



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Штормовые циклоны в Черном море»

Исполнитель Грициенко Станислав Васильевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Лаврова Ирина Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 03 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Оглавление

Введение	3
1. Общая информация о штормовых циклонах	5
1.1 Классификация штормовых циклонов	5
1.2. Внетропический крупномасштабный циклогенез	8
2. Анализ особенностей штормовых циклонов Причерноморья.....	11
2.1 Исходные данные	11
2.2 Анализ штормовых циклонов над акваторией Черного моря.....	13
2.3 Анализ ветрового режима Черноморского побережья.....	18
3. Анализ штормового Балканского циклона за 26.11.2023 г.....	28
3.1 Траектория прохождения циклона	28
3.2 Параметр динамической (бароклинной) неустойчивости.....	32
3.3 Показатель спиралевидности.....	34
3.4 Параметр кинетической энергии в средней тропосфере.....	36
Заключение	40
Список литературы	42
Приложение 1. Розы ветров за зимний период.....	46
Приложение 2. Розы ветров за весенний период.....	49
Приложение 3. Розы ветров за летний период.	51
Приложение 4. Розы ветров за осенний период.	53
Приложение 5. Повторяемость ветра по градациям скорости.....	56

Введение

Штормовые циклоны, формирующиеся в акватории Черного моря, представляют собой крайне важное явление, оказывающее существенное влияние на климатические условия региона и безопасность судоходства. Данная дипломная работа посвящена полному анализу штормовых циклонов акватории Черного моря.

В работе рассмотрены особенности зарождения, развития и характер ветрового режима этих циклонов, опираясь на данные, полученные с гидрометеорологических станций. Исследование включает в себя комплексный подход к изучению различных характеристик циклонов, что позволяет получить более полное представление о процессах, происходящих в атмосфере над Черным морем.

Целью данной работы является исследование штормовых циклонов над акваторией Черного моря. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Сформировать массив данных по береговым гидрометеорологическим станциям в районе Черного моря.
- 2) Проанализировать ветровой режим Черноморского побережья, учитывая скорость и направление ветра по сезонам.
- 3) Изучить особенности штормовых циклонов Причерноморья.
- 4) Рассмотреть синоптические ситуации штормовых циклонов на примере южного циклона в ноябре 2023 года.

Результаты данного исследования в теории могут помочь нам не только в понимании циклогенеза штормовых циклонов Черного моря, но и в разработке методов прогноза, их развития и возможного воздействия на прибрежные регионы.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и 5 приложений. В первой главе описана общая информация о штормовых циклонах: их классификация, виды и общий процесс циклогенеза. Во второй главе описан штормовой циклогенез, характерный для Черного моря. В третьей главе был проанализирован ветровой режим Черноморского побережья. В четвертой главе рассчитаны характеристики активности циклогенеза, параметры спиралевидности, бароклинной неустойчивости и показатель кинетической энергии для южного циклона в ноябре 2023 г.

1. Общая информация о штормовых циклонах

1.1 Классификация штормовых циклонов

Прогнозирование и анализ штормовых циклонов является очень важной и актуальной проблемой для синоптиков. Ведь со штормовыми циклонами связано большое количество опасных явлений погоды, будь то штормовые ветры, наводнения и т.п. В частности, работа портовых служб и морская отрасль в целом зависят от данных по скорости ветра.

Существуют сведения, что атмосферная циркуляция обладает значительной изменчивостью во времени и пространстве. Образование внетропических циклонов, то есть вихрей большой протяженности - является собой процесс перехода относительно стабильного состояния зонального потока к состоянию неустойчивости. Именно поэтому оценка роли циклонов в глобальной атмосферной циркуляции сводится к общей проблеме взаимодействия средних и вихревых движений. Энергетика средних движений может модифицироваться в том числе и самими циклонами. Штормовые циклоны средних широт часто вызывают опасные погодные явления - сильные ветры, наводнения и тому подобные явления. Исследователи отмечают значительные изменения в характеристиках жизненного цикла циклонов, таких как продолжительность жизни, скорость углубления, скорость перемещения и другие [13,14]. Особенно это относится к штормовым или катастрофическим циклонам. Штормовым циклоном считается циклон, в котором скорость ветра достигает или превышает 15 м/с [30]. Классификация океанологов говорит, что ветер со скоростью 12 м/с уже считается опасным. Такие штормы учитываются для удовлетворения потребностей морских отраслей, так как при скорости ветра 12 м/с вводятся ограничения на деятельность портов [32]. Продолжительность штормового ветра также учитывается. При скорости ветра 15 м/с шторм фиксируется даже при наблюдении в течение одного срока. Потребители прогностической информации, включая руководителей портовых служб, должны принимать

защитные меры уже при усилении ветра до 8 м/с, учитывая при этом географическое положение порта и другие факторы.

Циклоны, вызывающие штормы, могут быть классифицированы следующим образом:

1) Глубокие циклоны - циклоны, давление в центре которых ниже 980 гПа. На синоптической карте такой циклон окружен большим количеством изобар и напоминает "мишень". Вблизи центра дуют сильные или штормовые ветры.

2) Циклоны, углубляющиеся над морем.

3) Циклоны с несколькими фронтами. Обычно во фронтальной зоне за счет разницы температур образуются сильные ветры, и вовлечение холодного воздуха в циклон может привести к его углублению. Циклонические образования при сильных штормах характеризуются большой интенсивностью циркуляции, а поля в целом - большими градиентами. Часто штормы вызываются быстро движущимися циклонами (со скоростью более 50 км/ч). Во многих случаях это связано с процессами блокирования стабильными антициклонами. В результате блокирования обширная зона опасных ветров может существовать от нескольких суток до нескольких недель.

При прогнозировании штормовых циклонов важно учитывать изменения в их перемещении. В последние годы было замечено увеличение циклонов, перемещающихся по сложным траекториям, что затрудняет их прогнозирование. Наблюдается также увеличение так называемых "однодневков" или "мезоциклонов", развивающихся стремительно. Эти циклоны, которые не связаны с основными фронтальными системами, могут образовываться в Арктике над свободными ото льда морскими поверхностями зимой [32].

Штормовые ветры часто формируются в зоне действия полярных циклонов. Основные районы распространения полярных циклонов (ПЦ) в Северном полушарии - море Бофорта, Норвежское, Баренцево и Гренландское моря. ПЦ сложно обнаружить на синоптической карте, но в то же самое время они довольно отчетливо видны в поле облачности на спутниковых снимках. Отличительной особенностью ПЦ является очень быстрое падение давления в центре, наличие "глаза" и теплого ядра. В этом проявляется их определенное сходство с тропическими циклонами. Быстро перемещающиеся и углубляющиеся мезоциклоны чаще всего могут вызывать сильные штормовые ветры. Типовые траектории фронтальных штормовых циклонов определяются географическим положением и активностью высотной фронтальной зоны (ВФЗ). Эволюционное развитие ВФЗ дает основание выделить пять типов движущихся и один тип стационарных циклонов, вызывающих штормовые ветры. Это:

- 1) ныряющие циклоны;
- 2) северо-западные циклоны;
- 3) западные циклоны;
- 4) юго-западные циклоны;
- 5) южные циклоны;
- 6) стационарные циклоны.

В подавляющем большинстве случаев возникновения опасных штормов в районе исследования связано с циклонами, в циркуляцию которых вовлечены по отдельности и полярный, и арктический атмосферные фронты. При этом на относительно небольшом пространстве сближаются воздушные массы. Также можно обратить внимание и на то, что штормовые ветры при ныряющих циклонах в 100% случаев наблюдаются при меридиональной форме циркуляции.

Особенно опасными являются северо-норвежские ныряющие циклоны с внезапно возникающими штормовыми ветрами. Скорость этих циклонов в среднем составляет 70–80 км/ч, достигая иногда 100 км/ч конкретно на участке интенсивного углубления. При северо-западных циклонах штормовые ветра отмечаются при меридиональной форме циркуляции. Западные, юго-западные и южные циклоны связаны в основном с западной и восточной формами циркуляции. Штормы при стационарных циклонах наблюдаются при всех трех формах циркуляции, но чаще при восточной форме. Также стоит обратить внимание на то, что в настоящее время отмечается значительное увеличение количества циклонов, смещающихся по траекториям с преобладающей меридиональной составляющей, что в свою очередь косвенно подтверждает и увеличение штормовых циклонов. Такое увеличение составляет от 7 до 21 % в зависимости от района и сезона года [31,32]. Штормовые циклоны можно еще типизировать и по следующим характеристикам:

- а) координаты появления (выхода) в район формирования;
- б) направление и скорость перемещения;
- в) экстремальное давление в центре циклона;
- г) осредненный барический градиент.
- д) максимальные скорости ветра.

Но в свою очередь только по одному лишь признаку (место его появления или формирования) разделить циклоны на потенциально опасные (в плане генерации штормовых ветров) весьма сложно. Для более надежной типизации следует учитывать и другие характеристики. Штормовые циклоны имеют довольно-таки определенную структуру термобарического поля. Во всех перечисленных циклонах штормовые ветры отмечаются, по большей части, при адвекции холода в нижнем 5-километровом слое.

1.2. Внетропический крупномасштабный циклогенез

Внетропический крупномасштабный циклогенез происходит на атмосферных фронтах. Его формирование начинается с фронтальной волны под высотным фронтальным поясом (волной Россби). Фронтальные волны делятся на устойчивые, не превращающиеся в циклоны, и неустойчивые, приводящие к появлению циклонов. Если циклон формируется в течение $\Delta t < 12$ часов, то его образование называют "взрывным" циклогенезом. Несмотря на то, что результатом этого процесса является циклон синоптического масштаба, сам процесс относится к мезомасштабным из-за довольно короткого количества времени, в течение которого он происходит ($\Delta t = 10-4$ секунды).

Основными условиями, влияющими на скорость циклогенеза, являются:

- а) динамическая (бароклинная) неустойчивость;
- б) спиралевидность атмосферных движений;
- в) адвекция воздушной массы.

Динамическая неустойчивость атмосферы является одним из необходимых условий возникновения возмущений синоптического масштаба. Иницируя процесс крупномасштабного циклогенеза, динамическая неустойчивость косвенно влияет на формирование малых возмущений, так как циклоническая циркуляция способствует разрешению статической неустойчивости.

Циклогенез охватывает практически всю тропосферу. Поэтому важно учитывать бароклинность её наиболее активной части тропосферы, то есть в слое от 850 до 300 гПа.

Спиралевидность атмосферных движений – мера наклона оси вихря по отношению к вектору скорости течения воздуха, которая вычисляется в виде ее суммарного значения для слоев 700–850, 500–700 и 300–500 гПа и относят ее к среднему значению спиралевидности при циклогенезе, которое в средних и высоких широтах приблизительно равно 0,00113 м/с.

Стоит также заметить, что при циклогенезе спиралевидность движений не равна нулю. Но все же реальные значения могут быть как положительными,

так и отрицательными. Интенсивный процесс циклогенеза происходит при положительных значениях параметра спиралевидности.

Адвективные изменения температуры в вышеупомянутых слоях атмосферы рассчитывались по широко известным формулам.

2. Анализ особенностей штормовых циклонов Причерноморья

2.1 Исходные данные

Для того, чтобы начинать анализ штормовых циклонов, проявивших свою активность в Черноморском бассейне, нам необходимо было сформировать массив данных. Для этого использовались данные с сайта NOAA. Брались по 15 станций, которые были примерно равно распределены по всему побережью Черноморского бассейна.

1. Сочи (наблюдения с 01.01.1959 г.)
2. Анапа (наблюдения с 01.01.1959 г.)
3. Феодосия (наблюдения с 03.01.1932 г.)
4. Ялта (наблюдения с 02.01.1948 г.)
5. Севастополь (наблюдения с 01.01.1932 г.)
6. Одесса (наблюдения с 01.01.1932 г.)
7. Гура Портитеи (наблюдения с 01.01. 1964 г.)
8. Констанца (наблюдения с 01.01.1936 г.)
9. Бургас (наблюдения с 01.01.1953 г.)
10. Зонгудлак (наблюдения 03.07.1957 г.)
11. Инеболу (наблюдения с 01.01.1973 г.)
12. Самсун (наблюдения с 01.01.1973 г.)
13. Орду (наблюдения с 19.11.2003 г.)
14. Трабзон (наблюдения с 01.01.1951 г.)
15. Батуми (наблюдения с 01.01.1932 г.)

Их расположение показано на рисунке 1.



