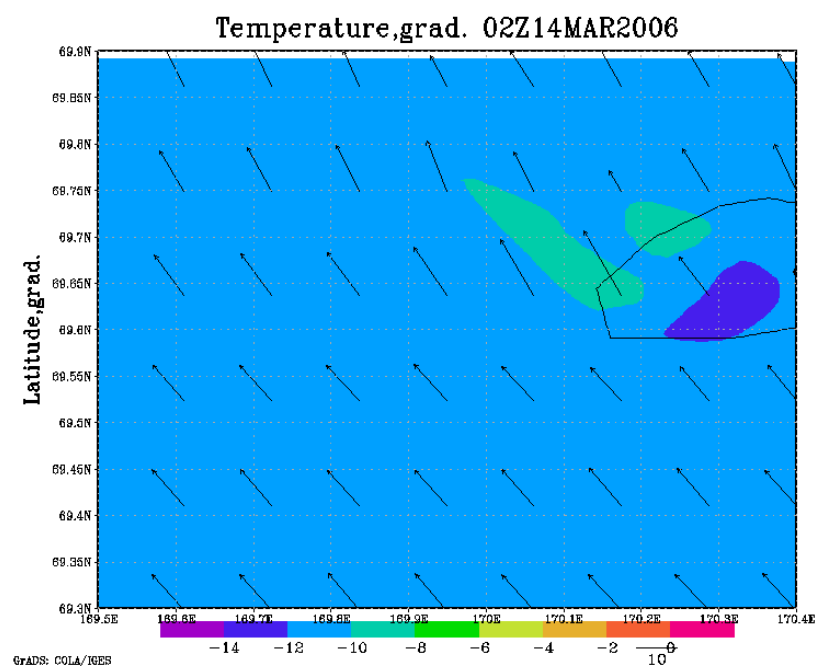


Рисунок 5.62 – Поле температуры воздуха в момент зарождения южака 02 часа 14 марта

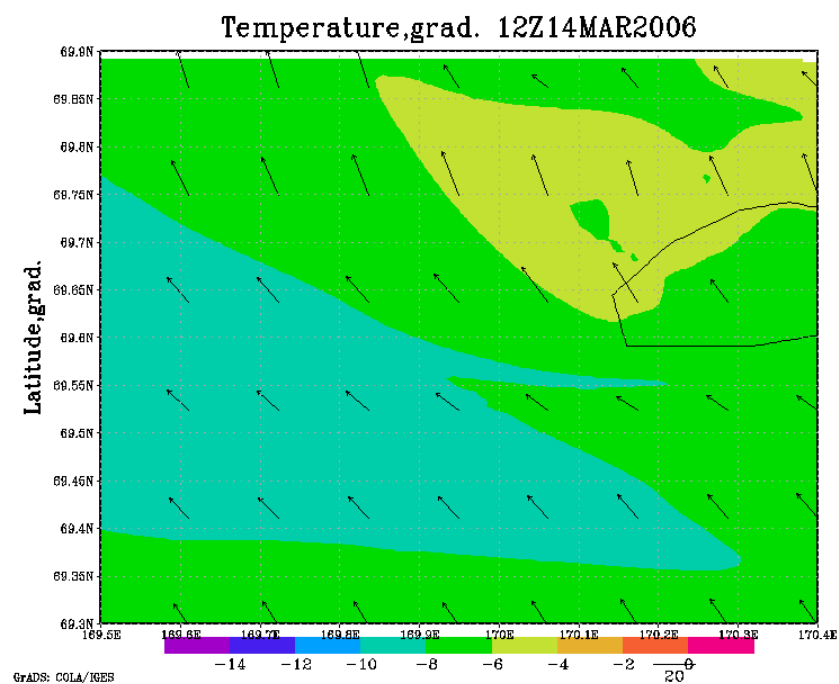


Рисунок 5.63 – Поле температуры в момент кульминации южака 12 часов 14 марта 2006

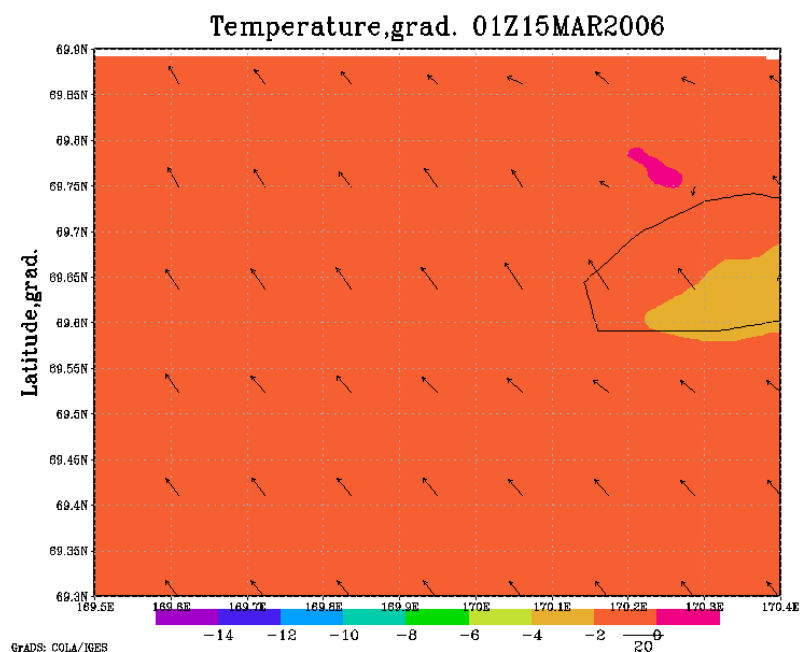


Рисунок 5.64 – Поле температуры воздуха в момент затухания южака 01 час
15 марта 2006

Сравнивая и анализируя данные поля температуры воздуха в разные моменты времени, можно сделать основной вывод, что в Певеке произошло повышение температуры в момент кульминации и по завершению южака.

В момент зарождения южака температура в Певеке равна, примерно, $(-11-(-9))^{\circ}\text{C}$, надо отметить, что это на срок 01 часа ночи (04 часа по Москве). В момент кульминации южака температура на побережье Певека увеличилась до -5°C . Однако это значение за 12 часов дня, поэтому по этим данным сложно понять за счет чего произошло увеличение температуры. Для этого были внимательно рассмотрены значения температуры в Певеке после кульминации и было обнаружено, что после кульминации на территории Певеке происходит увеличение температуры воздуха. Так как в 01 час ночи 15 марта температура увеличилась до $(-2^{\circ}\text{C}) - 0^{\circ}\text{C}$. Эти изменения температуры характерны для южака в этом регионе, о чем говорилось в главе 3.4. Причиной такого сильного изменения температуры является не адиабатический процесс нагрева воздушного потока при скатывании с

хребта, а адвекция теплой воздушной массой, которая идет с юга/юго-востока.

Далее будут показаны и проанализированы вертикальные разрезы скорости ветра и температуры воздуха. Разрез производился по широте – 69,62° с.ш. По оси ОХ – долгота в градусах, по ОУ - модельные уровни в гПа.

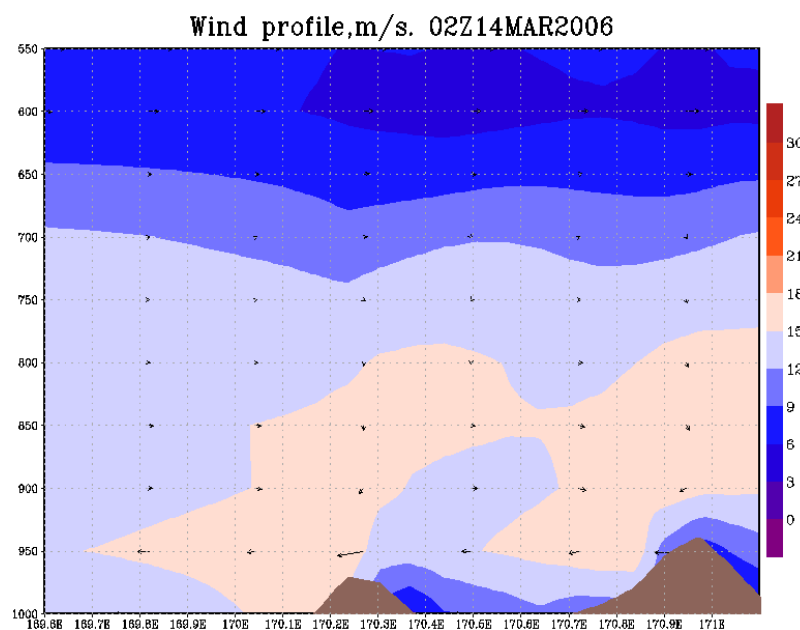


Рисунок 5.65 – Профиль скорости ветра в момент зарождения южака 02 часа
14 марта 2021

В момент зарождения процесса в этом случае южака наблюдается блокирование потока. Переваливая через хребет, ветер не приобретает больших скоростей. Можно отметить, что в слое от поверхности земли до уровня 900 гПа поток имеет восточное направление, а вот выше поток приобретает западное направление.

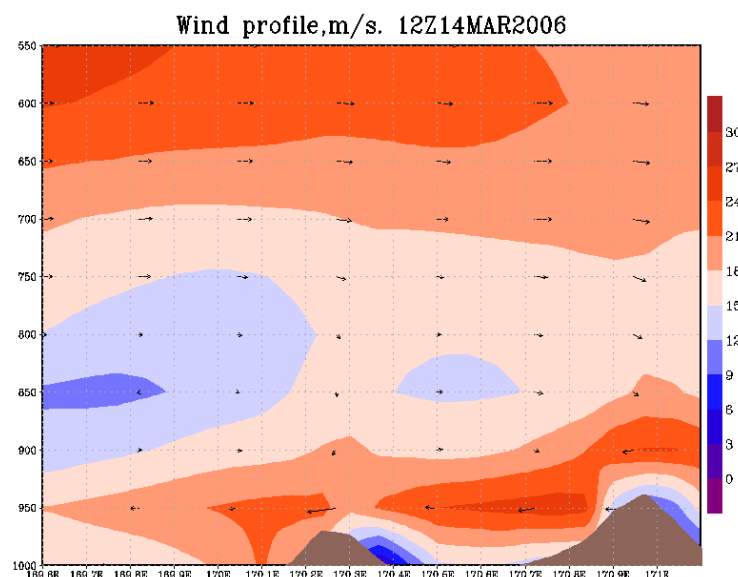


Рисунок 5.66 – Профиль скорости ветра в момент кульминации южака 12 часов 14 марта 2021

В момент кульминации южака на наветренной стороне, как и при всех других случаях южака и боры, у подножья хребта происходит блокирование потока. На подветренной стороне наблюдается усиление ветра.

