

# Ветровые циклы и климатические тренды Черного моря

Мельников В.А., Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И.

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН

[vmelnikov@ocean.ru](mailto:vmelnikov@ocean.ru)

[lidija-moskalenko@rambler.ru](mailto:lidija-moskalenko@rambler.ru)

[kuzevanova-nata@mail.ru](mailto:kuzevanova-nata@mail.ru)

## **Цель работы**

Предметом работы является выяснение режимов ветра в широкой полосе временных масштабов и оценки "отклика" морской гидрофизической системы на ветровые воздействия.

## **Данные**

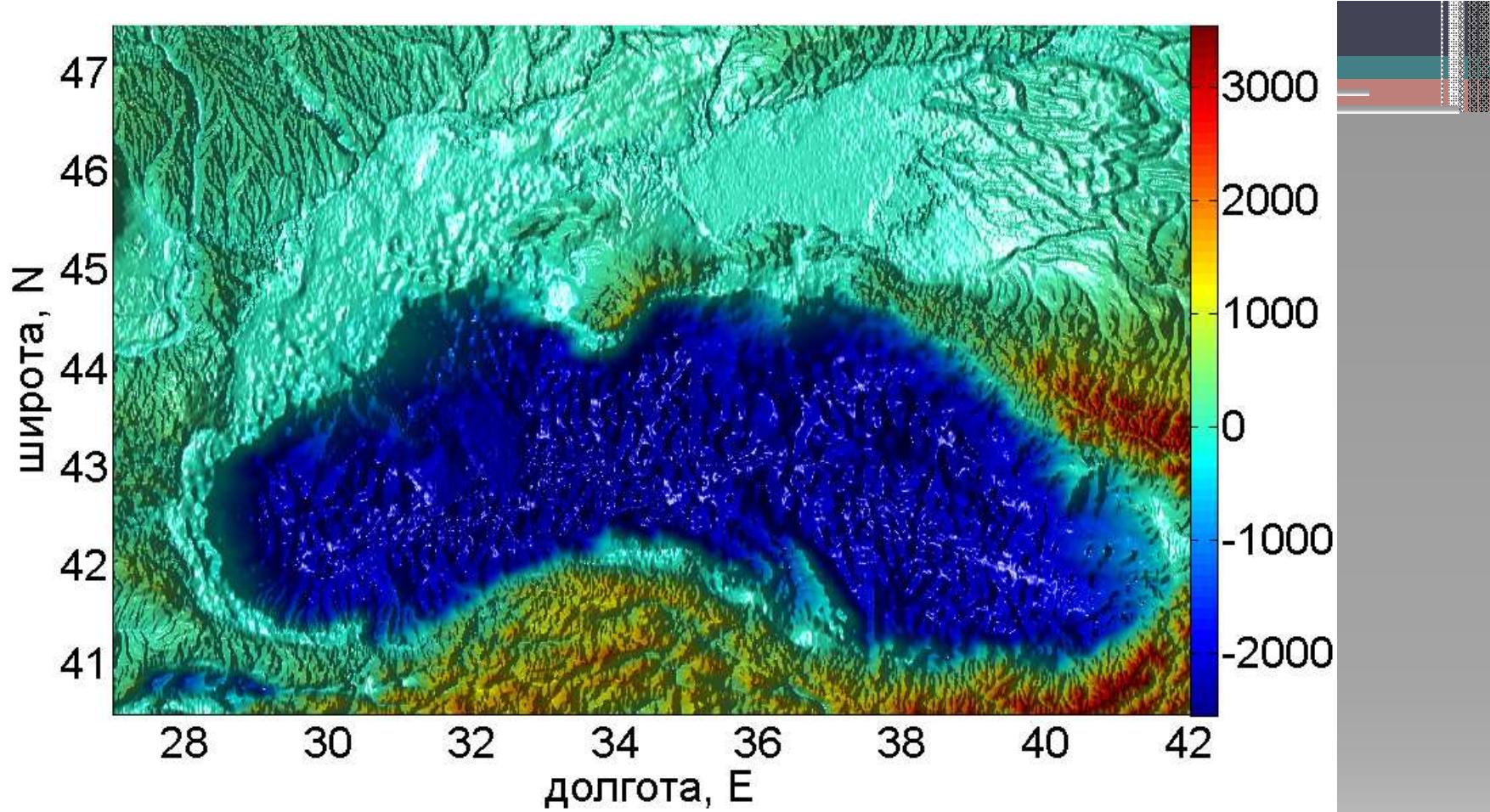
Анализ основан на данных стандартных метеорологических измерений в период 1998-2011 гг. на 134 прибрежных метеорологических станциях (из списка сети ВМО) вокруг всего побережья Черного моря, включая более продолжительные (1938-2011гг.) измерения на метеорологической станции Геленджика. Использовались базы данных NCEP-NCAR, QuickSCAT и PathFinder v5, а также данные измерений при помощи различных зондов на гидрофизическем Полигоне ИО РАН на Черном море.