Рисунок 1. Расположение станций на побережье Черного моря

Основной параметр, который использовался для анализа ветрового режима и выявления штормовых циклонов – это средняя скорость ветра на данных станциях. В итоге после получения данных со станций, в первую очередь интересующих нас штормовых ветров, мы могли с помощью дат, когда они наблюдались и где именно, по картам реанализа проследить циклоническую активность в регионе, а также сравнить общий ветровой режим с режимом штормовых ветров.

Штормовые ветра наблюдаются при штормовой циклонической активности в регионе. Таким образом мы и будем вычислять рассматриваемые нами штормовые циклоны, то есть циклоны, повлекшие за собой ветра, скорость которых превышала или была равна 15 м/с.

2.2 Анализ штормовых циклонов над акваторией Черного моря

По полученным данным отобраны случаи, когда на гидрометеорологических станциях фиксировались ветры со скоростью 15 м/с и более. Далее с помощью карт реанализа сайта Wettentrale проанализированы циклоны, при которых такие скорости ветра наблюдались. Всего было рассмотрено 30 циклонов.

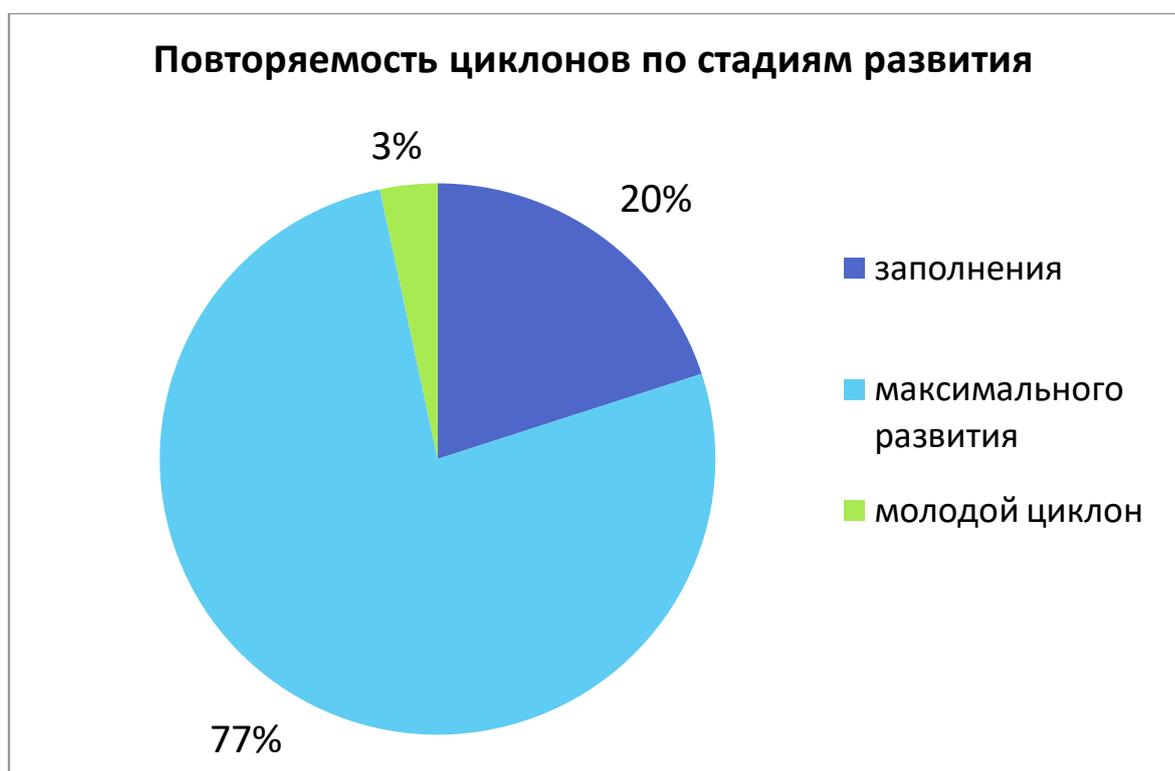


Рисунок 2. Повторяемость циклонов по стадиям развития

Исходя из информации с рисунка 2, можно сделать вывод о том, что по большей части штормовые ветра наблюдались в стадии максимального развития циклонов. Их число составило 23 случая и 77% от общего числа. В 20% случаев циклоны проявляли штормовую активность в стадии заполнения, их число составило всего 6 случаев от общего числа. И лишь в 3% наблюдалась стадия развития молодого циклона, это был один из анализируемых циклонов эпизод. В целом подобное распределение не говорит о каких-либо

существенных аномалиях, характерных исключительно для Черноморской акватории. Такое же распределение вполне логично и обоснованно, и, вероятно, будет наблюдаться не только в акватории Черноморья.

Вторая характеристика, которая была проанализирована у рассмотренных штормовых циклонов, была повторяемость циклонов по их траекториям.

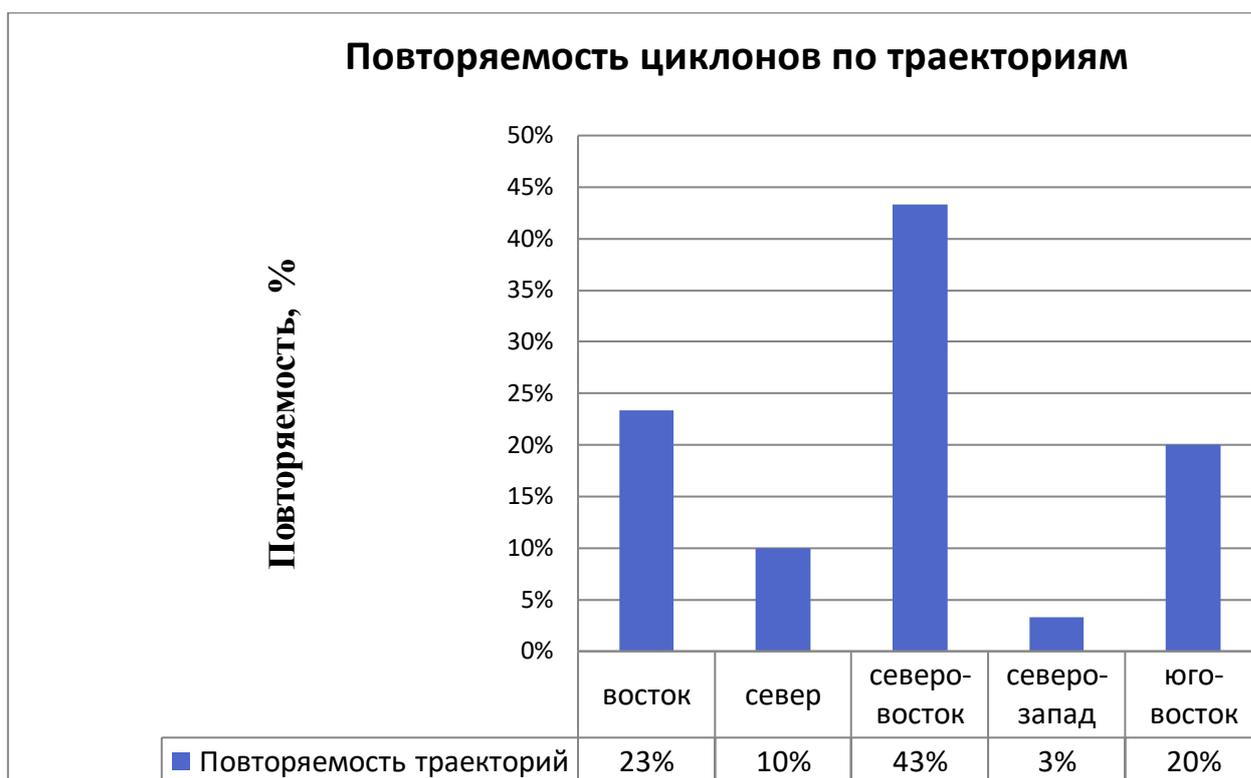


Рисунок 3. Повторяемость циклонов по траекториям

Как видно из представленной диаграммы, по большей части преобладающими направлениями прохождения циклонов стали циклоны северо-восточного направления, так называемые южные циклоны. Их количество составило 13 штук от общего числа и 43% от общего процентного соотношения. Подобные циклоны зарождались, как правило, в акваториях Средиземного и Эгейского морей, у берегов Италии и Балканского полуострова.

На втором месте расположились циклоны восточного направления, так называемые западные циклоны. Их количество составило 7 случаев от общего числа и 23% от общего процентного соотношения. Подобные циклоны зарождались, как правило, также в Средиземноморском бассейне, однако, имели восточное направление. Также их зарождение происходило непосредственно и в акватории Черноморского бассейна, такой случай был один. Такие циклоны называются местными.

Далее расположились циклоны юго-восточного направления, так называемые северные циклоны. Их количество составило 6 случаев от общего числа и 20% от общего процентного соотношения. Подобные циклоны зарождались, как правило, в акватории Атлантического океана, а также в акваториях Норвежского и Гренландского морей.

На четвертом месте расположились циклоны северного направления, это также южные циклоны. Их количество составило 3 случая от общего числа и 10% от общего процентного соотношения. Подобные циклоны зарождались, как правило, либо над территорией Турции, либо непосредственно в самой акватории Черного моря.

И наконец меньше всего отмечено циклонов северо-западного направления. Их количество составил всего 1 случай от общего числа и 3% от общего процентного соотношения. Этот циклон зародился над территорией Турции и что характерно находился в стадии заполнения в момент, когда у него были зафиксированы штормовые скорости ветра.

Третьей характеристикой из анализируемых нами циклонов являлся анализ повторяемости по максимальным скоростям ветра, зафиксированным на станциях.

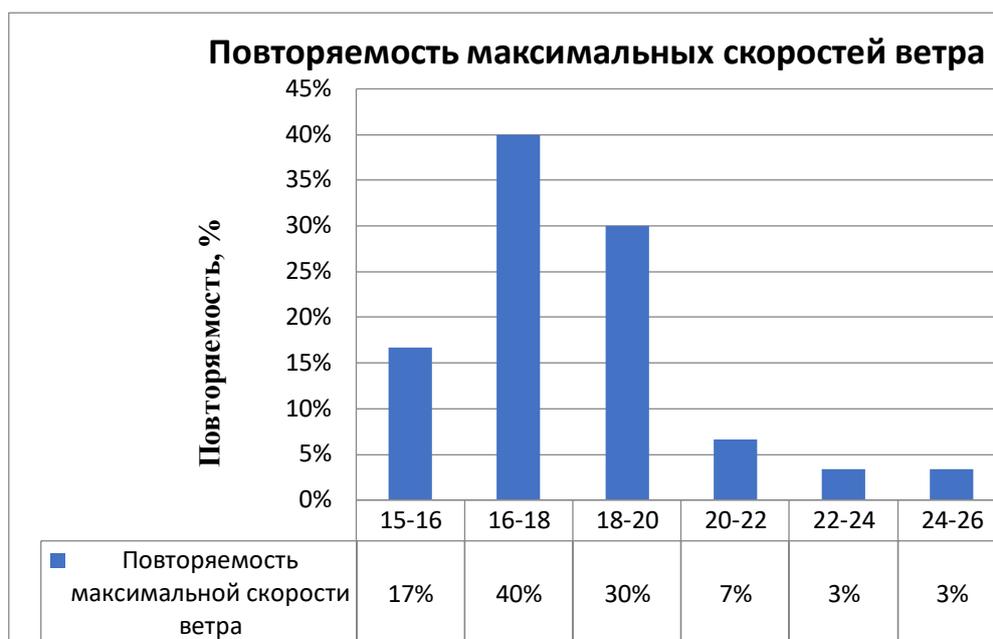


Рисунок 4. Повторяемость циклонов по максимальным скоростям ветра

Исходя из рисунка 4, можно сделать вывод о том, наиболее часто над рассматриваемой акваторией штормовые циклоны приводят к усилению ветра до 16-18 м/с. Количество таких случаев насчитывает 12 и что составляет 40% от общего количества.

В 30% случаев отмечались ветры 18-20 м/с. Количество таких случаев насчитывает 9.

Далее идет градация 15-16 м/с. Количество таких случаев насчитывает 5 и 17% от общего процентного соотношения.

20-22 м/с наблюдались у двух циклонов и в 7% от общего процентного соотношения.

В конце расположились две градации 22-24 м/с и 24-26 м/с. В их случае количество таких событий насчитывало всего по одному разу и по 3% от общего процентного соотношения.

Далее для того, чтобы проанализировать насколько штормовые циклоны были глубокими, был применен анализ по минимальному давлению в центре каждого из них.