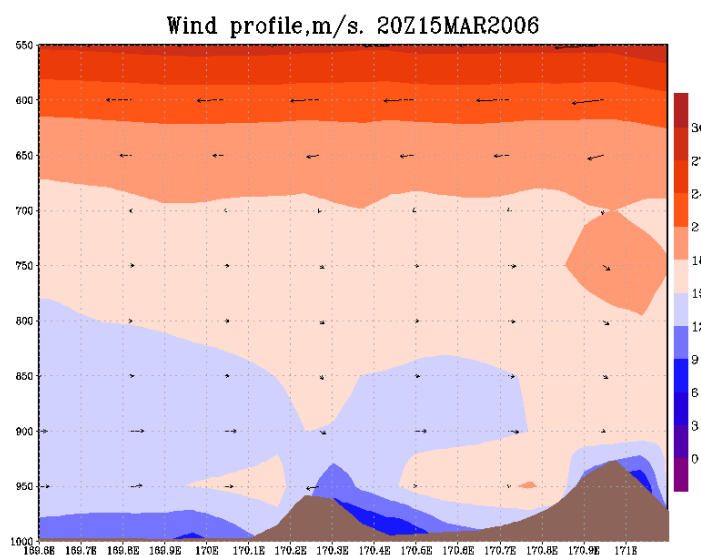


Рисунок 5.67 – Профиль скорости ветра в момент затухания южака 01 час 15 марта 2021

В момент затухания южака блокирование потока на наветренной стороне сохраняется. На подветренной стороне у подножья хребта больших скоростей ветра уже не наблюдается. В направлении потока преобладает западная составляющая направления ветра.

Далее будут рассмотрены профили температуры воздуха.

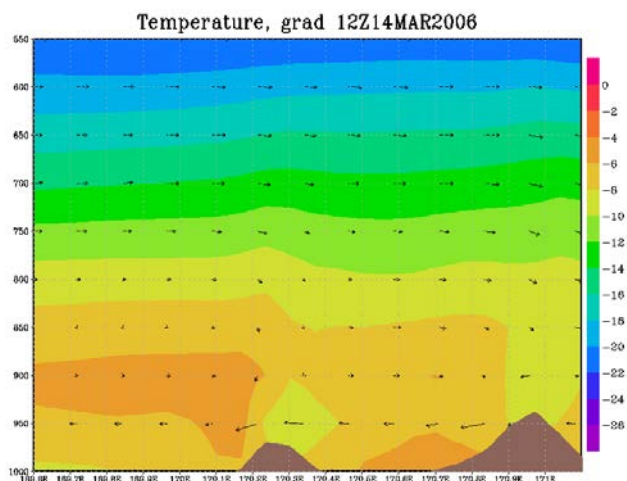


Рисунок 5.68 – Профиль температуры воздуха в момент кульминации южака
12 часов 14 марта 2006

В момент кульминации южака на подветренном склоне хребта отмечается наличие слабой температурной инверсии (слабой относительно интенсивности инверсии при боре в Новороссийске). По мере завершения южака инверсия полностью рассеивается. При этом исследовании было выявлено, что во время южака наблюдается именно такая слабая инверсия во всех рассмотренных случаях.

Далее будет рассмотрен профиль вертикальной компоненты скорости ветра.

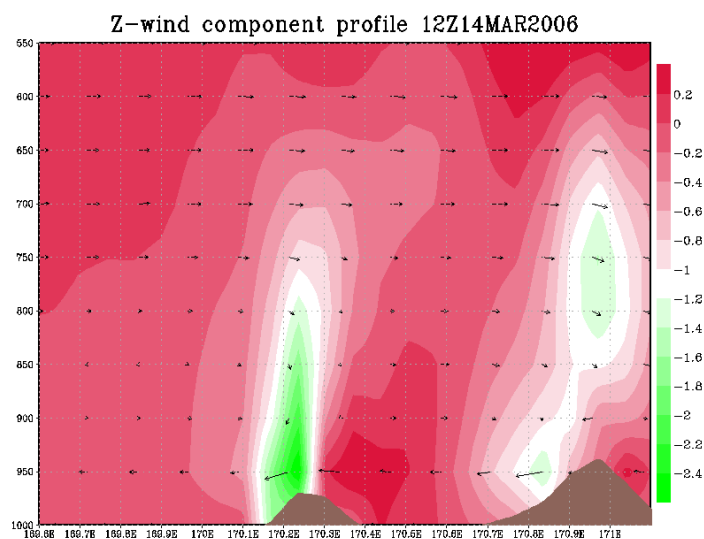


Рисунок 5.69 – Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации южака 12 часов 14 марта 2006

Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации очень похож на профиль скорости ветра в момент кульминации – на подветренной стороне возникает сильный нисходящий поток, на наветренной восходящий.

Модель верно воспроизвела горизонтальную и вертикальную структуру натекающего потока и пространственное распределение важных метеорологических величин для случая южака 14-16.03.2006, однако можно отметить, что в этом случае южака особенности исследуемых метеорологических величин, характерные для бороподобных ветров, менее выражены, чем при новороссийской боре.

5.3.2 Южак 06-07 января 2015

Для этого случая южака также сначала были получены и проанализированы данные о приземном давлении в регионе Певека, которое представлено на рисунках 5.70 – 5.72. По оси ОХ – долгота в градусах, по ОУ – широта в градусах.

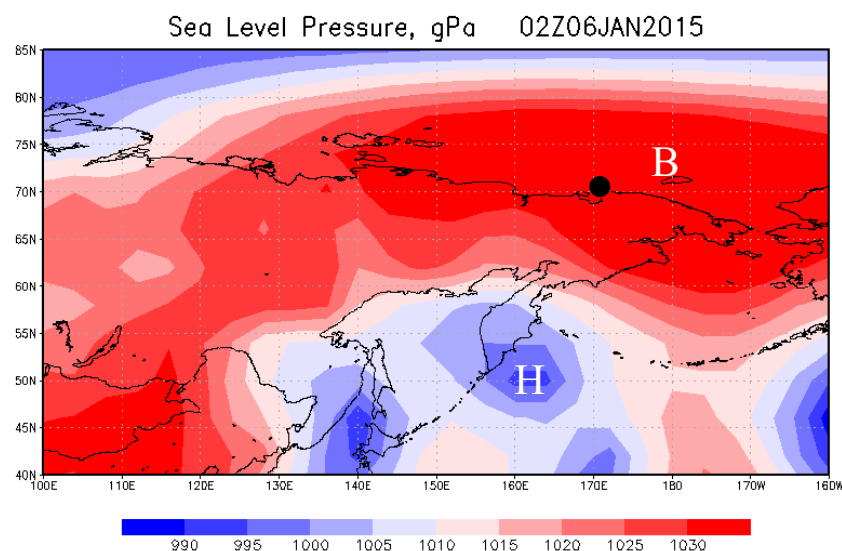


Рисунок 5.70 – Поле приземного давления в гПа в момент зарождения южака 02 часов 06 января 2015 (черной точкой обозначен город Певек)

В момент зарождения южака циклон с центром в районе полуострова Камчатка не глубокий, давление в центре 995 гПа, в Певеке и над всей северо-восточной частью России наблюдается область повышенного атмосферного давления – 1030 гПа.

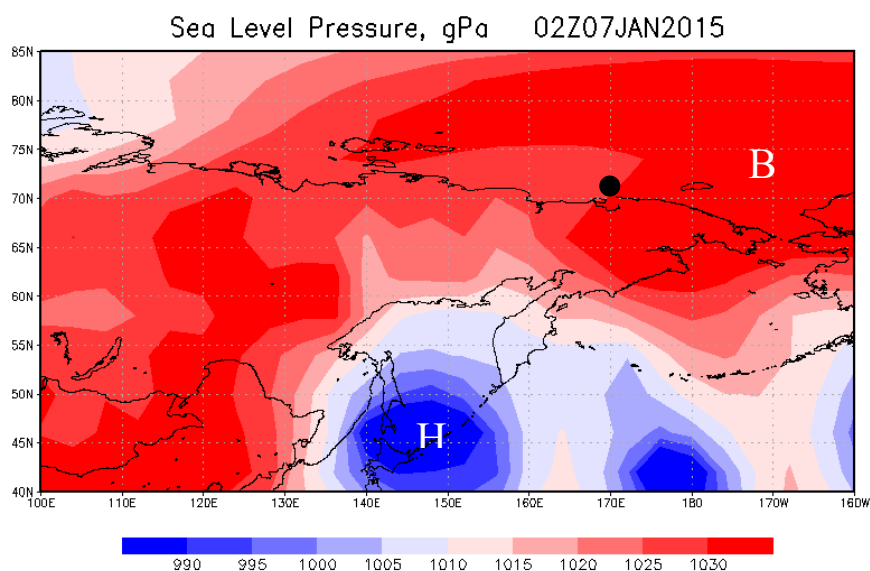


Рисунок 5.71 – Поле приземного давления в гПа в момент кульминации южака 02 часов 07 января 2015 (черной точкой обозначен город Певек)

К моменту кульминации боры произошли изменения в поле приземного давления. Циклон углубился до 990 гПа и сместился на юг. Область повышенного давления смещается на северо-восток.

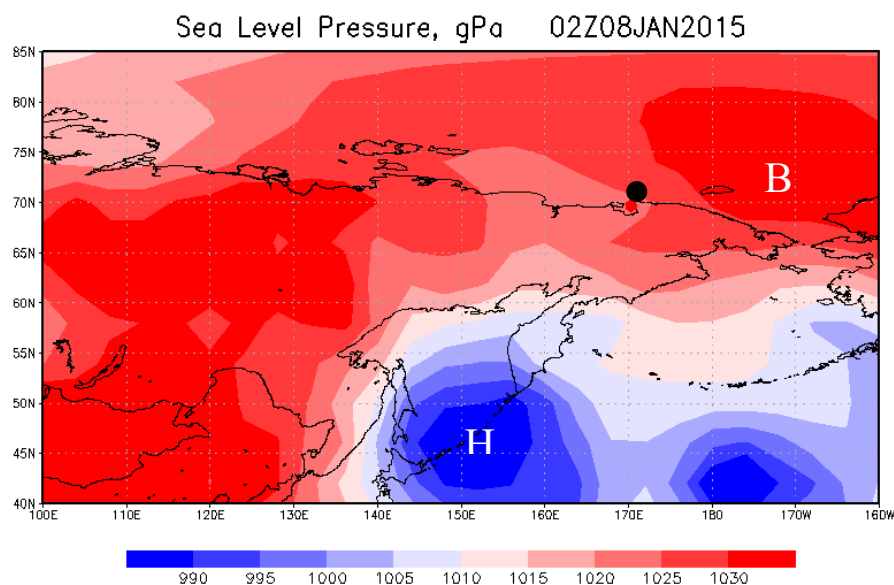


Рисунок 5.72 – Поле приземного давления в гПа в момент затухания южака 02 часов 08 января 2015 (черной точкой обозначен город Певек)

Через сутки, в момент завершения южака, положение и глубина циклона не изменилась, а вот антициклон в районе Певека ослаб. На момент завершения южака давление в Певеке упало до 1025 гПа.

Следующий параметр, который был рассмотрен для этого случая южака - поле скорости ветра в разные моменты времени.

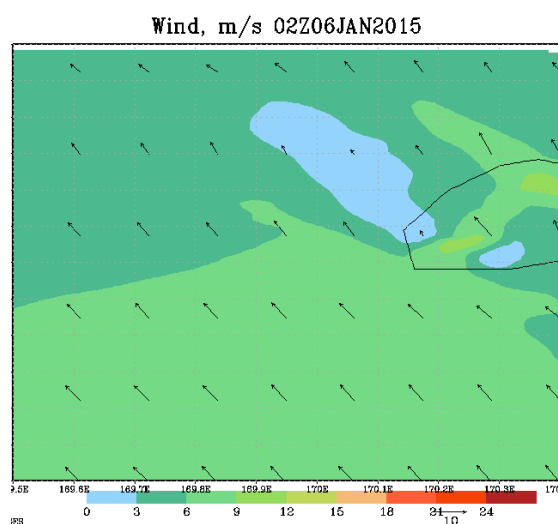


Рисунок 5.73 – Поле ветра в момент зарождения южака 02 часа 06 января 2015

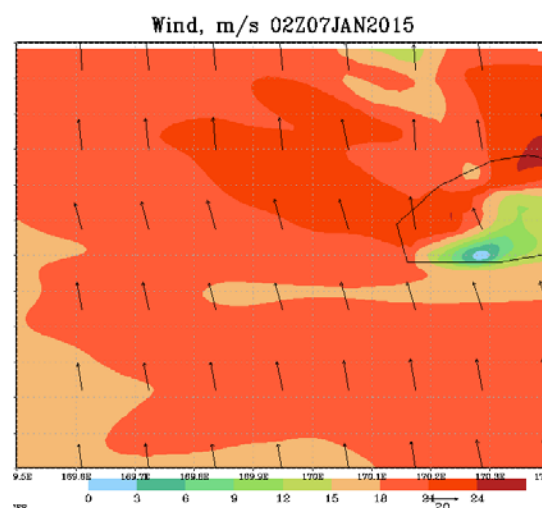


Рисунок 5.74 – Поле ветра в момент кульминации южака 02 часа 07 января 2015

На рисунках 5.73 и 5.74 представлено поле скорости ветра в момент зарождения южака (рисунок 5.73) и ровно через сутки в момент кульминации южака (рисунок 5.74) на мелкой сетке, то есть с пространственным разрешением 866 метров. Сравнивая результаты, можно сделать вывод о том, как сильно за 24 часа изменилось поле скорости ветра. В момент зарождения южака направление ветра юго-восточное, скорость ветра невелика – около 6-9 м/с. Однако, в районе хребта, на его наветренной стороне, явно видно блокирование потока (голубой овал на полуострове) и небольшое усиление ветра за ним до 12-16 м/с. В момент кульминации южака скорости ветра на всей исследуемой территории значительно выше. На наветренной стороне южной части хребта всё также отмечается блокирование потока. А вот на подветренной усиление ветра до 24 м/с. Также можно заметить, что большие скорости отмечены не только на побережье. Поэтому, чтобы проанализировать, на какое расстояние распространяется усиление ветра были построены поля скорости для средней сетки, то есть сетки с пространственным разрешением 2,6 км. Полученные результаты представлены на рисунках 5.75 и 5.76.

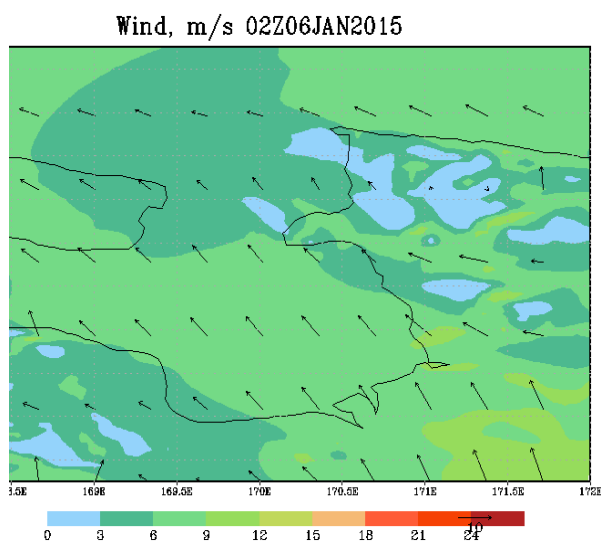


Рисунок 5.75 – Поле ветра в момент зарождения южака 02 часа 06 января 2015

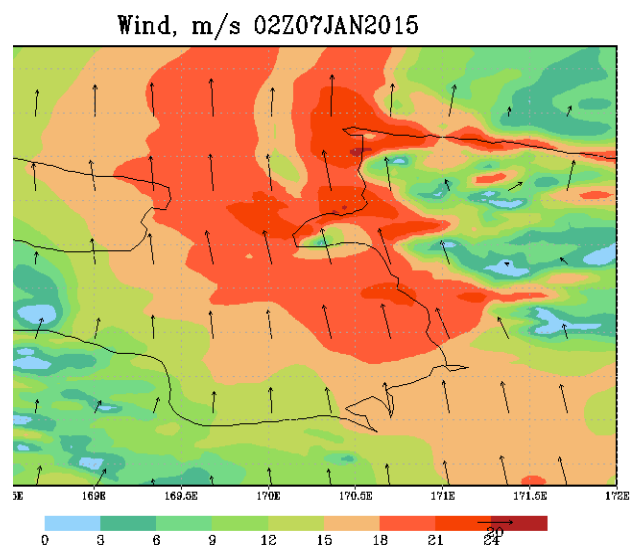


Рисунок 5.76 – Поле ветра в момент кульминации южака 02 часа 07 января 2015

Анализируя поля, представленные на рисунках 5.75 и 5.76, можно сказать, что в момент зарождения южака области блокирования по площади значительно больше, нежели при кульминации южака. Также видно, что усиление потока происходит еще до подхода к Певекскому хребту. Однако с помощью полей, представленных на рисунке 5.76, можно заметить, что максимальные скорости отмечаются именно за хребтом. Данный случай, так же как и 16-20.11.2021, является ярким примером того, что при певекском южаке происходит обтекание хребта с флангов, а это в свою очередь уменьшает скорость ветра в Певеке.

Далее будет показано и проанализировано поле температуры воздуха в разные моменты времени южака.

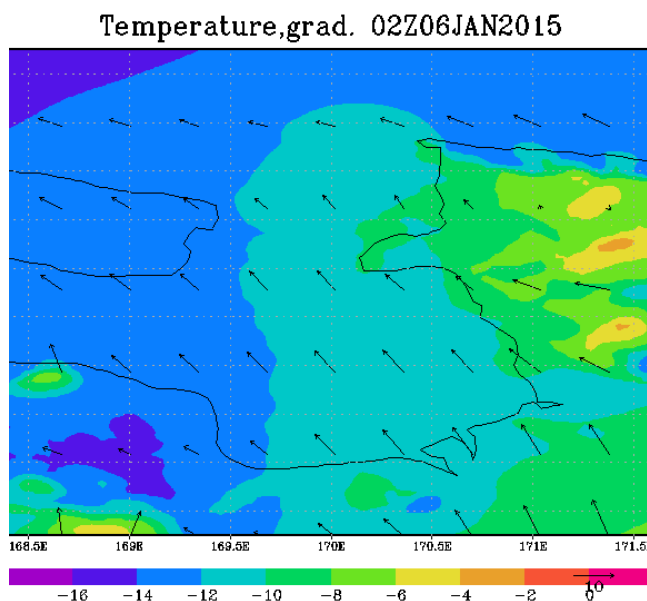


Рисунок 5.77 – Поле температуры воздуха в момент зарождения южака 02 часа 06 января 2015

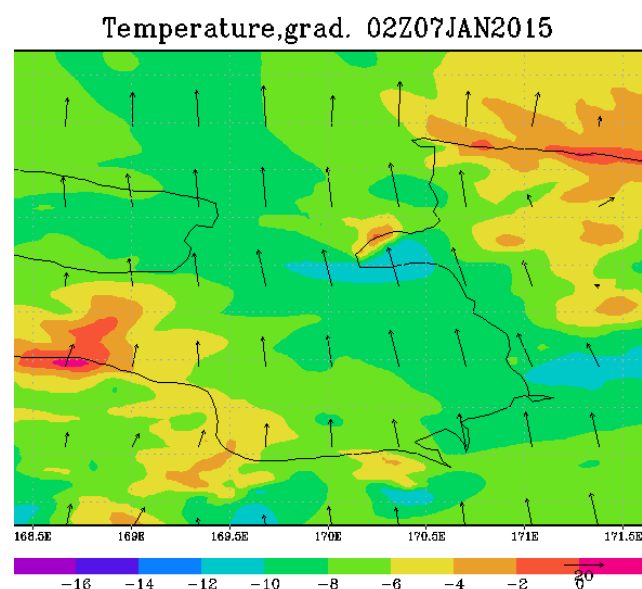


Рисунок 5.78 – Поле ветра в момент кульминации южака 02 часа 07 января 2015

Анализируя поля температуры воздуха в разные моменты действия южака, даже на сетке с пространственный разрешением 2,6 км, как видно в полях, представленных на рисунках выше, можно легко заметить, что в момент кульминации южака в Певеке температура воздуха увеличилась по сравнению с температурой на момент начала южака. Для лучшего понимания насколько сильно изменилась температура, были построены поля температуры воздуха на сетке с пространственным разрешением 866 метров, представленные на рисунках 5.77 и 5.78.

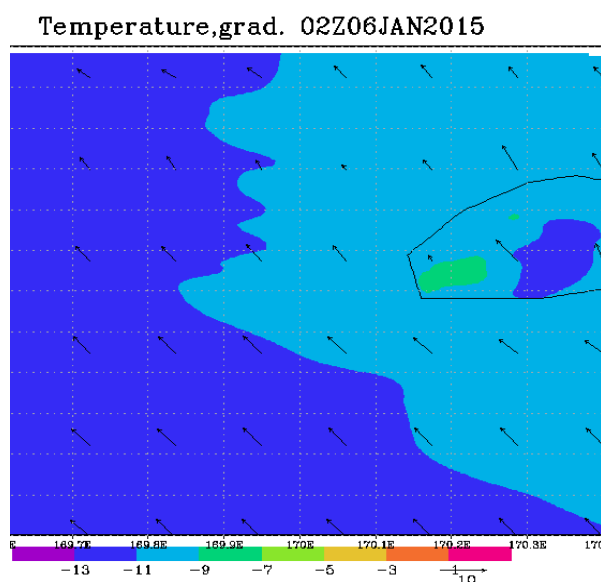


Рисунок 5.79 – Поле температуры воздуха в момент зарождения южака 02 часа 06 января 2015

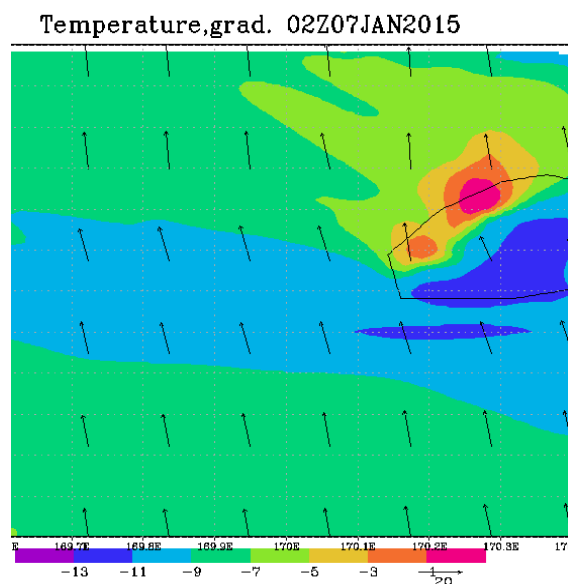


Рисунок 5.80 – Поле температуры воздуха в момент кульминации южака 02 часа 07 января 2015

Сравнивая температуру воздуха в момент зарождения южака с температурой в момент его кульминации, сразу можно сказать, что температура воздуха при максимальных порывах ветра в Певеке выше, чем на этапе его зарождения. В начальный момент действия южака температура в Певеке составляет $(-11 - (-9))^{\circ}\text{C}$, в кульминационный момент температура в Певеке увеличилась до 1°C . Однако и в момент зарождения и в момент кульминации южака на наветренной стороне, образуется зона выхолаживания потока.