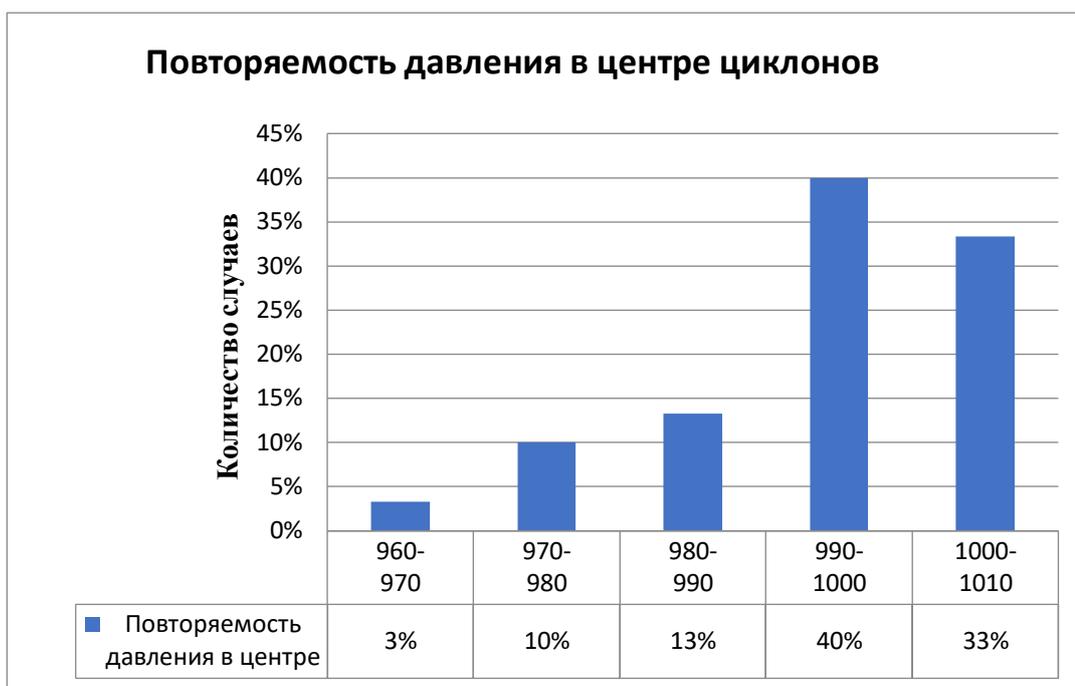


Рисунок 5. Повторяемость циклонов по давлению в центре

Исходя из графика 5, можно сделать вывод о том, что в большинстве случаев циклоны не являлись глубокими. 12 случаев и в 40% от общего количества наблюдалась градация давления 990-1000 гПа. Далее можно увидеть, что в 33% случаев от общего процентного соотношения наблюдалось давление 1000-1010 гПа. Число таких событий составило 10 раз. И замыкает данный список градация 980-990 гПа. Количество подобных циклонов составило 4 и 13% от общего количества случаев. Таким образом, в 86% случаев циклоны все же не являлись глубокими, а имели довольно большое значение давления в центре.

В остальном же случае циклоны были глубокими. Их количество составило 13% от общего процентного соотношения. Лидером среди них является градация с давлением в центре 970-980 гПа. Количество подобных случаев составило 3 и 10% от общего количества случаев. Замыкает категорию глубоких циклонов градация с давлением в центре составляющим 960-970 гПа.

Самое низкое давление наблюдалось в циклоне 22.11.2008 г. Циклон сформировался над акваторией Норвежского моря и двигался на юго-восток. В сроки, когда наблюдались на станциях штормовые ветры циклон находился

в стадии максимального развития с давлением в центре 965 гПа.

2.3 Анализ ветрового режима Черноморского побережья

Далее был произведен анализ ветрового режима Черноморского побережья: построены графики по средней скорости ветра, построены розы ветров по сезонам на каждой станции.

Первое, что было проанализировано – это общий ветровой режим. То есть анализировалась средняя скорость ветра на станциях.

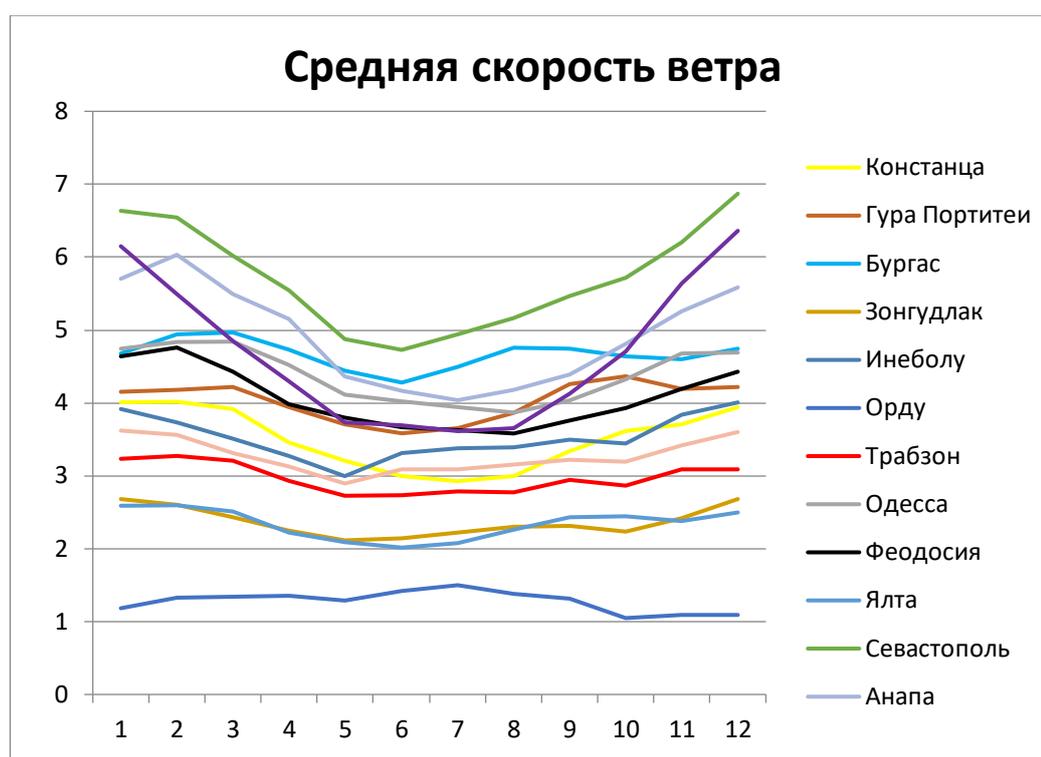


Рисунок 6. Средняя скорость ветра на станциях

Из рисунка 6 видно, что средняя скорость ветра наибольшая наблюдалась в зимний период, практически для всех станций за исключением лишь одной – Орду (ее максимум пришелся на летний период). В летний же период скорости ветра оказались минимальными. Осенью скорость ветра начинала увеличиваться.

Станцией с наибольшей скоростью ветра оказался Севастополь. Здесь ветра в зимний период года достигали более 6 м/с. В летний период они падали 5 м/с.

Вслед за Севастополем идут такие станции как Анапа, Бургас и Батуми. Их скорости ветра оказались меньше, чем в Севастополе, однако, в зимний период времени они были практически равны 6 м/с.

На последнем месте расположилась станция Орду. Здесь наблюдался практически ровный ход скорости ветра в пределах 1-2 м/с.

Второй анализируемой характеристикой являлось направление ветра. Для этого мы построили для каждой станции розы ветров отдельно для штормовых ветров и розы, характеризующие ветровой режим в целом, характерные для каждого сезона года. Их форму можно наблюдать в приложении 1.

В зимний период времени для западного побережья Черного моря (на таких станциях как Констанца, Гура Портитеи, Бургас) можно наблюдать, что общий ветровой режим к ветрам западных направлений. Штормовые ветра в свою очередь характеризовались по большей части северными направлениями.

Турецкие станции же в свою очередь показали различные друг от друга направления ветра. Для Зонгудлака общий ветровой режим сводился к ветрам южных направлений, а штормовые ветра в нем в основном показали юго-западное направление. В Инеболу общий ветровой режим был довольно схож с Зонгудлаком, однако, штормовые ветра в нем характеризовались западным направлением движения. В Самсуне ветра дули по большей части в направлении юго-запада. А в Трабзоне общий ветровой режим свелся к ветрам западных направлений в 66%.

В Одессе преобладали ветра северных направлений, штормовые ветра также по большей части дули с юга в 33% случаев, однако, и на восток тоже в 22% случаев.

В Севастополе преобладающими ветрами оказались ветра южных (в 24% случаев для общего ветрового режима и в 30% случаев для штормовых ветров)

и северных направлений (в 24% случаев для общего ветрового режима и в 23% случаев для штормовых ветров).

В Ялте ветровой режим характеризовался ветрами преимущественно западных направлений. В 24% случаев для общего ветрового режима и в 40% случаев для штормовых ветров.

В Феодосии общий ветровой режим обуславливался ветрами северо-западных направлений в 29% случаев, а штормовые ветра были по большей части юго-западных направлений также в 29% случаев.

На восточном побережье Черного моря общий ветровой режим сводился к ветрам восточных и юго-восточных направлений. А штормовые ветра дули с севера и северо-запада.

Построенные розы ветров за весенний период года можно наблюдать в приложении 2.

Для весеннего периода времени для западного побережья Черного моря (на таких станциях как Констанца, Гура Портитеи, Бургас) можно наблюдать, что общий ветровой режим сводился к ветрам северо-западных направлений, однако, для Бургаса также помимо этого еще и ветров восточных направлений. Штормовые ветра на данных станциях дули по большей части с юга, для Бургаса это были еще и ветра восточных направлений (в 25% случаев), что можно объяснить орографией данной станции, из-за того, что она находится в Бургасском заливе Черного моря.

Для Турецких станций направление ветра разнилось для каждой станции по отдельности. В Зонгудлаке преобладающим ветровым режимом стали ветра северных (в 20% случаев) и западных направлений (в 20% случаев). Штормовые же ветра были северо-западных (в 20% случаев), восточных (в 20% случаев) и южных направлений (в 30% случаев).

Для Инеболу общий ветровой режим был обусловлен южными (в 24% случаев) и западными ветрами (в 27% случаев). Штормовые же ветра в нем имели преимущественно западное направление (в 88% случаев).

В Самсуне общий ветровой режим обуславливался ветрами северо-восточных направлений (в 37% случаев). А штормовые ветра имели юго-западное направление (в 82% случаев).

В Трабзоне же в свою очередь общий ветровой режим обуславливался ветрами восточных направлений (в 27% случаев). А штормовые ветра имели ярко выраженное западное направление (в 65% случаев).

В Одессе общий ветровой режим по большей части характеризовался ветрами южных направлений (в 23% случаев). Штормовые же ветра имели преимущественно также южное (в 21% случаев), но и восточное направления (в 20% случаев).

Для станций, находящихся на Крымском полуострове ветровой режим также был довольно неоднороден. Для Севастополя преобладающими направлениями ветра стали ветра южного направления (в 29% случаев), в том числе и штормовые (в 40% случаев). Для Ялты ветра обуславливались большей частью восточными направлениями (в 21% случаев для общего ветрового режима и в 51% случаев для штормовых ветров). А для Феодосии общий ветровой режим в основном характеризовался ветрами западных направлений (в 21% случаев). Штормовые ветра же были в основном северо-восточных (в 31% случаев) и юго-западных направлений (в 22% случаев).

В восточной части бассейна Черного моря (на таких станциях как Анапа, Сочи, Батуми) ветра характеризовались в основном восточным направлением, однако для Батуми, как видно из графиков, также можно говорить и о преобладающих юго-западных направлениях ветра (в 35% случаев).

В летний период года направления розы ветров показали наибольшее отклонение по сравнению с остальными периодами года. Их форму можно наблюдать в приложении 3.

В Констанце ветровой режим характеризовался по большей части ветрами северных направлений (в 18% случаев). Штормовые ветра, наоборот, дули в основном с юго-запада (в 21% случаев) и востока (в 18% случаев).

В Гура Портитеи общий ветровой режим обуславливали ветра западных направлений (в 32% случаев), а штормовые ветра имели в основном северное направление (в 24% случаев).

В Бургасе ветра дули в основном с западного направления (в 27% случаев), а штормовые ветра в нем характеризовались в основном северо-восточным направлением (в 48% случаев).