Далее будут представлены профили скорости ветра и температуры воздуха и вертикальной компоненты скорости ветра, где по оси ОУ использовались модельные уровни в гПа, по ОХ долгота в градусах для всех исследуемых случаев южака.

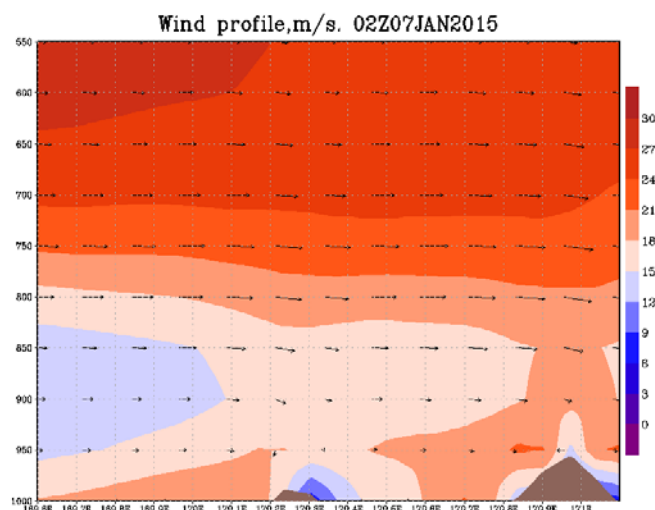


Рисунок 5.81 – Профиль скорости ветра в момент кульминации боры 02 часа 07 января 2015

При этом эпизоде южака ярко выраженного усиления ветра на подветренной стороне не происходит, связано это возможно с тем, что происходит обтекание потока с флангов. Критический уровень расположен на изобарической поверхности 200 гПа.

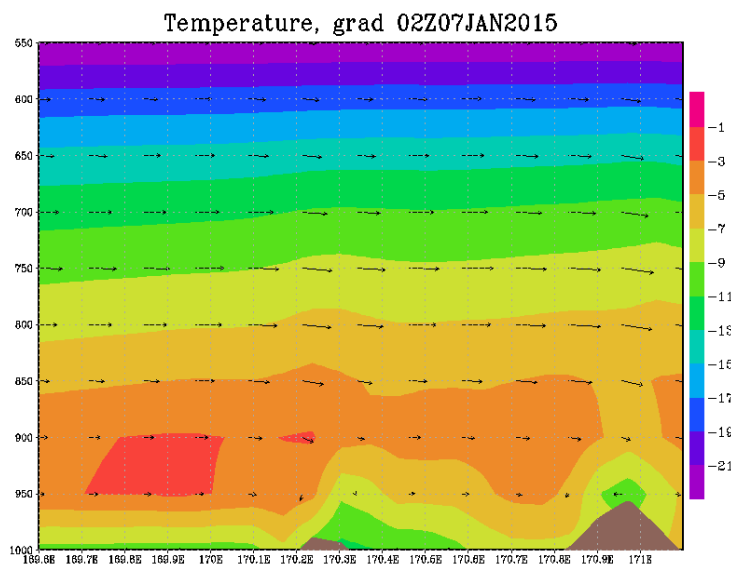


Рисунок 5.82 – Профиль температуры воздуха в момент кульминации южака 02 часа 17 января 2015

Как и при других случаях южака над подветренной частью хребта отмечается слабая инверсия температуры. По мере завершения южака рассеивается и инверсия.

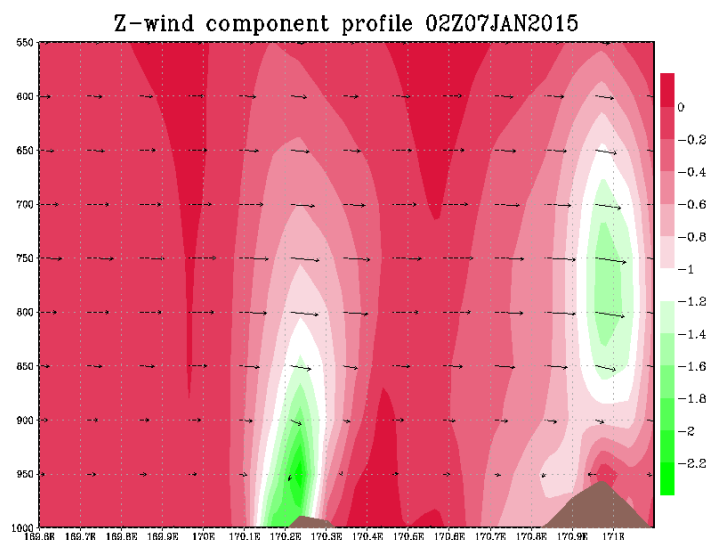


Рисунок 5.83 – Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации бора 02 часа 07 января 2015

На подветренной стороне хребта наблюдается сильный нисходящий поток, скорость вертикальной компоненты скорости ветра (представленная на рисунке 5.83) на склоне равна -2,2 м/с.

Также можно заметить, что в профилях метеорологических величин для случая бору 06-08.01.2015 преобладает восточная составляющая ветра. Проанализировав высотные поля было выявлено, что в слое от поверхности земли до уровня 950 гПа происходит небольшой поворот ветра с юго-восточного на южное и юго-западное, у поверхности земли этого поворота не отмечается.

Модель верно воспроизвела горизонтальную и вертикальную структуру натекающего потока и пространственное распределение важных метеорологических величин для случая южака 06.01.2015 – 08.01.2015.

5.3.3 Южак 16-19 ноября 2021

Так как фактических данных о распределении давления в районе Чукотского автономного округа, республики Саха (Якутия), Магаданской области в открытом доступе нет, поэтому первое поле, которые было проанализировано – поле приземного давления, результаты представлены на рисунках 5.84 – 5.86.

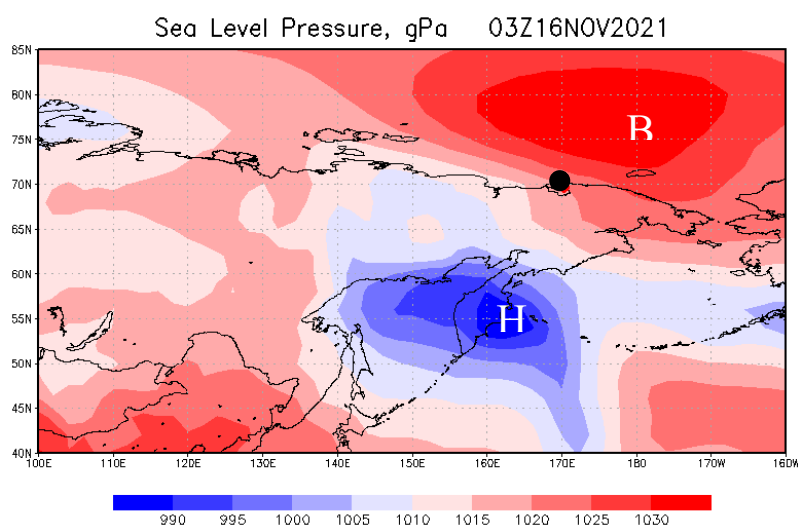


Рисунок 5.84 – Поле приземного давления в гПа в момент зарождения южака 03 часов 16 ноября 2021 (черной точкой обозначен город Певек)

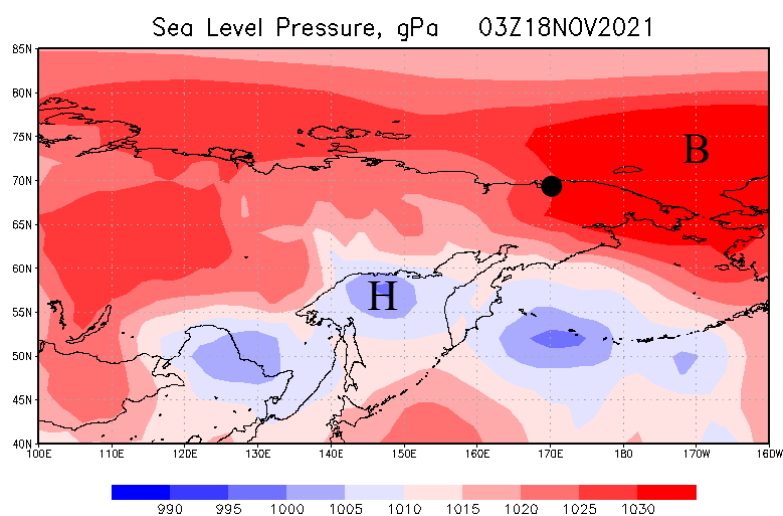


Рисунок 5.85 – Поле приземного давления в гПа в момент кульминации южака 03 часов 18 ноября 2021 (черной точкой обозначен город Певек)

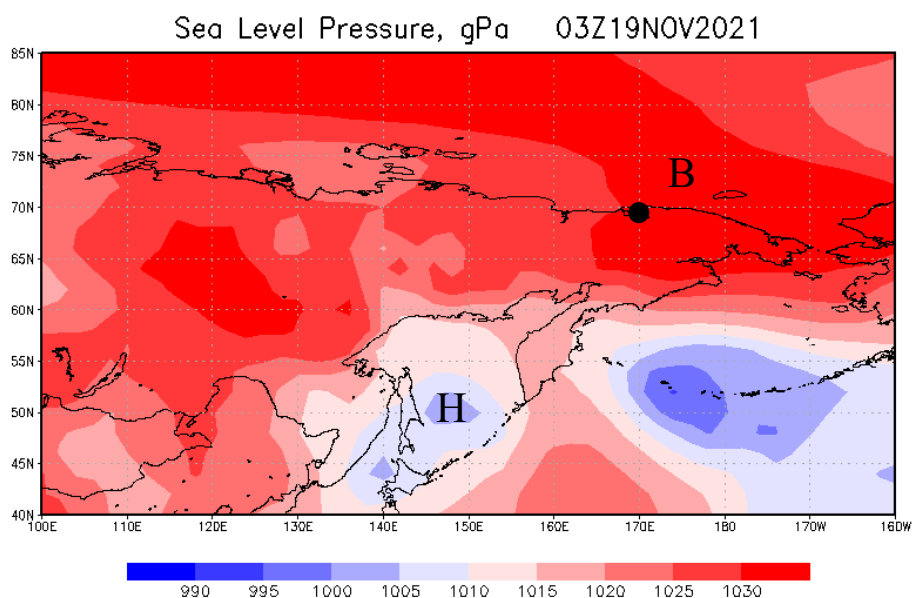


Рисунок 5.86 – Поле приземного давления в гПа в момент затухания южака
03 часов 17 ноября 2021 (черной точкой обозначен город Певек)

Анализируя поле приземного давления в исследуемом регионе можно заметить, что в момент зарождения южака формируется благоприятная синоптическая обстановка для его развития – область низкого давления с центром в 990 гПа над полуостровом Камчатка, а область высокого над Чукотским автономным округом с центром в 1030 гПа (рисунок 5.84). Создается барический градиент давления в 40 гПа на 2 тысячи километров. В момент кульминации южака (рисунок 5.85) циклон ослаб до 995 гПа и сместился на запад, антициклон сместился на восток. В момент завершения южака (рисунок 5.86) циклон продолжил ослабевать до 1005 гПа и сильно сместился на юг. Барический градиент ослаб – южак завершился.

На рисунках 5.87-5.88 представлено поле скорости ветра в разные моменты развития южака. По оси ОХ – долгота в градусах, по ОУ – широта в градусах.

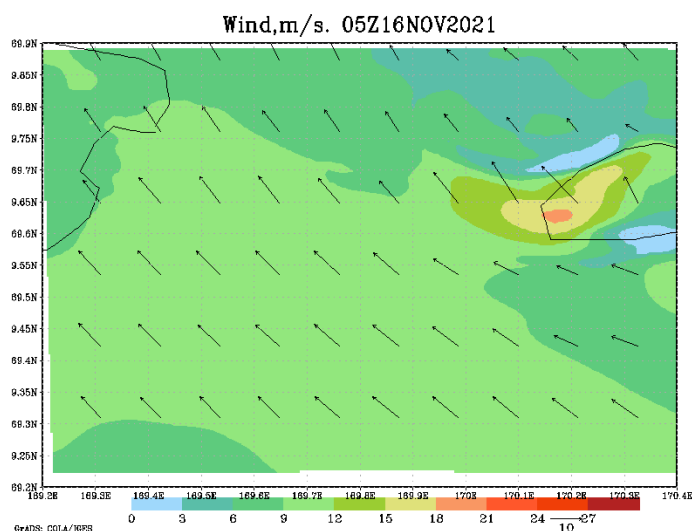


Рисунок 5.87 – Поле ветра в момент зарождения южака 05 часов 16 ноября 2021

Анализ поля ветра (рисунок 5.87) позволяет сделать вывод о том, что в момент зарождения южака поле ветра относительно гладкое, однако на территории Певека уже появляется локальное усиление ветра. Скорость ветра достигает 20 м/с. Ветер имеет юго-восточное направление, что характерно для южака.

На рисунке 5.88 представлено поле ветра в момент кульминации южака, которая прилась на срок 03 часа 18 ноября 2021 года.

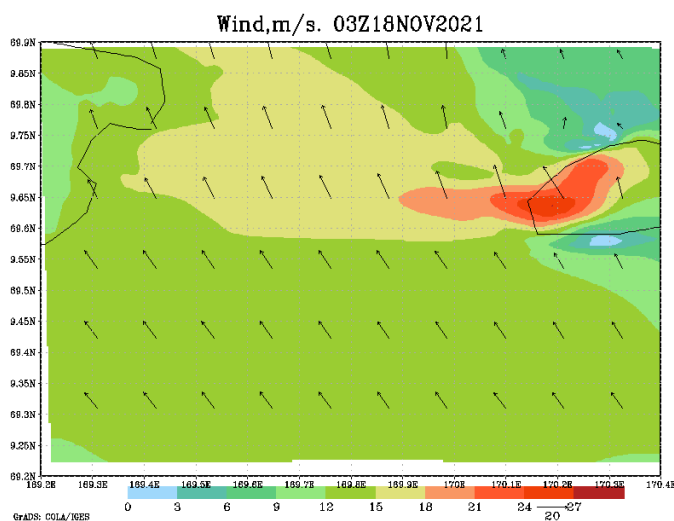


Рисунок 5.88 – Поле ветра в момент кульминации южака 03 часа 18 ноября 2021

В момент кульминации южака (рисунок 5.88) ветер также имеет юго-восточное направление. Именно в Певеке происходит значительное локальное усиление скорости ветра, скорость ветра достигает 27 м/с. Также можно заметить, что перед Певекским хребтом возникает блокирование потока, скорость ветра перед хребтом составляет 0-3 м/с. По мере удаления от берега скорость ветра уменьшается.

По мере затухания южака уменьшается и скорость ветра в Певеке, что можно увидеть на рисунке 5.89, на котором представлено поле скорости ветра в 00:00 19 ноября 2021 года.

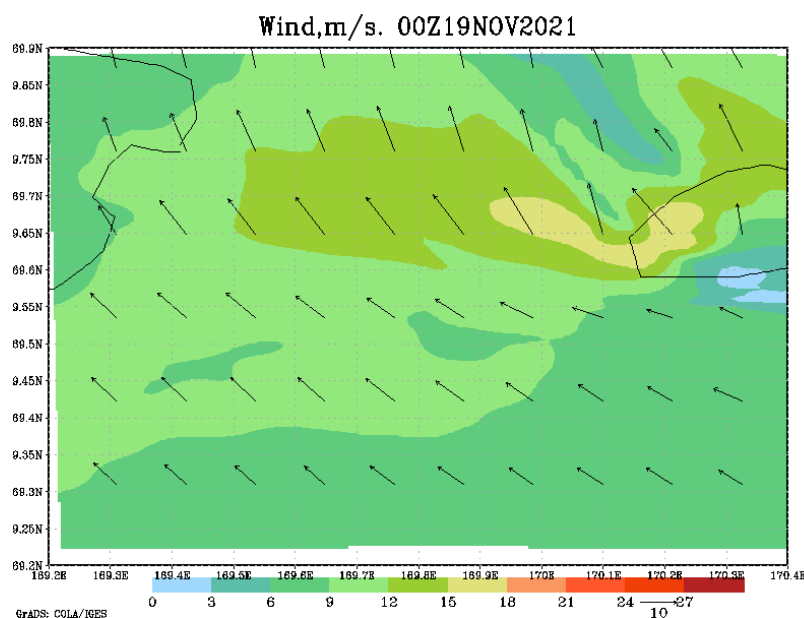


Рисунок 5.89 – Поле ветра в момент затухания южака 00 часов 19 ноября 2021

Далее будут представлены поля температуры воздуха при действии южака.

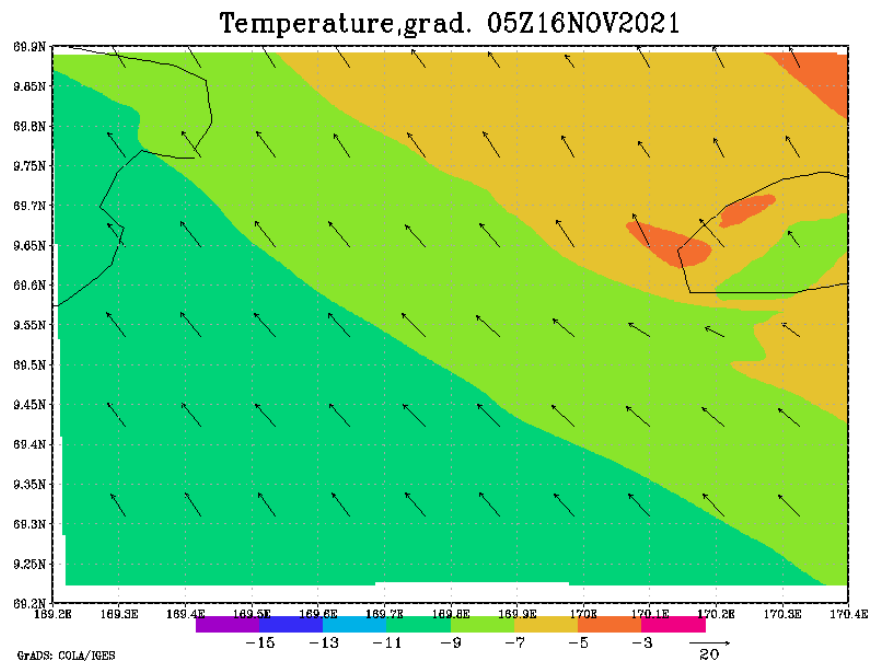


Рисунок 5.90 – Поле температуры в момент зарождения южака 05 часов 16 ноября 2021

В момент зарождения южака поле температуры довольно однородное. Однако максимальные температуры наблюдаются в городе Певек и на северо-востоке, последнее показалось странным, а так как в работе использовалась и более крупная сетка, то можно проанализировать, что в этой области было в этот момент. Поэтому на рисунке 5.91 представлено поле температуры в момент зарождения южака на сетке с пространственным разрешением 2,6 км.

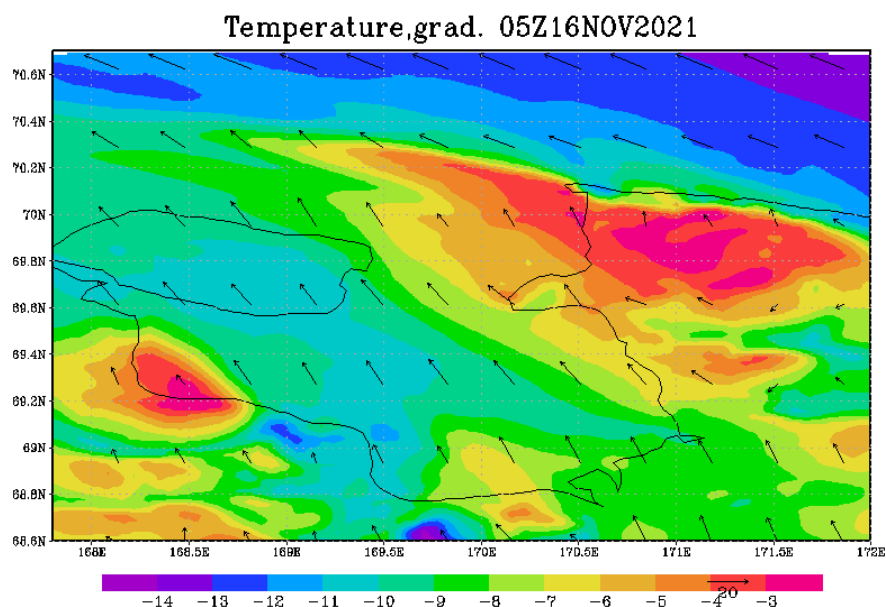


Рисунок 5.91 – Поле температуры воздуха в момент зарождения южака 05 часов 16 ноября 2021

Анализируя поле, представленное на рисунке 5.91, можно увидеть, что действительно северо-восточнее Певека располагается область тепла, температура воздуха в которой всего -3°C . Также в этом поле видно, что в самом Певеке температура относительно высокая (-5°C). А вот за Певекским хребтом температура около (-8°C).

На рисунке 5.92 представлено поле температуры воздуха в момент кульминации боры.

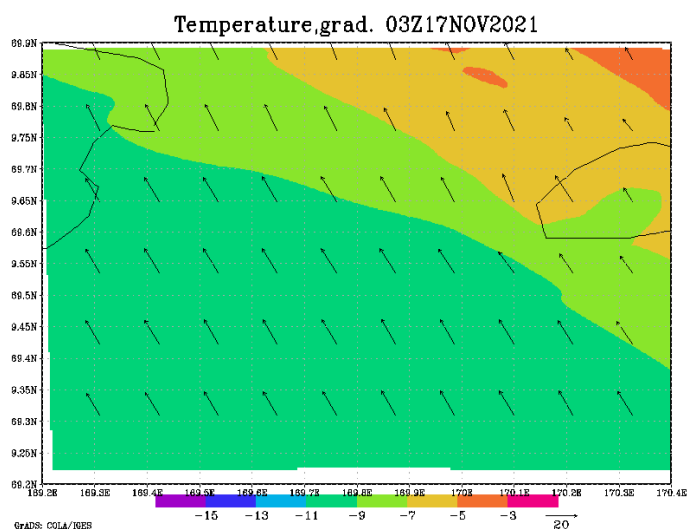


Рисунок 5.92 – Поле температуры в момент кульминации южака 03 часа 17 ноября

Анализируя поле температуры в момент кульминации южака можно отметить, что в Певеке температура воздуха составляет $(-7^{\circ}\text{C}) - (-5^{\circ}\text{C})$, за Певекским хребтом около (-9°C) .