В Зонгудлаке ветра дули в основном с южного направления (в 27% случаев), а штормовые ветра в направлении востока (в 33% случаев) и запада (в 33% случаев).

В Инеболу преобладающими ветрами стали южные (в 30% случаев), а в свою очередь штормовые ветра преобладали в направлении запада (в 86% случаев).

В Трабзоне общий ветровой режим свелся к ветрам южных направлений (в 20% случаев), также как и штормовые ветра (в 50% случаев).

В Одессе общий ветровой режим обуславливался ветрами южных (в 25% случаев) и северных направлений (в 18% случаев), а штормовые ветра дули в основном с южного направления (в 38% случаев).

В Феодосии общий ветровой режим сводился к ветрам западных направлений (в 28% случаев), также как и штормовые ветра (в 22% случаев).

В Ялте общий ветровой режим обуславливался по большей части ветрами западных направлений (в 24% случаев), а штормовые ветра

характеризовались по большей части ветрами северо-западных (в 25% случаев) и северо-восточных направлений (в 25% случаев).

В Севастополе наблюдались ветра южных направлений (в 22% случаев), штормовые ветра также были большей частью южных направлений (в 40% случаев).

В Анапе преобладающими направлениями стали ветра северо-восточных направлений (в 22% случаев), в то время как у штормовых наблюдались по большей части ветра восточных направлений (в 26% случаев).

В Сочи ветровой режим обуславливался ветрами восточных направлений (в 25% случаев), а штормовые ветра, помимо восточных (в 29% случаев), также характеризовались еще и южными направлениями (в 24% случаев).

В Батуми общий ветровой режим характеризовался ветрами юго-восточных направлений (в 38% случаев), а штормовые ветра в свою очередь характеризовались в основном юго-западным направлением (в 35% случаев).

Розы ветров за осенний период года можно наблюдать в приложении 4.

В Констанце общий ветровой режим характеризовался по большей части ветрами северных направлений (в 21% случаев), также как и штормовые ветра (в 52% случаев).

В Гура Портитеи общий ветровой режим обуславливался ветрами западного направления (в 32% случаев). Штормовые ветра же в свою очередь имели северное (в 27% случаев) и северо-восточные направления (в 29% случаев).

В Бургасе ветра дули в основном с восточного направления (в 20% случаев), а штормовые ветра в нем характеризовались в основном северо-восточным направлением (в 39% случаев).

В Зонгудлаке ветра дули в основном с юга (в 22% случаев), а штормовые ветра дули в основном с южного направления (в 26% случаев).

В Инеболу преобладающими ветрами стали южные (в 45% случаев), а в свою очередь штормовые ветра преобладали в направлении запада (в 77% случаев).

В Трабзоне общий ветровой режим свелся к ветрам южных направлений (в 27% случаев), а штормовые ветра в свою очередь имели западное направление (в 45% случаев).

В Одессе общий ветровой режим обуславливался ветрами северных направлений (в 21% случаев), в том числе и штормовых (в 27% случаев).

В Феодосии общий ветровой режим сводился к ветрам северо-западных направлений (в 24% случаев). Штормовые ветра имели северо-восточное направление (в 43% случаев).

В Ялте общий ветровой режим обуславливался по большей части ветрами западных направлений (в 26% случаев), а штормовые ветра характеризовались по большей части ветрами восточных направлений (в 48% случаев).

В Севастополе наблюдались ветра северных (в 22% случаев) и южных направлений (в 21% случаев), также как и штормовые ветра (в 25% случаев для южного и в 23% случаев для северного направлений).

В Анапе преобладающими направлениями стали ветра восточных направлений (в 25% случаев для общего ветрового режима и в 42% случаев для штормовых ветров).

В Сочи ветровой режим обуславливался ветрами восточных направлений (в 36% случаев для общего ветрового режима и в 50% случаев для штормовых ветров).

В Батуми общий ветровой режим характеризовался ветрами юго-восточных направлений (в 53% случаев для общего ветрового режима и в 47% случаев для штормовых ветров).

Для наилучшего понимания в анализ ветрового режима так же был включен анализ повторяемости ветра по градациям скорости, которые чаще всего наблюдались на той или иной станции и общее количество случаев за каждый месяц, наблюдавшееся за все время наблюдений. Полученные графики можно наблюдать в приложении 5. При их построении использовались середины каждого сезона года (для зимы – январь, для весны – апрель, для лета – июль, для осени – октябрь).

Для Констанцы во все периоды года чаще всего наблюдалась градация в 2-4 м/с (в 41% случаев). Наименьшей оказывались градации в 22-24 м/с и 20-22 м/с (<1% случаев).

Для Гура Портитеи также во все периоды года наблюдалась по большей части градация в 2-4 м/с (в 41% случаев). Наименьшей оказалась 22-24 м/с (<1% случаев).

В Бургасе картина все также не изменилась преобладающей градацией здесь оказалась 2-4 м/с (в 38% случаев). Наименьшей 20-22 м/с (<1% случаев).

В Зонгудлаке по большей части наблюдалась градация 2-4 м/с (в 44% случаев), однако, в весенний период времени наибольшей оказалась градация 1-2 м/с (в 45% случаев). Наименьшими же были скорости ветра свыше 16-18 м/с (<1% случаев).

В Инеболу наибольшими градациями в зимний и осенний период года была градация 2-4 м/с (в 32% случаев), в весенний и летний 1-2 м/с (в 37% случаев весной и в 32% случаев летом). Наименьшими оказались градации свыше 18-20 м/с (<1% случаев).

В Самсуне наибольшей повторяемостью скорости ветра стали градации 2-4 м/с (в 41% случаев). Наименьшие свыше 14-16 м/с (<1% случаев).

В Орду наибольшей градацией, наблюдавшейся за весь период года стала градация в 1-2 м/с (в 80% случаев). А наименьшими из-за довольно слабых по скорости ветров стали градации свыше 8-10 м/с (<1% случаев), их не наблюдалось вовсе.

В Трабзоне наибольшей градацией, наблюдавшейся в течении всего года, была градация 2-4 м/с (в 55% случаев). Наименьшими оказались градации свыше 20-22 м/с (<1% случаев).

В Одессе наибольшей была градация 2-4 м/с (в 36% случаев) в течении любого периода года. Наименьшими были градации свыше 16-18 м/с (<1% случаев).

В Феодосии точно также как и в большинстве случаев во все периоды года наблюдалась градация 2-4 м/с (в 41% случаев). Наименьшими были градации свыше 18-20 м/с (<1% случаев).

В Ялте в зимний и осенний период года по большей части наблюдалась градация в 2-4 м/с (в 42% случаев). В весенний и летний периоды года, наоборот, преобладающей стала градация 1-2 м/с (в 45% случаев в весенний период и в 46% случаев в летний период). Наименьшими же были градации свыше 16-18 м/с (<1% случаев).

В Севастополе наибольшей градация из наблюдавшихся стала градация 2-4 м/с (в 26% случаев). Среди наименьших 20-22 м/с (<1% случаев). Также стоит упомянуть о том, что довольно часто наблюдались градации равные или большие 8-10 м/с (в 28% случаев), что говорит о довольно сильных ветрах, дующих в районе станции.

В Анапе преобладающей градацией в течении 3 сезонов наблюдалась градация 2-4 м/с (в 31% случаев), однако, в летний период года

преобладающей здесь стала градация 4-6 м/с (в 29% случаев). Среди наименьших оказались градации свыше 20-22 м/с (<1% случаев).

В Сочи, как и в большинстве случаев, по большей части, наблюдалась градация 2-4 м/с (в 49% случаев). Наименьшими были градации свыше 12-14 м/с (<1% случаев).

В Батуми в зимний период года больше всего ветра дули со скоростями равными градации 4-6 м/с (в 24% случаев). В остальные времена года их скорость была примерно равна 2-4 м/с (в 39% случаев). Среди наименьших, как и в большинстве случаев до этого, оказались градации ветра свыше 18-20 м/с (<1% случаев).

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что преобладающей градацией, за редким исключением, для большинства станций стала градация скорости ветра 2-4 м/с (в общем случае в 38%). Среди наименьших по праву занимают свое место ветра, скорость которых можно считать штормовой.

3. Анализ штормового Балканского циклона за 26.11.2023 г.

Для того, чтобы как можно лучше понять циклогенез штормовых циклонов, в качестве примера был рассмотрен циклон, который прошел по территории Черноморья 26 ноября 2023 года. Его называли едва ли не мощнейшим из всех тех, что здесь проходили за все время существования наблюдений.

В качестве расчетных характеристик использовались такие характеристики как показатель динамической (бароклинной) неустойчивости, параметр кинетической энергии и спиралевидность. Эти параметры учитываются для более глубокой оценки характеристик анализируемых циклонов.

Для оценки интенсивности циклогенеза, а также для оценки эволюции циклона было произведено исследование численных характеристик рассматриваемого нами циклона за 4 различных срока: в срок, когда данный циклон только перешел в стадию молодого (25.11.2023 г. 15 ч по UTC), когда циклон подходил к акватории Черного моря (26.11.2023 г. 00 ч по UTC), в срок его максимальной активности и наиболее низкого давления в центре (26.11.2023 г. 15 ч по UTC) и срок, когда циклон покинул акваторию Черного моря (27.11.2023 г. 00 ч по UTC) с использованием данных, полученных с помощью приземной карты погоды, а также карт абсолютной барической топографии.

3.1 Траектория прохождения циклона

Для начала была построена траектория движения циклона с обозначением сроков, когда и где циклон наблюдался.

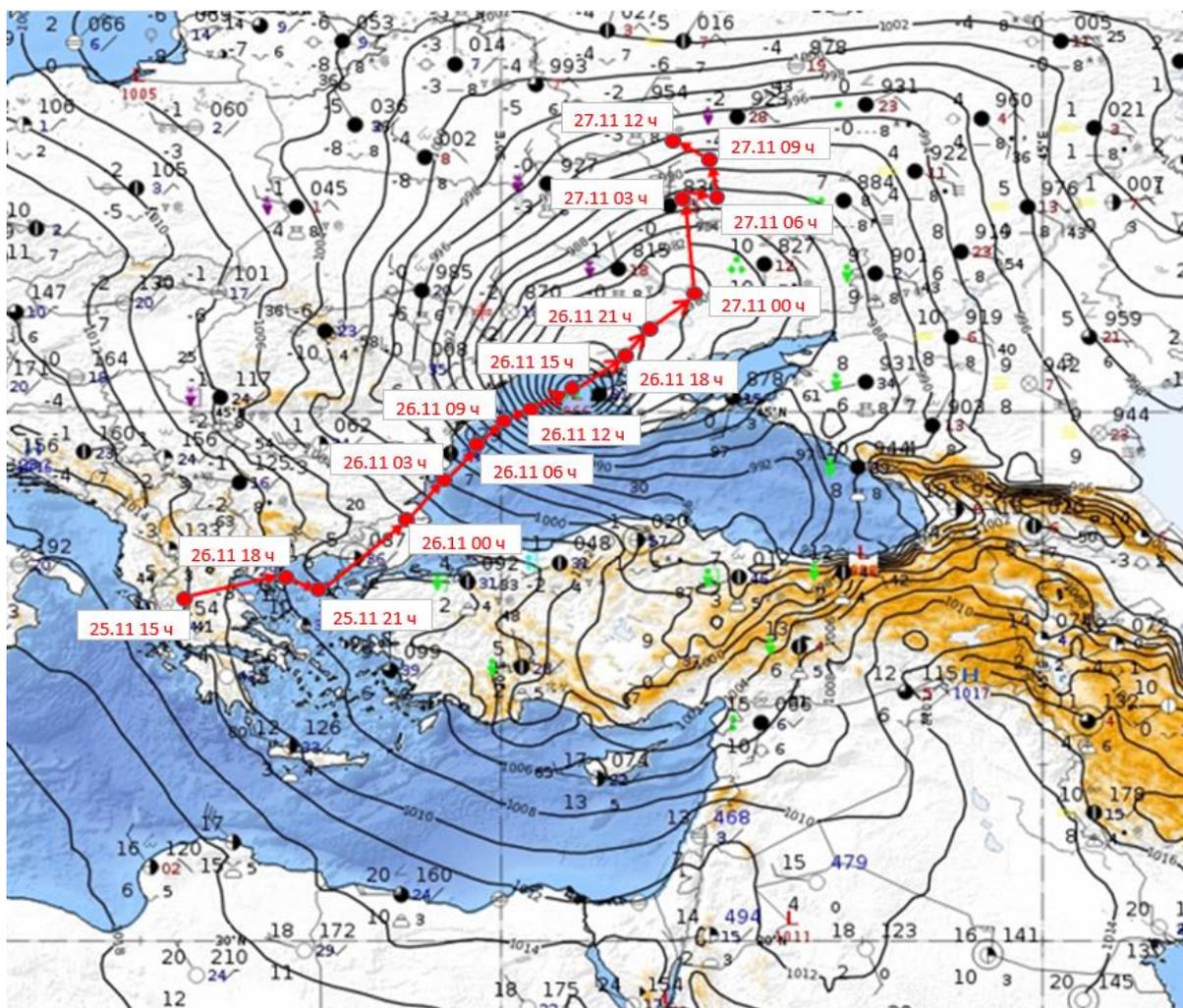


Рисунок 7. Траектория движения циклона

Первая замкнутая изобара циклона появилась, когда он находился над территорией Балканского полуострова. В честь чего и получил в том числе свое название. Минимальное давление в центре составляло 982 гПа.