В заключение анализа поля температуры в период действия южака 16-19 ноября 2021 можно сказать, что значительных изменений температуры не происходит, в отличие от боты в Новороссийске, которая значительно падает в период кульминации боты.

Для исследования южака, как и при исследовании боты, анализировались профили важных метеорологических параметров. Для построения профилей была выбрана область $169,8^{\circ} - 171^{\circ}$ долготы, вертикальный разрез проводился вдоль широты $69,62^{\circ}$.

По оси ОУ использовались модельные уровни в гПа, по ОХ долгота в градусах для всех исследуемых случаев южака.

На рисунке 5.93 представлен профиль скорости ветра в момент кульминации южака.

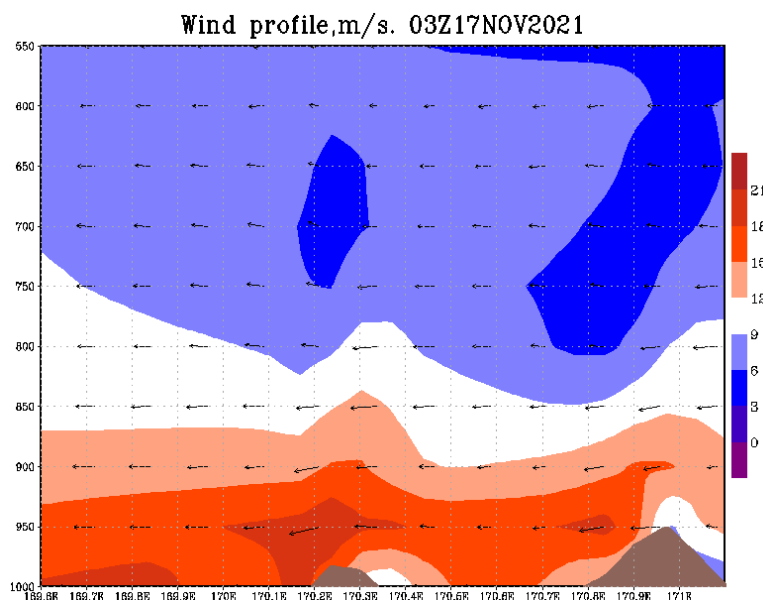


Рисунок 5.93 – Профиль скорости ветра в момент кульминации южака
03 часа 17 ноября 2021

Анализируя профиль скорости ветра в момент кульминации южака можно отметить, что на наветренной стороне хребта происходит блокирование набегающего потока воздуха, образуется зона стагнации потока. Усиление ветра происходит в прямой близости от хребта.

Также были получены и проанализированы данные вертикального разреза скорости ветра для большей высоты (до 250 гПа). На рисунке 5.94 представлен профиль скорости ветра до изобарической поверхности 250 гПа.

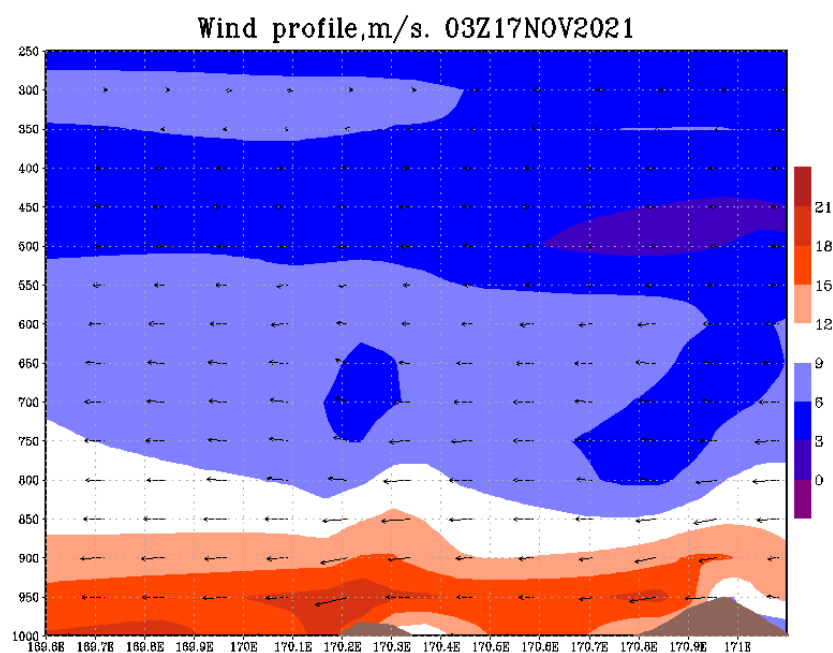


Рисунок 5.94 – Профиль скорости ветра в момент кульминации южака 03 часа 17 ноября до уровня 250 гПа

С помощью результатов представленных на рисунке 5.94, можно отметить, что критический уровень расположен довольно высоко на высоте 300 гПа, относительно новороссийской боры (650 гПа).

Далее будет представлено поле температуры воздуха в момент кульминации южака.

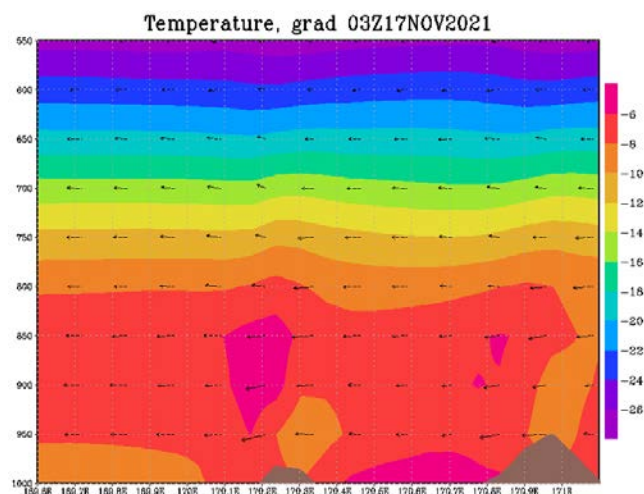


Рисунок 5.95 – Профиль температуры воздуха в момент кульминации южака 03 часа 17 ноября

Построив и проанализировав вертикальные разрезы для температуры воздуха во время южака 16-19 ноября 2021 года, было выявлено, что эта метеорологическая величина во время всего периода южака меняется не значительно.

Далее будет рассмотрена вертикальная компонента скорости ветра, показанная на рисунке 5.96 в момент кульминации южака.

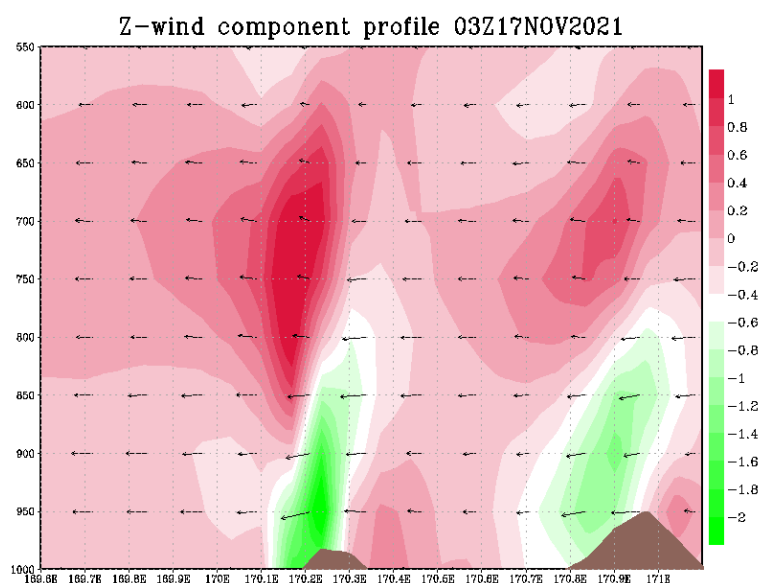


Рисунок 5.96 – Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации южака

Анализируя рисунок 5.96, можно сразу сказать, что как и при боре на подветренной стороне хребта отмечается ярко выраженный нисходящий поток (зеленый цвет), что соответствует отрицательным значениям вертикальной скорости. Однако при этом случае южака после сильного нисходящего потока на подветренной стороне максимум восходящего потока происходит на высоте 750 гПа.

Модель верно воспроизвела горизонтальную и вертикальную структуру натекающего потока и пространственное распределение важных метеорологических величин для случая южака 16.11.2021-19.11.2021, однако можно отметить, что при этом случае южака исследуемые параметры менее выражены, чем при новороссийской боре.

В заключение можно сделать вывод, что все рассмотренные случаи южака похожи друг на друга. А именно:

- основной поток всегда имеет юго-восточное направление;
- горизонтальный масштаб явления около 20 км;
- вертикальный масштаб 1-2 км;
- блокирование потока на наветренной стороне хребта;
- выхолаживание потока в зоне блокирования;
- возможно обтекание хребта с правого фланга;
- усиление ветра на подветренной стороне;
- критический уровень отсутствует или располагается довольно высоко – 300 гПа;
- на подветренных склонах ярко выражен нисходящий поток, на наветренных – восходящий;
- слабовыраженная температурная инверсия над подветренной стороной хребта;
- повышение температуры воздуха в городе Певек.

5.4 Общие и различные черты новороссийской бory и певекского южака

Для того чтобы ещё лучше понять что же такое бороподобные ветры, выделить особые, отличительные черты новороссийской бory было произведено сравнение бory и южака. Для сравнения был взят один из стандартных случаев бory в Новороссийске (06-08.02.2012) и один певекского южака (16-20 ноября 2021).

Первый параметр, который будет рассмотрен – пространственная структура поля ветра в момент кульминации бory/южака.