25.11 18 ч. Циклон начал двигаться на восток и вскоре подошел вплотную к акватории Эгейского моря. Здесь его минимальное давление в центре составило 981 гПа.

25.11 21 ч. Далее он свернул чуть южнее и вышел уже непосредственно в Эгейское море. Минимальное давление в центре составило 978 гПа.

26.11 00 ч. После чего циклон оказался над территорией западной части Турции в районе Стамбула. Его минимальное давление в центре составляло 976 гПа.

26.11 03 ч. Циклон впервые вышел на территорию Черного моря и оказался у берегов Болгарии. Минимальное давление в центре составило 974 гПа.

26.11 06 ч. Далее наш обозреваемый циклон продолжил свое движение на северо-восток и оказался неподалеку от берегов Румынии. Минимальное давление в центре составило 974 гПа.

26.11 09 ч. В этот срок наблюдений циклон продолжил свое движение на северо-восток и все также оказался неподалеку от берегов Румынии. Его минимальное давление в центре составляло 970 гПа.

26.11 12 ч. В этот срок наш циклон продолжил углубляться на северо-восток. Минимальное давление в центре составляло 968 гПа.

26.11 15 ч. Циклон достиг своей максимальной стадии развития, о чем, собственно, и говорит его минимальное давление в центре. В этот момент оно составило 966 гПа.

26.11 18 ч. Далее циклон переместился на территорию южной части Украины, где его минимальное давление в центре составляло 971 гПа. С этого срока и начинается рост давления в центре.

26.11 21 ч. Циклон переместился чуть северо-восточнее, но все также находился над территорией Украины над территорией Днестра. В этот момент минимальное давление в центре составило 973 гПа.

27.11 00 ч. В этот срок наблюдений циклон переместился сильно восточнее по реке Днепр. Его минимальное давление в центре составляло 975 гПа.

27.11 03 ч. Далее циклон переместился по территории Украины к ее северу на границу с Россией, где его минимальное давление в центре составляло 976 гПа.

27.11 06 ч. В этот срок центр циклона продолжил углубляться на восток и прошел по юго-восточным областям центральной России. Минимальное давление в центре составляло 976 гПа.

27.11 09 ч. Циклон переместился чуть северо-восточнее, но все также находился над территорией центральной части России. В этот момент минимальное давление в центре не менялось и составило 976 гПа.

27.11 12 ч. В этот последний срок циклон углубился чуть на северо-восток, где и наблюдалась окончательная стадия его заполнения. Минимальное давление в центре составляло 978 гПа.

Таблица 1. Скорости ветра на станциях за 4 анализируемых срока

Станция	Сроки			
	25.11.2023 15 ч	26.11.2023 00 ч	26.11.2023 15 ч	27.11.2023 00 ч
Скорость ветра, м/с				
Констанца	2	5	6	2
Гура Портитеи	3	8	4	3
Анапа	10	9	15	17
Севастополь	10	16	20	23
Феодосия	3	2	8	8
Ялта	3	2	6	7
Сочи	6	9	7	6
Бургас	3	10	14	5
Инеболу	13	12	9	9
Трабзон	3	2	8	3
Зонгудлак	7	6	8	3
Орду	4	10	15	2
Одесса	14	8	10	15
Батуми	9	4	9	10

Из таблицы 1 видно, что максимальные скорости ветра наблюдались за 2 крайних срока, когда циклон достиг своей максимальной активности. 26.11 в 15 часов штормовые ветры наблюдались на трех станциях – в Анапе, в Севастополе, в Орду. 27.11 00 часов штормовые ветры, в свою очередь, наблюдались уже в Анапе, Севастополе и в Одессе.

3.2 Параметр динамической (бароклинной) неустойчивости

Бароклинная неустойчивость – это одно из необходимых условий для того, чтобы возникали возмущения синоптического масштаба. Данный параметр в большей степени влияет на развитие малых возмущений. Наиболее отчетливо это проявляется в процессе формирования мезоциклонов. При крупномасштабном циклогенезе динамическая неустойчивость также косвенно может влиять и на процесс формирования малых возмущений, из-за того, что возникающая циклоническая циркуляция способствует разрешению статической неустойчивости.

Процесс циклогенеза охватывает всю тропосферу. По этой причине важно учитывать бароклинность в слое 850-300 гПа, как наиболее активную часть тропосферы. Для этого используются данные формулы для расчетов:

$$D = \frac{DI_{850}^{500} + DS_{700}^{300}}{2 * 10^{-10}} \quad (1.1)$$

где DI_{850}^{500} - динамическая неустойчивость в слое 500-850 гПа,

DS_{700}^{300} - динамическая неустойчивость в слое 300-700 гПа.

$$DI_{850}^{500} = \frac{3 \cdot 10^{-6} (\sin \varphi)^2 \sqrt{V_1^2 + (0.75V_2)^2 - 1.5V_1V_2 \cos|d_1 - d_2|}}{(z_{500} - z_{850})(\Theta_{500} - \Theta_{850})} \quad (1.2)$$

$$DS_{700}^{300} = \frac{2.6 \cdot 10^{-6} (\sin \varphi)^2 \sqrt{V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos|d_2 - d_3|}}{(z_{300} - z_{700})(\Theta_{300} - \Theta_{700})} \quad (1.3)$$

где Θ -потенциальная температура (К), φ -географическая широта (°); V_1 , V_2 , V_3 , d_1 , d_2 , d_3 - модули направления векторов сдвигов ветра; z - высота (м)

$$\Theta_{500} = (273.2 + T_{500}) \left(\frac{1000}{500} \right)^{0.288} \quad (1.4)$$

$$\Theta_{850} = (273.2 + T_{850}) \left(\frac{1000}{850} \right)^{0.288} \quad (1.5)$$

$$\theta_{700} = (273,2 + T_{700}) \left(\frac{1000}{700} \right)^{0,288} \quad (1.6)$$

$$\theta_{300} = (273,2 + T_{300}) \left(\frac{1000}{300} \right)^{0,288} \quad (1.7)$$

T_{500} - температура воздуха на уровне 500 гПа.

T_{850} - температура воздуха на уровне 850 гПа.

T_{700} - температура воздуха на уровне 700 гПа.

T_{300} - температура воздуха на уровне 300 гПа.

$$a_1 = d_{700} - d_{850} \quad (1.8)$$

$$a_2 = d_{500} - d_{700} \quad (1.9)$$

$$a_3 = d_{300} - d_{500} \quad (1.10)$$

$d_{850}, d_{700}, d_{500}$ - направление ветра на уровнях 850, 700 и 500 гПа.

Модули направления векторов находятся по формулам:

$$V_1 = \sqrt{V_{700}^2 + V_{850}^2 - 2V_{700}V_{850} \cos a_1} \quad (1.11)$$

$$V_2 = \sqrt{V_{500}^2 + V_{700}^2 - 2V_{500}V_{700} \cos a_2} \quad (1.12)$$

$$V_3 = \sqrt{V_{300}^2 + V_{500}^2 - 2V_{300}V_{500} \cos d_3} \quad (1.13)$$

$$d_1 = d_{850} \pm \arccos \frac{V_{850} - V_{700} \cos a_1}{V_1} \quad (1.14)$$

$$d_2 = d_{700} \pm \arccos \frac{V_{700} - V_{500} \cos a_2}{V_2} \quad (1.15)$$

$$d_3 = d_{500} \pm \arccos \frac{V_{500} - V_{300} \cos a_3}{V_3} \quad (1.16)$$

При правом повороте ветра с высотой используется знак минус, при левом – плюс.

Атмосферу можно считать динамически неустойчивой, если $D \geq 1.0$.

Для того, чтобы рассчитать параметр динамической неустойчивости атмосферы использовались фактические данные, полученные с помощью карт погоды.

Полученные данные по бароклинности в слое 850-300 гПа и показатель динамической неустойчивости по данным формулам представлены в таблице 2.

Таблица 2. Бароклинность в слое 850-300 гПа и показатели динамической неустойчивости

срок	$DI_{850}^{500} 10^{-10}$	$DS_{700}^{300} 10^{-10}$	D
25.11.2023 15 ч	1,34	2,12	1,73
26.11.2023 00 ч	3,40	6,53	4,96
26.11.2023 15 ч	1,75	1,68	1,71
27.11.2023 00 ч	2,81	1,44	2,13

3.3 Показатель спиралевидности

Спиралевидность атмосферных движений определяют как меру наклона оси вихря по отношению к вектору скорости течения. Этот показатель рассчитывается в качестве суммарного значения для слоев 850-700 и 700-500 гПа.

$$S_{p\Sigma} = S_{p850}^{700} + S_{p700}^{500} \quad (2.1)$$

$$S_p = V \text{rot} V \approx v \frac{\partial u}{\partial z} - u \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.2)$$

Составляющие скорости ветра вычисляются по следующим формулам:

$$u = V \sin d \quad (2.3)$$

$$v = V \cos d \quad (2.4)$$

При проведении расчетов спиралевидности также необходимо учитывать среднее значение при циклогенезе. Для европейской части России среднее значение спиралевидности составляет $\bar{S}_p \approx 1.13 * 10^{-2} \text{ м/с}$. Безразмерный параметр спиралевидности можно получить по следующей формуле:

$$S_p = \frac{S_{p\Sigma}}{\bar{S}_p} \quad (2.5)$$

Условием циклогенеза является $S_p \neq 0$. Однако, следует отметить, что при $S_p > 0$ процесс циклогинеза протекает интенсивно, а при $S_p \leq 0$ замедленно.

В таблицах 3-6 представлены фактические данные и значения показателя спиралевидности.

Таблица 3. Исходные данные и показатели спиралевидности атмосферных движений за 25 ноября 2023 года (15:00 UTC)

P (гПа)	z (м)	d (°)	V, (м/с)	u, (м/с)	v (м/с)	S_{p850}^{700} (м/с)	S_{p700}^{500} (м/с)	$S_{p\Sigma}$ (м/с)	S_p
850	1440	327	9	-4,77	7,34	-0,048	0,083	0,034	3,04
700	2946	313	16	-11,67	10,88				
500	5438	318	29	-19,28	21,41				

Таблица 4. Исходные данные и показатели спиралевидности атмосферных движений за 26 ноября 2023 года (00:00 UTC)

P (гПа)	z (м)	d (°)	V, (м/с)	u, (м/с)	v (м/с)	S_{p850}^{700} (м/с)	S_{p700}^{500} (м/с)	$S_{p\Sigma}$ (м/с)	S_p
850	1203	192	27	-5,51	-25,94	0,256	-0,010	0,246	21,80
700	2776	219	33	-20,86	-25,76				
500	4646	218	32	-19,78	-25,32				

Таблица 5. Исходные данные и показатели спиралевидности атмосферных движений за 26 ноября 2023 года (15:00 UTC)

P (гПа)	z (м)	d (°)	V, (м/с)	u, (м/с)	v (м/с)	S_{p850}^{700} (м/с)	S_{p700}^{500} (м/с)	$S_{p\Sigma}$ (м/с)	S_p
850	1271	306	26	-21,23	15,42	-0,023	0,07	0,047	4,20
700	2754	302	21	-17,89	11,18				
500	5226	283	25	-24,56	5,67				

Таблица 6. Исходные данные и показатели спиралевидности атмосферных движений за 27 ноября 2023 года (00:00 UTC)

P (гПа)	z (м)	d (°)	V, (м/с)	u, (м/с)	v (м/с)	S_{p850}^{700} (м/с)	S_{p700}^{500} (м/с)	$S_{p\Sigma}$ (м/с)	S_p
850	1201	301	25	-21,61	12,98	0,026	0,048	0,074	6,57
700	2679	267	23	-22,61	-1,18				
500	5168	283	19	-18,54	4,28				

3.4 Параметр кинетической энергии в средней тропосфере

Как говорилось несколько раньше, при переходе из одной стадии в другую скорости ветра возрастают. С увеличением скоростей ветра, выделяется и большое количество кинетической энергии. По мере развития циклона холодный воздух сдвигает теплый и буквально вынуждает его подниматься все выше и выше. Это перераспределение теплых и холодных воздушных масс является причиной понижения центра тяжести масс. В свою очередь, подобный процесс является причиной уменьшения количества потенциальной энергии и, само собой, роста кинетической.