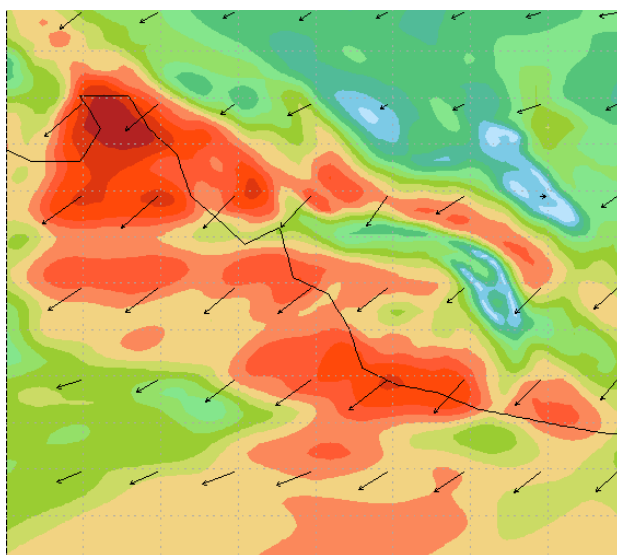


Рисунок 5.97 – Поле скорости ветра в момент кульминации бory в Новороссийске

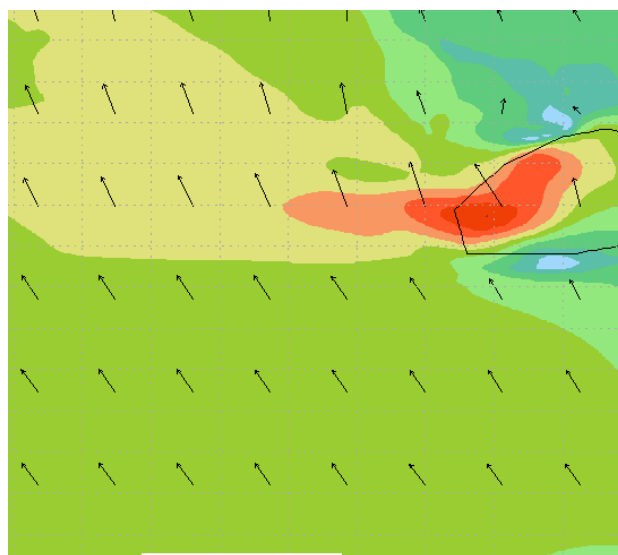


Рисунок 5.98 – Поле скорости ветра в момент кульминации южака в Певеке

Сравнивая поля скорости ветра в момент кульминации, можно отметить, что и при боре и при южаке максимальные скорости ветра наблюдаются вдоль береговой линии при выходе потока на водную поверхность. По мере удаления от берега скорость ветра уменьшается. На наветренных сторонах Маркотхского и Певекского хребта можно заметить

области блокирования потока (голубые и зеленоватые области). Также можно отметить, горизонтальные масштабы явления – поскольку протяженность Маркотхского хребта в Новороссийске (50 км) больше, чем протяженность Певекского (20 км), то и линейные размеры боры значительно больше, чем у южака. Направление ветра при боре всегда северо-восточное, при южаке юго-восточное.

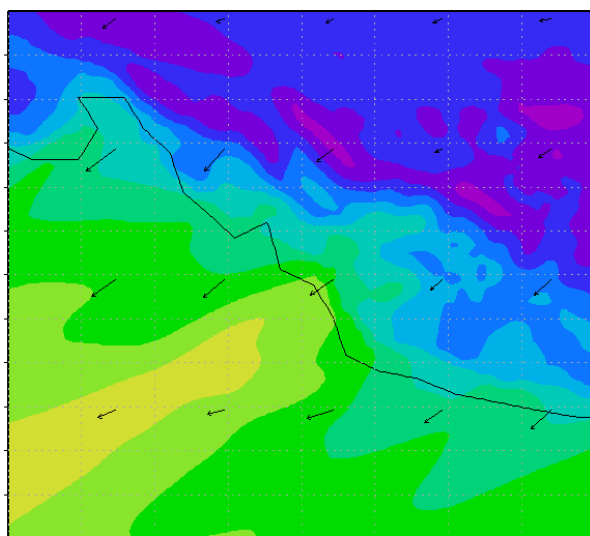


Рисунок 5.99 – Поле температуры воздуха в момент кульминации боры в Новороссийске

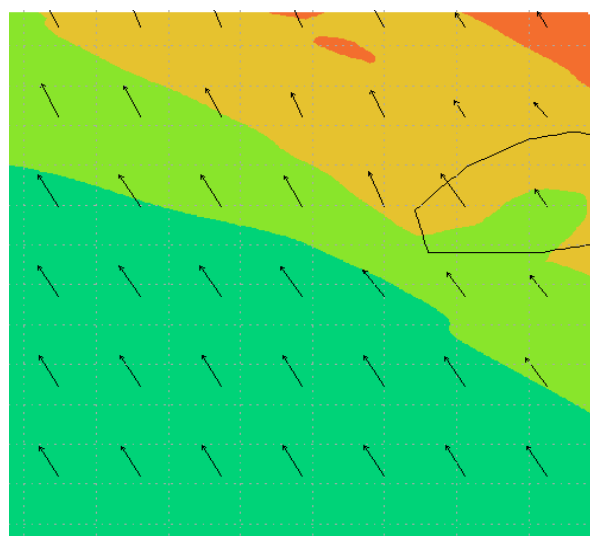


Рисунок 5.100 – Поле температуры воздуха в момент кульминации южака в Певеке

При действии боры в Новороссийске температура в Цемесской бухте и в городе Новороссийске значительно падает, может упасть на 10-15° за несколько часов, а вот в Певеке наоборот, температура воздуха значительно увеличивается и также может увеличиться на 10-15° за несколько часов. Связано это с адвекцией холодного континентального воздуха при боре и адвекцией теплой воздушной массой при южаке.

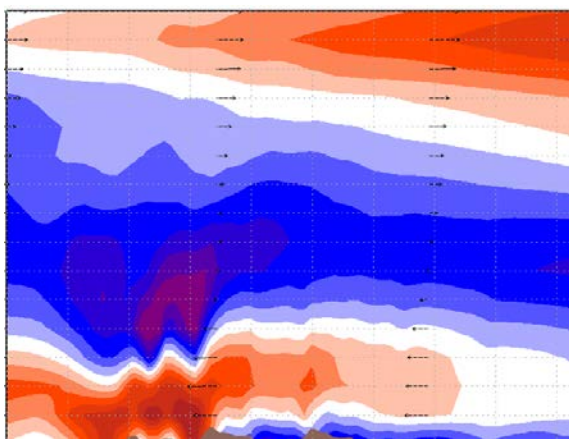


Рисунок 5.101 – Профиль скорости ветра в момент кульминации боры в Новороссийске

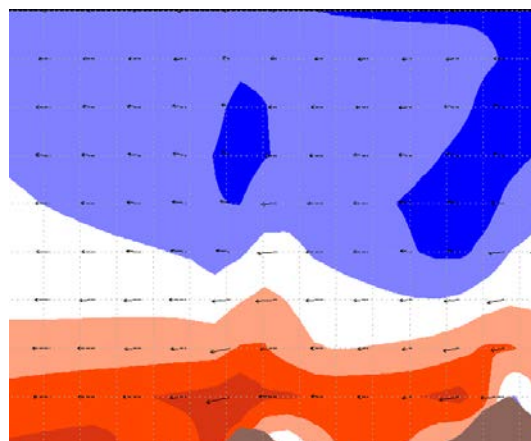


Рисунок 5.102 – Профиль скорости ветра в момент кульминации южака в Певеке

Сравнивая вертикальные разрезы скорости ветра, можно сказать, что блокирование потока у подножья на наветренной стороне хребта наблюдается, как при боре, так и южаке. Также можно сказать, что вертикальные размеры метеорологических величин при боре и южака в среднем одинаковые, все сильные возмущения и усиления ветра происходят в слое от поверхности земли до уровня 850 гПа (1,5 км). Максимальные скорости ветра при боре в Новороссийске отмечаются непосредственно у подножья подветренного склона, при южаке усиление происходит несколько дальше от подножья. Также разная у этих ветров и высота критического уровня – уровня обращения ветра с высотой. Для боры она составляет 600 гПа, для южака 300 гПа, однако было обнаружено, что критический уровень может и вовсе отсутствовать, как при боре, так и при южаке, но отсутствие этого уровня больше характерно для певекского южака.

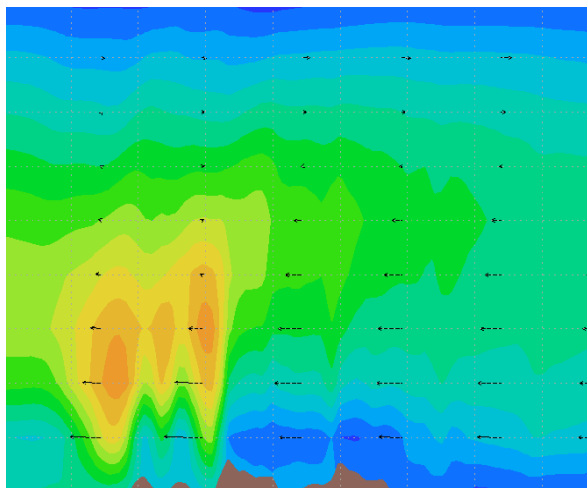


Рисунок 5.103 – Профиль температуры воздуха в момент кульминации боры в Новороссийске

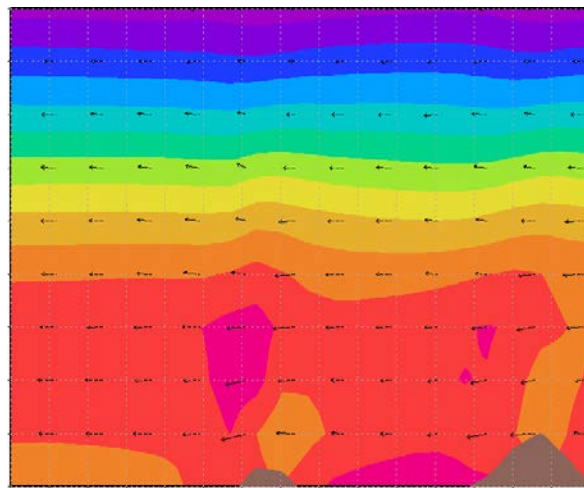


Рисунок 5.104 – Профиль температуры воздуха в момент кульминации южака в Певеке

Сильные отличия были выявлены при анализе профиля температуры воздуха. Во время кульминации боры почти всегда над подветренной стороной хребта наблюдается мощная и интенсивная инверсия температуры, в то время как при максимальных порывах при южаке инверсия слабо выражена.

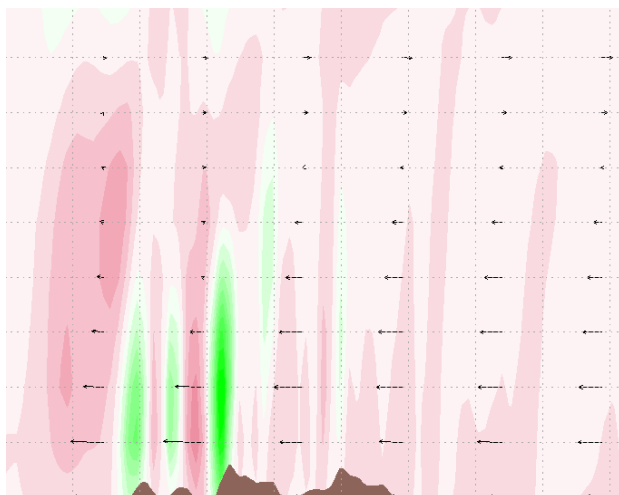


Рисунок 5.105 – Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации боры в Новороссийске

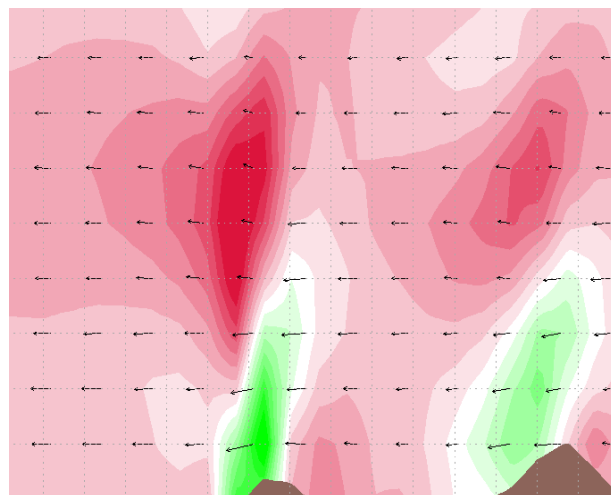


Рисунок 5.106 – Профиль вертикальной компоненты скорости ветра в момент кульминации южака в Певеке

Профили вертикальной компоненты скорости ветра очень похожи в ситуациях боры и южака – на наветренных сторонах хребта всегда присутствует восходящий поток, на подветренных нисходящий поток. Это соответствует сильным положительным и отрицательным значениям этого параметра.