При всем при этом значения кинетической энергии в последней стадии не столь высокие, потому как циклон перестает активно развиваться и

скорости ветра постепенно начинают уменьшаться. Вследствие чего, наибольшие значения запасов кинетической энергии, отмечаются на первых трех стадиях их развития. Максимальные по высоте значения запасов кинетической энергии приходится на слой 200 - 400 гПа. В первую очередь это связано с тем, что в этом слое проходят струйные течения. При этом максимальные запасы энергии в подвижных циклонах в полтора-два раза больше, чем в малоподвижных.

Для расчета параметра кинетической энергии, как правило, принято учитывать скорость ветра в области центра циклона на уровне 500 гПа. Для того, чтобы существовали процессы взрывного циклогенеза, скорость на данном уровне должна быть больше 20 м/с. Формула для расчета безразмерного параметра кинетической энергии:

$$k = \frac{V_{500} - 20}{V_{500}} \quad (3.1)$$

где V_{500} – скорость ветра на уровне 500 гПа.

Результаты полученных результатов при расчете параметра кинетической энергии для рассматриваемого нами циклона представлена в таблице 7.

Таблица 7. Значение параметра кинетической энергии

срок	V_{500} , м/с	k
25.11.2023 15 ч	29	0,305
26.11.2023 00 ч	32	0,378
26.11.2023 15 ч	25	0,207
27.11.2023 00 ч	19	-0,051

Полученные результаты всех характеристик, которые и будут обуславливать процесс взрывного циклогенеза представлены в таблице 8.

Таблица 8. Полученные значения показателей динамической неустойчивости, спиралевидности и кинетической энергии.

срок	D	S_p	k
25.11.2023 15 ч	1,73	3,04	0,305
26.11.2023 00 ч	4,96	21,80	0,378
26.11.2023 15 ч	1,71	4,20	0,207
27.11.2023 15 ч	2,13	6,57	-0,051

На основании полученных результатов, которые будут и определять процесс циклогенеза мы можем сделать следующие выводы:

1) Из полученной таблицы 8 видно, что параметр динамической неустойчивости во всех рассмотренных случаях удовлетворяет условию $D \geq 1.0$, из чего, собственно, мы можем сделать вывод, что атмосфера была динамически неустойчива.

2) Параметр спиралевидности точно также, как и рассмотренный выше параметр динамической неустойчивости удовлетворяет условию $S_p \neq 0$. Также получилось, что по всем из полученных сроков параметр спиралевидности оказался выше 0 ($S_p > 0$), следовательно, процесс циклогенеза протекал довольно интенсивно.

3) Параметр кинетической энергии в первые три срока был положителен, затем его значение стало отрицательным в свой

последний срок. Следовательно, процесс взрывного циклогенеза в этот срок протекал уже не столь интенсивно.

4) Из представленных выше таблиц мы можем наблюдать, что циклон наиболее активно развивался в срок до того, как он вышел в акваторию Черного моря, то есть 26.11.2023 в 00 ч. Здесь наблюдались наибольшие значения параметра динамической неустойчивости, параметра спиралевидности, параметра кинетической энергии. И лишь к последнему сроку циклогенез начал развиваться не столь интенсивно, об этом говорит отрицательное значение параметра кинетической энергии.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что в нашем циклоне из всех рассмотренных сроков наблюдения лишь в одном не наблюдалось активной стадии взрывного циклогенеза и этот срок приходится на выход циклона из акватории и последующее его заполнение в дальнейших сроках. В свою же очередь его максимум пришелся на срок до того, как циклон вышел в акваторию Черного моря.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе были рассмотрены классификации штормовых циклонических образований, их влияние на побережье Черного моря, а также рассмотрены характеристики, определяющие процесс циклогенеза.

В работе проводился синоптический анализ приземных карт погоды, карт абсолютной (АТ-850, АТ-700, АТ-500, АТ-300) и относительной (ОТ 500/1000) топографии, что в конечном итоге помогло более детально проанализировать условия для возникновения и развития штормовых циклонов, по большей части тех из них, которые способствовали довольно резкому ухудшению погодных условий на Черноморском побережье за всю историю метеорологических наблюдений. Был проанализирован ветровой режим Причерноморья, построены розы ветров за каждый сезон года. Помимо этого, были рассчитаны характеристики, обуславливающие активный циклогенез за различные сроки прохождения Балканского циклона.

- 1) На рассмотренных станциях наиболее высокие скорости ветра отмечаются зимой, низкие – в летний период. Самые сильные ветры в Севастополе. Средние скорости ветра зимой 6-7 м/с, летом – 4-5 м/с. Зимой повторяемость штормовых ветров здесь превышает 4%.
- 2) Преобладающими направлениями прохождения циклонов стали северо-восточное направление (южные циклоны) в 43%, юго-восточное направление (северные циклоны) в 20% и восточное направление (западные циклоны) в 23%. Как правило, штормовой ветер наблюдался у циклонов в максимальной стадии развития в 77%, в 20% циклоны находились в стадии заполнения и в 3% в стадии молодого циклона.
- 3) Циклоны по большей части наблюдались не глубокие В 73% случаях давление в центре составляло от 990 до 1010 гПа. Наибольшая

повторяемость максимальной скорости ветра приходится на градацию 16-18 м/с (40%) и 18-20 м/с (30%).

- 4) Из рассмотренного случая южного циклона в ноябре 2023 г. можно сделать выводы, что циклон наиболее активно развивался в срок до того, как он вышел в акваторию Черного моря, то есть 26.11.2023 в 00 ч. Здесь наблюдались наиболее крупные значения и для параметра динамической неустойчивости, и для параметра спиралевидности, и для параметра кинетической энергии. В свою очередь параметр динамической неустойчивости во всех рассмотренных случаях удовлетворил условию $D \geq 1.0$, что говорит о том, что атмосфера была динамически неустойчива. Также получилось, что по всем из полученных сроков параметр спиралевидности оказался выше 0 ($S_p > 0$), следовательно, процесс циклогенеза протекал довольно интенсивно. Параметр кинетической энергии в первые три срока был положителен, затем его значение стало отрицательным в свой последний срок.
- 5) Сразу несколько регионов России серьезно пострадали в результате сильнейшего шторма на Черном море. Эту бурю синоптики уже назвали самой мощной за всю историю метеонаблюдений. На территории Черноморского побережья России наблюдался ураганный ветер и десятиметровые волны, достаточно редкие для Черного моря.

Список литературы

- 1) Бухаров М.В., Головлев К.Н., Миронова Н.С., Сизенова Е.А. Анализ причин усиления шквалистого ветра до ураганной силы в Керченском проливе 11 ноября 2007 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2010 Т. 7, № 3. С.9-15.
- 2) Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том IV. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 429 с.
- 3) Гиппиус Ф.Н., Архипкин В.С., Суркова Г.В. Оценка современных характеристик и многолетней изменчивости экстремального волнения на Черном море 2013. №. 27 С. 92-96.
- 4) Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пушкарев О.В. Экстремальное волнение в северо-восточной части Черного моря в феврале 2003 г. // Океанология. 2003 Т. 43, № 6. С. 948-950.
- 5) Ефимов В.В., Станичный С.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А. Наблюдение квазитропического циклона над Черным морем // Метеорология и гидрология. 2008 № 4. С. 53-62.
- 6) Кабатченко И.М., Матушевский Г.В., Резников М.В., Заславский М.М. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море // Метеорология и гидрология. 2001 № 5 С. 61-71.
- 7) Кислов А.В., Суркова Г.В., Архипкин В.С. Повторяемость штормовых ситуаций в Балтийском, Черном и Каспийском морях в изменяющихся климатических условиях // Метеорология и гидрология. 2016 № 2 С. 67-77.
- 8) Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышева Е.С., Колесов А.М. О шторме на Черном море в ноябре 2007 г. М.: Российский Речной Регистр, 2009 35 с.
- 9) Песков Б.Е., Дмитриева Т.Г. Синоптические процессы, вызвавшие 11 ноября 2007 опасные ветры и волнение на северо-востоке Черного моря,

- в Керченском проливе и на Азовском море // Метеоспектр. 2009 № 1 С. 91-96.
- 10) Шокуров М.В. Численное моделирование катастрофических погодных явлений в Черноморском регионе 2012 С. 301-320.
 - 11) Flocas H.A. et al. On cyclonic tracks over the Eastern Mediterranean // J. Climate. 2010 Vol. 23 P. 5243-5257.
 - 12) Гандин Л.С., Лайхтман Д.Л., Матвеев Л.Т., Юдин М.И. Основы динамической метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1955 – 646 с.
 - 13) Голицын Г.С. Размеры циклонов и статистические свойства их ансамбля // ДАН, 2005, т. 401, № 1, с. 72–74.
 - 14) Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М. Оценки гидрометеорологических рисков и функций распределения интенсивности атмосферных вихрей по данным реанализа и модельным расчетам // Прогнозирование и адаптация общества к экстремальным климатическим изменениям: Международная конференция по проблемам гидрометеорологической безопасности. – М., 2007, с. 53–64.
 - 15) Дымников В.П., Филатов А.Н. Устойчивость крупномасштабных атмосферных процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1990 – 236 с.
 - 16) Интенсивные атмосферные вихри [Тр. симпоз., г. Рединг (Англия) 14–17 июля 1981 г.] / Под ред. Л. Бенгтссона, Дж. Лайтхилла; Пер. с англ. Е.М. Добрышмана; под ред. Г.С. Голицына. – М.: Мир, 1985
 - 17) Калинин Н.А. Энергетика циклонов умеренных широт. – Пермь: изд. ПГУ, 1999 – 192 с.
 - 18) Колс К.А. Под парусом в шторм. – Л.: Гидрометеиздат, 1985 – 303 с.
 - 19) Матвеев Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1991 – 295 с.
 - 20) Неелова Л.О., Дикинис А.В., Еремина Н.С. «Взрывной» циклогенез // XVII междунар. конф. «Математика. Компьютер. Образование». – Дубна, 2010

- 21) Погосян Х.П., Бурцев А.И. Особенности эволюции полей температуры, влажности и давления воздуха в развивающихся циклонах // Изв. Академии наук СССР. Сер. Геофизика, 1957, № 2, с. 244–254.
- 22) Рудева И.А. Жизненный цикл атмосферных внетропических циклонов Северного полушария и его связь с процессами взаимодействия океана и атмосферы: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2008 – 31 с.
- 23) Рудева И. А. О взаимосвязи количества внетропических циклонов и их размеров // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2008, т. 44, № 3, с. 294–330.
- 24) Русин И.Н., Тараканов Г.Г. Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. – СПб., 1996 – 116 с.
- 25) Семка В.В. Синоптико-статистический анализ и прогноз опасных явлений и неблагоприятных погодных условий в циклонах умеренных широт: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Воронеж, 2007 – 186 с.
- 26) Хандожко Л.А. Методика оценки экономического эффекта метеорологических прогнозов для морских портов России // Метеоспектр, 2009, № 2, с. 51–63.
- 27) Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985 – 263 с.
- 28) Rudeva I., Sergeev K., Gulev P. / Climatology of the cyclone size characteristics and their changes during the cyclone life cycle. // Monthly Weather Review, 2007, vol.135, No.7, p.2568–2587.
- 29) Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М., Голицын Г.С., Мохов И.Н. Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа NCEP/NCAR и модели ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2007, т. 43, № 6, с. 705–712.
- 30) Борисенко М.М., Кравченко И.Н. Некоторые результаты исследований режима сильных ветров на Балтике и на северо-западе ЕТ СССР // Тр. Зап.-Сиб. НИГМИ, 1979, № 145, с. 41–51.

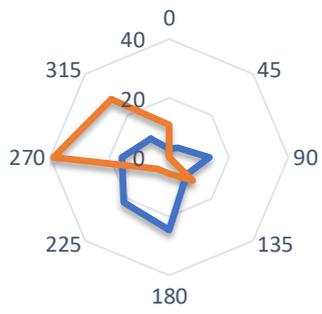
- 31) Тупикин С.Н. Термобарические условия возникновения сильных ветров в южной части Балтийского моря. – В сб.: «Режимообразующие факторы, гидрометеорологические и гидрохимические процессы в морях СССР». – Л.: Гидрометеоздат, 1988, с. 217–260.19
- 32) Тупикин С.Н. Сильные ветра Балтийского моря (Анализ, статистика, типизация). – Калининград, 1997 – 96 с.

Приложение 1. Розы ветров за зимний период.

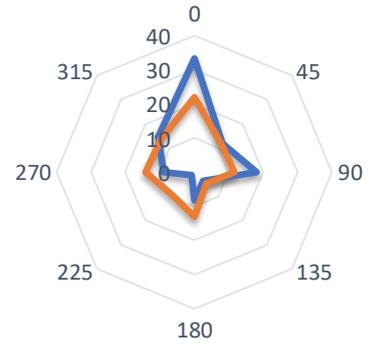
Оранжевая кривая характеризует общий ветровой режим, синяя – штормовые ветры.



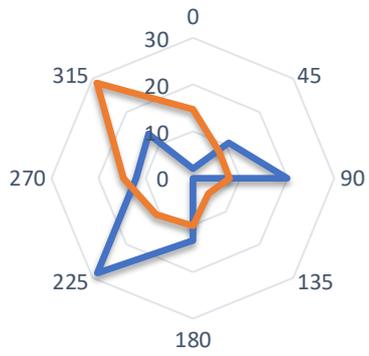
Трабзон



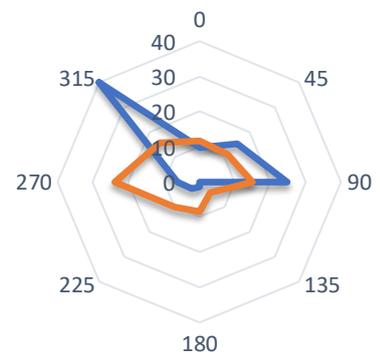
Одесса



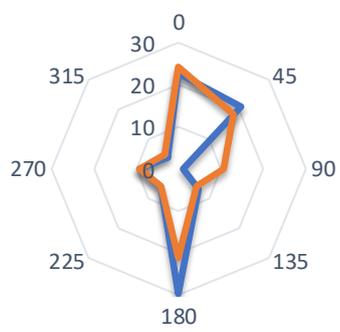
Феодосия



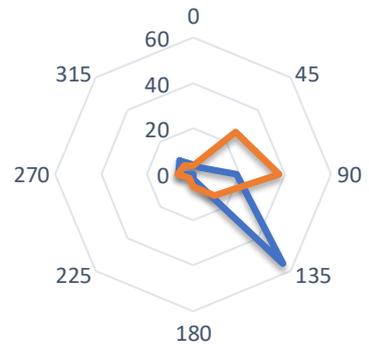
Ялта



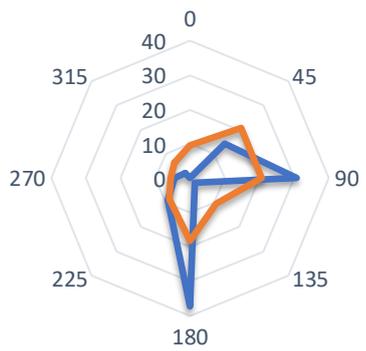
Севастополь



Сочи



Анапа

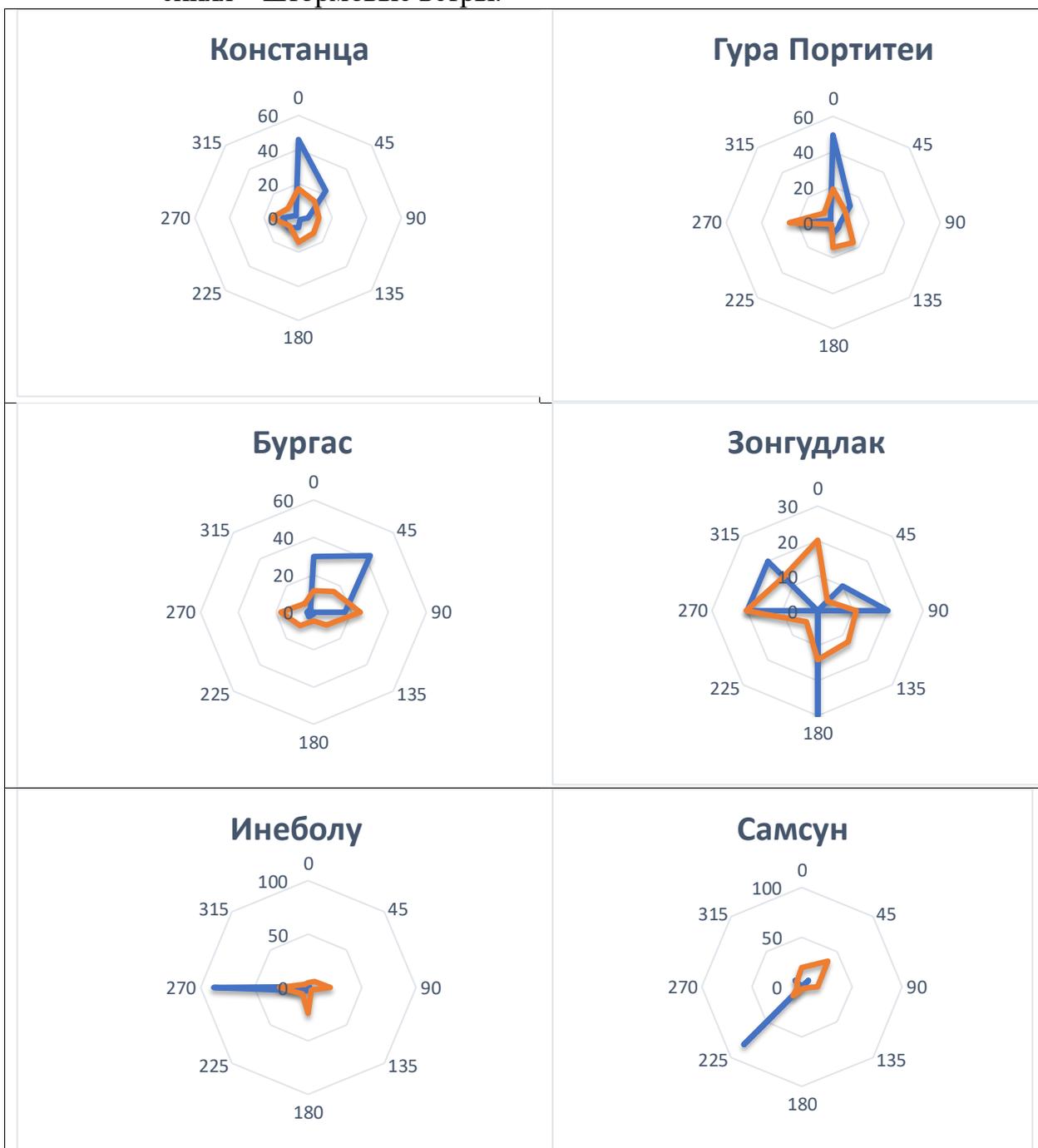


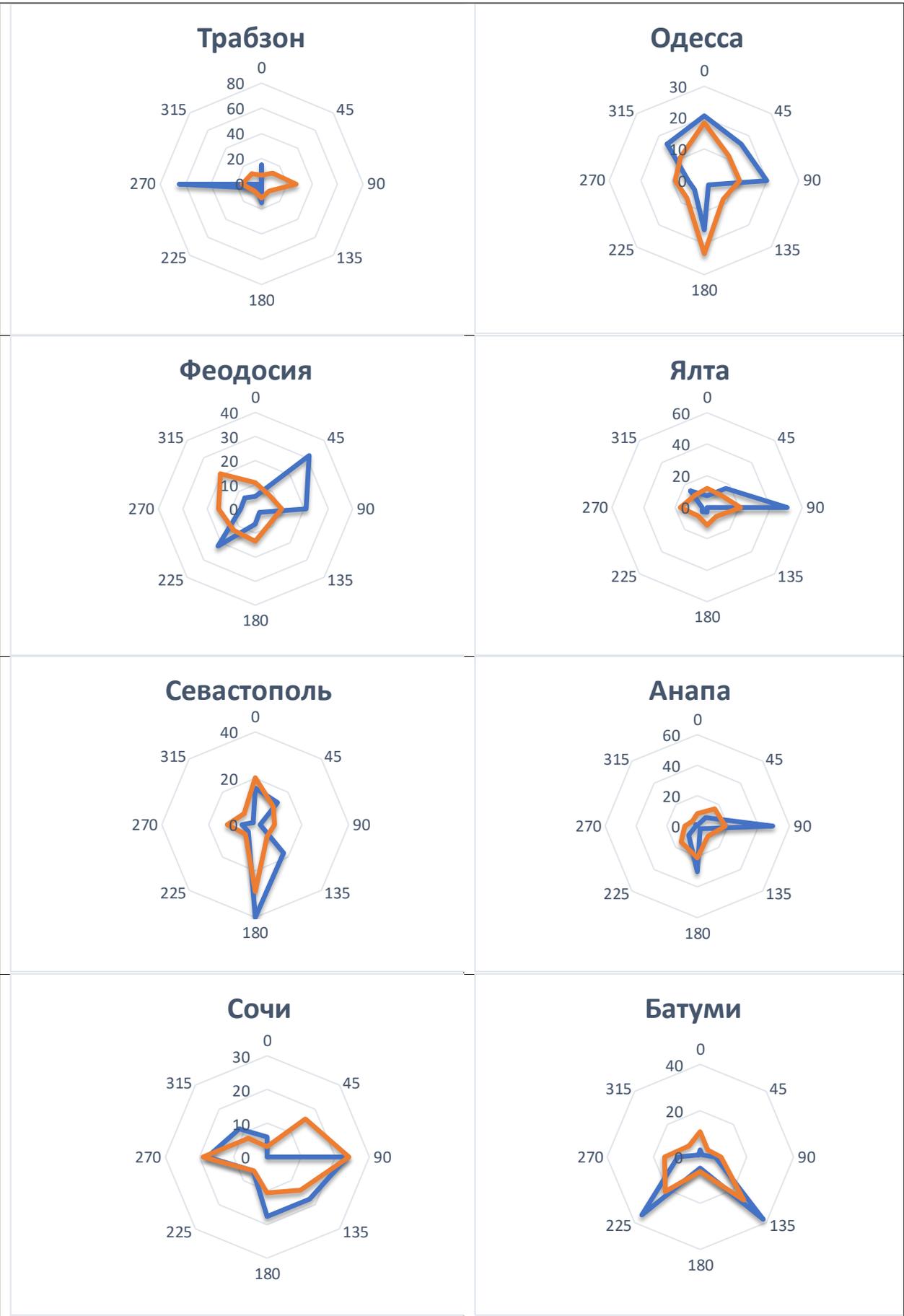
Батуми



Приложение 2. Розы ветров за весенний период.