Сравнивая различные метеорологические величины, полученные с помощью модели WRF-ARW для случаев боры в Новороссийске и южака в Певеке, были обнаружены как схожие черты, так и отличные. Однако на основании общих сходств и боры в Новороссийске и южака в Певеке можно сказать, они оба относятся к бороподобным ветрам и к такому типу явлений как подветренные бури.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Иметь возможность создать модель какого-либо предмета, явления или процесса – очень важное и крайне полезное действие. Сейчас математическое моделирование применяется во многих сферах человеческой деятельности. От моделирования поведения людей в различных ситуациях до моделирования атома. В метеорологию математическое моделирование пришло в 50-ых годах XX века, что было связано с развитием вычислительной математики и эволюцией электронно-вычислительной техники. Сейчас вся метеорология неразрывно связана с математическим моделированием, так как именно сложные математические расчеты позволяют давать наиболее благоприятный и заблаговременный прогноз погоды.

Данная работа посвящена мезомасштабному метеорологическому явлению – бора. Бора – это сильный порывистый ветер, способный наносить огромный экономический ущерб и даже приводить к человеческим жертвам. Из чего ясно, что точный и заблаговременный прогноз этого явления очень важен. Возможны разные подходы к прогнозу этого явления, однако самым эффективным является гидродинамический прогноз с помощью модели погоды. В данной работе использовалась модель WRF-ARW с тремя вложенными сетками, заблаговременность каждого прогноза была 24 часа. Эту модель можно использовать для прогноза погоды или какого-либо явления, а также для научного исследования, так как результаты моделирования позволяют увидеть более полную картину пространственного распределения метеорологических величин.

Бора наблюдается во многих регионах мира, в данной работе были исследованы (промоделированы, визуализированы и проанализированы) поля метеорологических величин для боры в Новороссийске и южака (боры)

в Певеке. Подробно были проанализированы пять случаев для каждого города, в работе представлены результаты моделирования для трёх случаев.

С помощью модели WRF-ARW и визуализатора данных GrADS в работе представлены смоделированные поля скорости ветра и температуры воздуха для трех сеток с разным пространственным разрешением, а также построены профили скорости ветра, температуры воздуха и вертикальной компоненты скорости ветра.

Проанализировав данные, сначала всех случаев боры в Новороссийске, было выявлено, что модель данной конфигурации в этом районе довольно хорошо воспроизводит столь тонкую пространственную структуру боры. Модель верно моделирует горизонтальный и вертикальный масштаб явления, что видно на визуализированных рисунках пространственной структуры и построенных профилях метеорологических величин. Модель правильно воспроизводит усиление потока ветра на подветренной стороне Маркотхского хребта и в это же время сильное падение температуры в самом городе Новороссийск. Всё это характерно для боры на черноморском побережье. Те же метеорологические величины были проанализированы для южака в Певеке. Певекский южака модель данной конфигурации также воспроизвела довольно точно. На подветренной стороне отмечается усиление потока, а на наветренной его блокирование. В отличие от боры в Новороссийске в Певеке при действии южака происходит увеличение температуры воздуха. А также было выявлено, что во время певекского южака сильной и выраженной инверсии температуры нет, в отличие от боры в Новороссийске. А это в свою очередь не согласуется с гидравлической теорией развития боры, но не противоречит волновой. Однако в данной работе не было цели, определить к какой гипотезе относятся эти ветра.

Несмотря на то, что метеорология шагнула далеко вперед в изучении и прогнозировании явлений, всё же остаются пробелы, которые еще только должны будут решить ученые. Бора это явление, которое было обнаружено

очень давно и во многих регионах мира. Однако единственно верной теории возникновения этого явления до сих пор не выявлено.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Борзенкова А., Бычкова В., Корнева И. Экспедиционные исследования новороссийской боры 2008-9 с.
2. Бурман Э.А. Местные ветры – Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. – 341 с.
3. Вельтищев Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 136 с.
4. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы /М., Географический факультет МГУ, 2006, 126 с.
5. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM Гидрометцентр России 2010 – 42 с.
6. Воронцов П.А. Аэрологические исследования пограничного слоя атмосферы. Гидрометеиздат, Л., 1960.
7. Врангель Ф. Ф. Новороссийская бора и ее теория / [Соч.] Кап.-лейт. бар. Ф. Врангеля. - Николаев : тип. Ю.Г. Рено, 1876. - [2], 17 с.
8. Гандин Л.С., Лайхтман Д.Л., Матвеев Л.Т., Основы динамической метеорологии Л.: Гидрометеорологическое изд., 1955- 647 с.
9. Гутман Л.Н., Франкль Ф.И. Гидродинамическая модель боры // ДАН СССР, 1960, Т. 30, № 5.
10. Ермаков Д. М. Спутниковое радиотепловидение мезомасштабных и синоптических атмосферных процессов. Фрязино 2018.
11. Ефимов В.В. и Барабанов В.С. Моделирование черноморской боры Известия РАН. физика атмосферы и океана, том 49, № 6, с. 688-698 2013 – 10 с.
12. Зимич П. И. Певекский южак / под ред. А.А.Дмитриева, Л.: Гидрометеиздат, 1991, 120 с.
13. Лабоха А.К Сравнительный анализ моделей прогнозирования погоды 2019

14. Лайхтман Д.Л. Динамическая метеорология Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 608 с.
15. Лыкосов В.Н., Глазунов А.В., Кулямин Д.В., Мортиков Е.В., Степаненко В.М. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы Изд., Московский университет 2012
16. Мартынова Ю.В. Зарипов Р.Б., Петров А.П. Технология составления регионального прогноза погоды на основе модели WRF ARW Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (СибНИГМИ), Новосибирск, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН), Томск, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва 2012
17. Новороссийская бора / Под ред. А.М. Гусева // Тр. МГИ АН СССР. 1959. Т. 14. 355
18. Переведенцев Ю.П. Теория общей циркуляции атмосферы: учебное пособие / Ю.П. Переведенцев, И.И. Мохов, А.В. Елисеев и др.; науч. ред. Э.П. Наумов. – Казань: Казан. ун-т, 2013 – 224 с.
19. Ривин Г.С. Современные системы мезомасштабного прогноза погоды: состояние и перспективы Гидрометцентр России, 2010 г.
20. Роджер Г. Барри Погода и климат в горах – Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. – 313 с. Перевод с английского под редакцией проф. А.Х.Хригана
21. Розинкина И.А. Современные технологии численного прогноза погоды и интерпретация их продукции ФГБУ "Гидрометцентр России" Новосибирск, 2014
22. Степаненко С.Н. Конспект лекций по учебному курсу Мезометеорология Часть 1 Общая характеристика, механизмы развития, методы анализа и прогноза мезометеорологических атмосферных систем – Одесса; ОГМИ, 2000 – 92 с.

23. Тверской П.Н. Курс метеорологии Л: Гидрометеиздат, 1962-700 с.
24. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 359. – С. 5–32.
25. Толстых М. А., Фадеев Р. Ю., Гойман Г. С., Шашкин В. В., Глобальная модель прогноза погоды ПЛАВ на системе Cray XC40 6 ноября 2018 МГУ, семинар «Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности»
26. Торопов П. А., Мысленков С. А., Самсонов Т. Е. Численное моделирование новороссийской боры и связанного с ней ветрового волнения // Вестник Московского университета. Серия 5 «География», 2013, Т. 5, с. 38-46.
27. Торопов П.А., Шестакова А.А. Тестирование мезомасштабной модели (wrf) для задачи прогноза новороссийской боры. Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2014;(3):23-29.
28. Торопова М. Л., Использование модели WRF для детализации микроклиматических описаний, Санкт-Петербург 2016
29. Шестакова А.А. Подветренные бури при боре и фёне в различных регионах России: диссер. на соискание звания канд. геогр. наук. Московский государственный университет, Москва, 2017
30. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Физматгиз, М., 1958
31. Wei Wang, Dale Barker, John Bray, Cindy Bruyère, Michael Duda, Jimmy Dudhia. Dave Gill, John Michalakes Weather Research & Forecasting ARW Version 2.2 Modeling System Users Guide 2017
32. William C. Skamarock, Joseph B. Klemp, Jimmy Dudhia, David O.Gill, Dale M. Barker «A Description of the Advanced Research WRF Version 3» Boulder, Colorado, USA 2008

33. John Michalakes, Jimmy Dudhia, Wei Wang, Cindy Bruyere, Michael Duda, Dave Gill, William Skamarock WRF Modeling System “Short” Tutorial

34. Репина И. Атмосферные модели Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН [Электронный ресурс]. URL:
http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa2016/15.pdf

35. Информация о модели WRF-ARW с официального сайта Национального Центра Атмосферных Исследований NCAR – Режим доступа:
<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

36. Информация о модели WRF-ARW с официального сайта Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA – Режим доступа:
https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php

37. Информация о модели GFS с официального сайта Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA – Режим доступа:
https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs/documentation.php

38. Официальный сайт модели WRF – Режим доступа:
<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>

39. Официальный сайт модели COSMO – Режим доступа:
<http://www.cosmo-model.org/>

40. Официальный сайт модели Hirlam – Режим доступа:
<http://hirlam.org/>

41. Описание файла manelist.input для модели WRF – Режим доступа:
https://www.esrl.noaa.gov/gsd/wrfportal/namelist_input_options.html

42. Описание новороссийской боры с сайта GisMeteo – Режим доступа:
[https://www.gismeteo.ru/news/stihiynye-yavleniya/firmennyy-
chernomorskiy-uragan-v-novorossiyske/](https://www.gismeteo.ru/news/stihiynye-yavleniya/firmennyy-chernomorskiy-uragan-v-novorossiyske/)

43. Статья о модели WRF-ARW – Режим доступа:
<https://habr.com/ru/post/117140/>
44. Статья об истории прогноза погоды – Режим доступа:
<https://habr.com/ru/post/179687/>
45. Географическая карта [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/maps/geo/pevek/53064308/?l=sat&ll=170.502051%2C69.630765&utm_source=main_stripe_big&z=9
46. Информация о Певеке – Режим доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D0%B2%D0%B5%D0%BA>
47. Синоптические ситуации для Новороссийска – Режим доступа:
<https://www.wetterzentrale.de>
48. Информация о боре в Новороссийске – Режим доступа:
<https://gazetanovoros.ru/zavtra-v-novorossijske-zaduet-nord-ost-ozhidajutsja-poryvy-do-23-metrov-v-sekundu/>