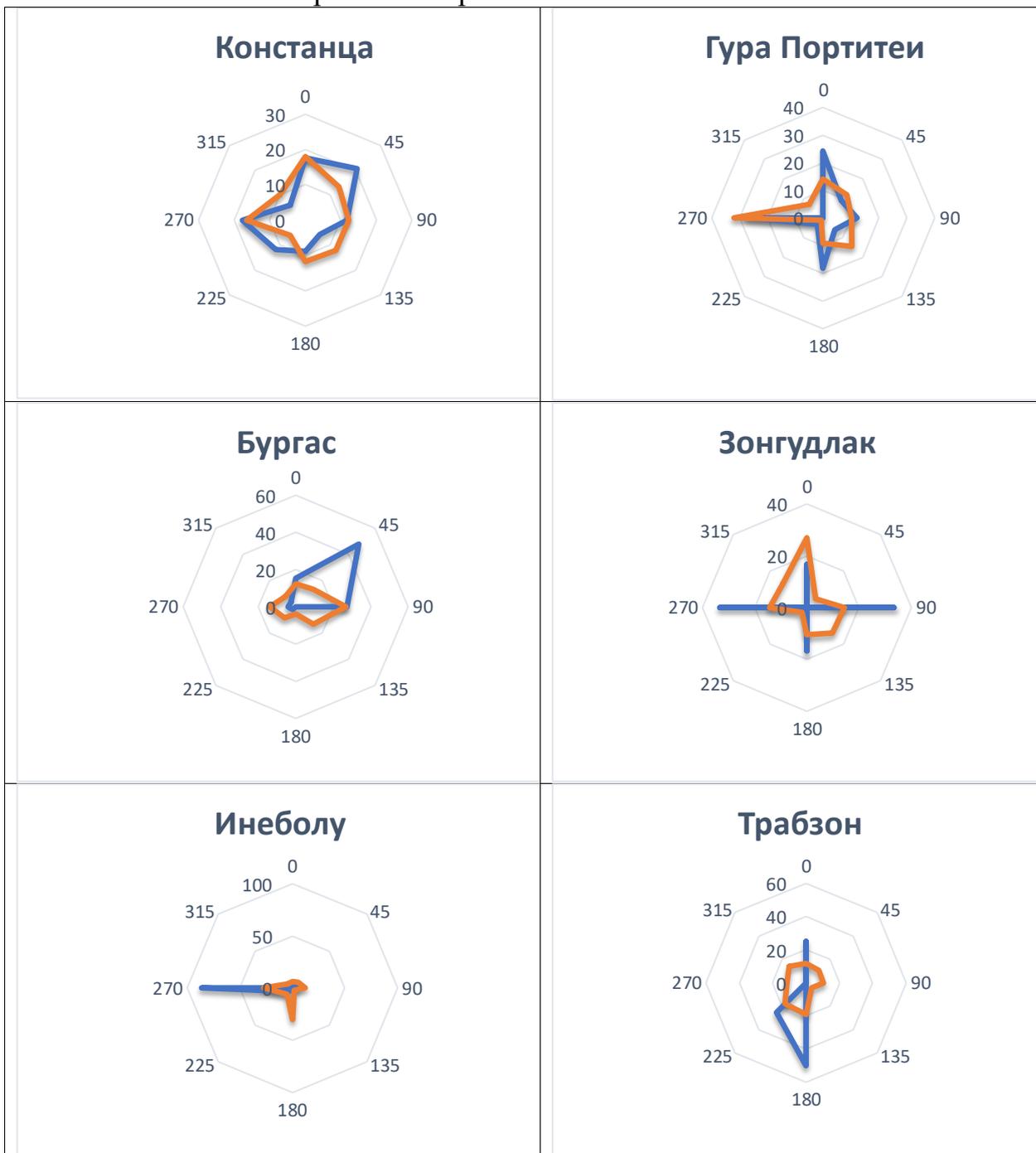
Оранжевая кривая характеризует общий ветровой режим, синяя – штормовые ветры.



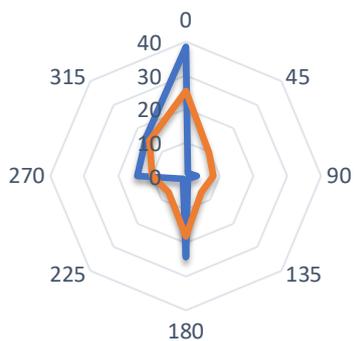


Приложение 3. Розы ветров за летний период.

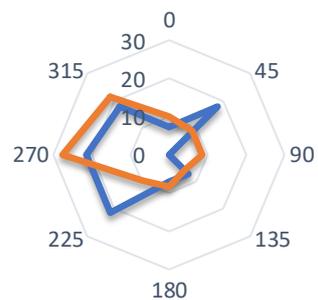
Оранжевая кривая характеризует общий ветровой режим, синяя – штормовые ветры.



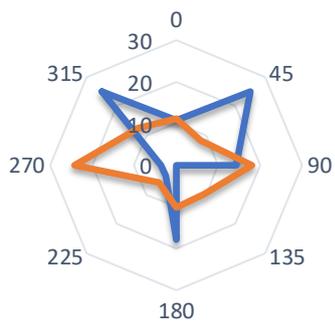
Одесса



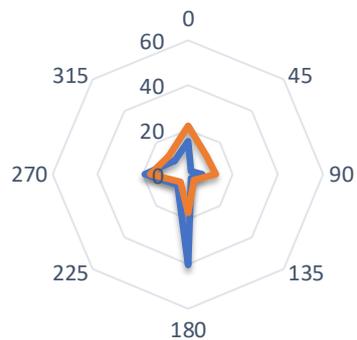
Феодосия



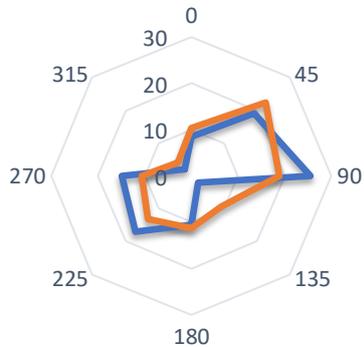
Ялта



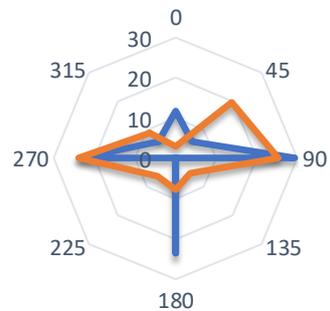
Севастополь



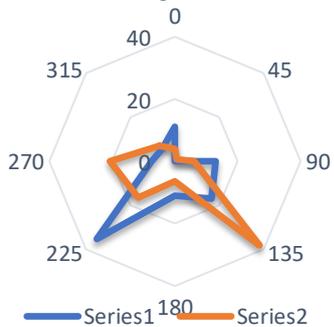
Анапа



Сочи



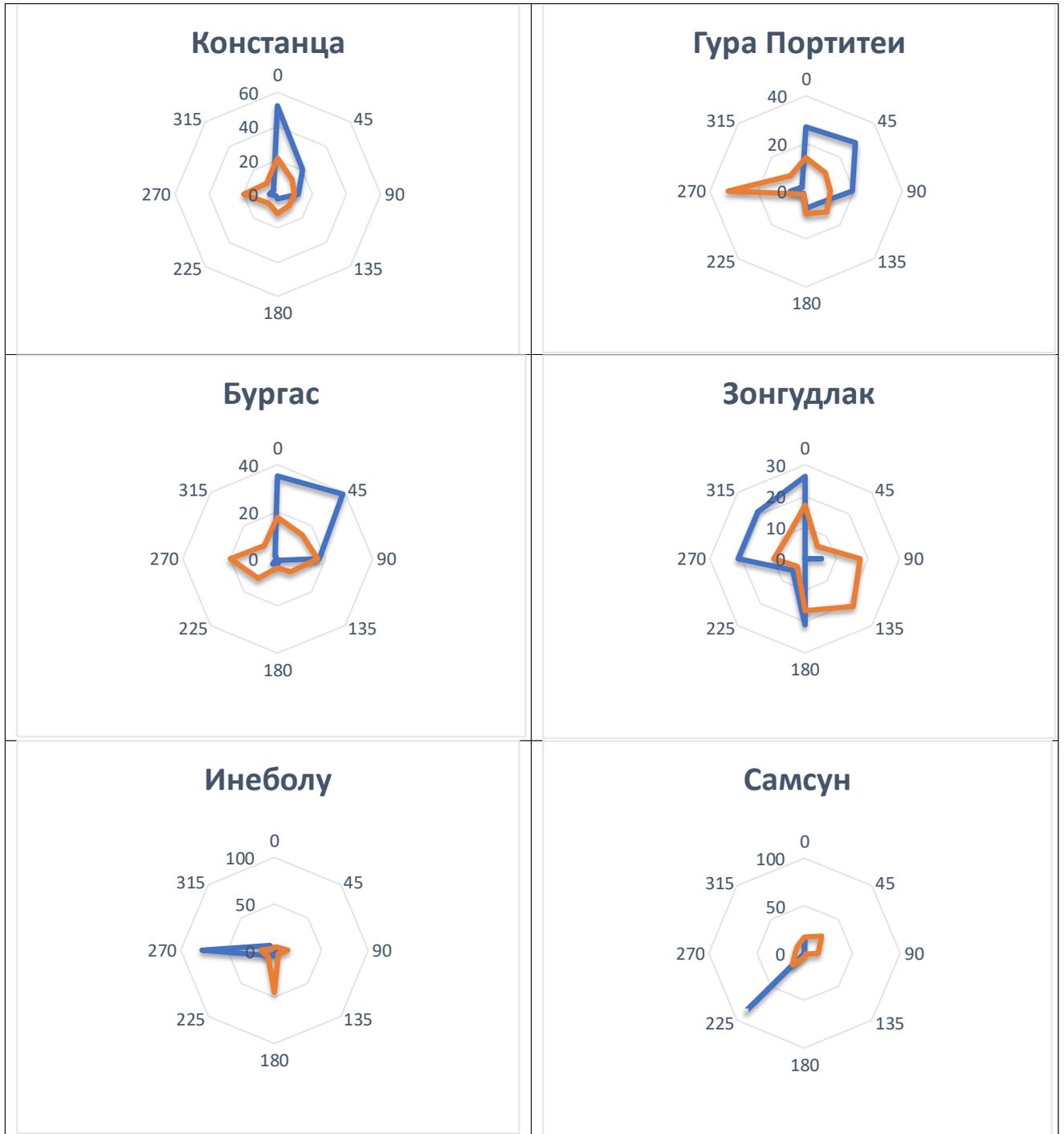
Батуми



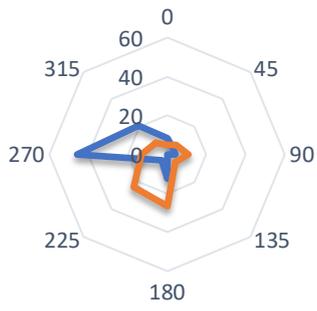
Series1 Series2

Приложение 4. Розы ветров за осенний период.

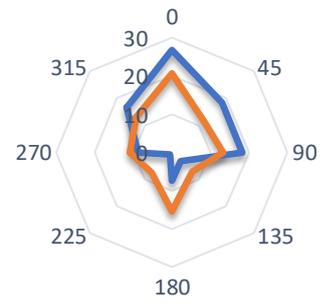
Оранжевая кривая характеризует общий ветровой режим, синяя – штормовые ветры.



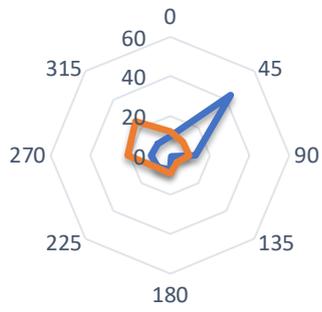
Трабзон



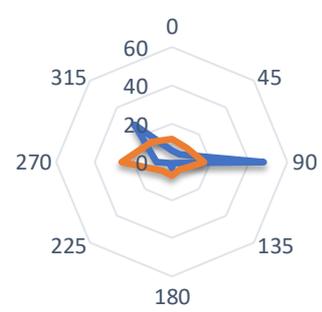
Одесса



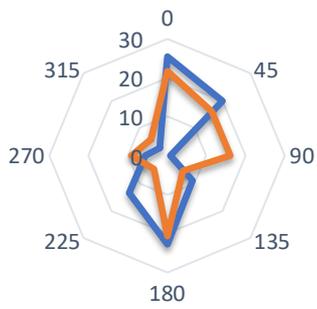
Феодосия



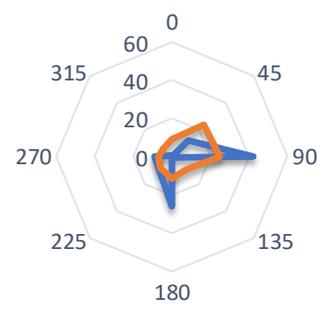
Ялта



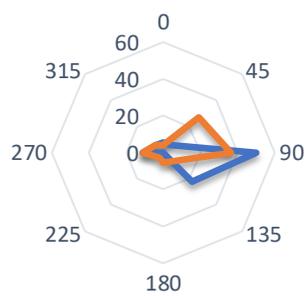
Севастополь



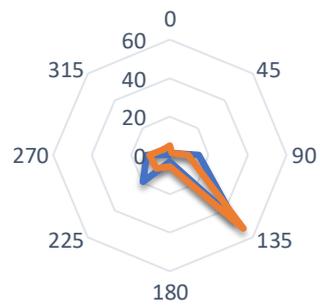
Анапа



Сочи



Батуми



Приложение 5. Повторяемость ветра по градациям скорости