## **Методы обработки**

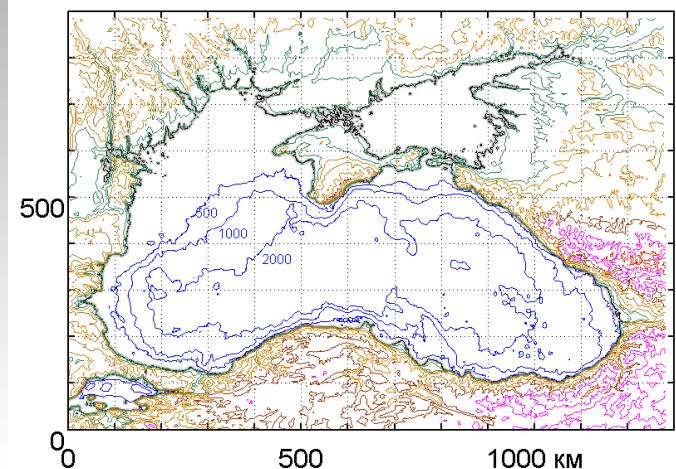
Для визуализации временных рядов направления и скорости ветра были построены прогрессивные векторные диаграммы ветра. По мере увеличения продолжительности наблюдений, на этих диаграммах наглядно проявляются все более и более низкочастотные составляющие.

## **Содержание**

- 1. Общая характеристика гидрометеорологических процессов.**
  - 2.1. Атмосфера.
  - 2.2. Море.
- 2. Данные измерений, методы обработки, интеркалибрация.**
- 3. Особенности разномасштабных вариаций гидрометеорологических параметров.**
  - 3.1. Вероятностные и спектральные характеристики.
  - 3.2. Элементарные ветровые циклы и признаки самоподобного случайного процесса.
  - 3.3. Соотношение доминирующих ветров и типовых атмосферных барических полей .
  - 3.4. Долговременные ветровые циклы над Черным морем.
  - 3.5. Влияние сезонных ветров на температуру поверхности и уровень моря.
- 4. Долговременные взаимосвязи ветров, температур воздуха и воды, индексов атмосферной циркуляции NAO и EAWR.**
- 5. Климатические вариации гидрометеорологических элементов.**
- 6. Исследования "отклика" гидрофизической системы на ветровые циклы.**
- 7. Выводы.**
- 8. Заключение. Что интересно прояснить?**
- 9. Литература**



Черное и Азовское моря. Рельеф земной поверхности и дна моря. Шкала высот глубин в метрах. Данные из Smith, W.H.F. and DT.Sandwell (1997), [9], разрешение 1'.



## **2.1. Атмосфера.**

1. Региональные климатические особенности Черного моря формируются в результате воздействия со стороны глобальной системы атмосферной циркуляции- субтропического и полярного меандрирующих струйных течений в верхних слоях тропосферы; перманентных и сезонных крупномасштабных «центров действия атмосферы», синоптических циклонов и антициклонов, а также под влиянием орографических неоднородностей (равнины и высокогорья) и сглаживающим влиянием обширной морской акватории. Характерные для региона большие синоптические и сезонные колебания связаны с распространением полярного воздуха вдоль Восточно-европейской равнины и через относительно невысокие горы с севера, с притоком субтропического воздуха с юга, а также с воздействиями частых штормовых циклонов, следующих вдоль одного из трёх глобальных штормовых «путей», со стороны Средиземного моря.

2. Как погода, так и климат Черного моря, определяются процессами смешения арктических и тропических воздушных масс, которые трансформируются в той или иной степени по пути их распространения. Чаще всего море накрыто континентальным полярным воздухом (51%), тропический воздух наблюдается в 22%, арктическая воздушная масса- в 12%; а морская полярная ВМ – в 15% всех случаев, [2].

3. На масштабах атмосферных «дальнодействий», Черное море находится на пересечении двух существенных областей влияния: круглогодичного Азорского антициклона (AA) с запада и сезонного(зимнего) Сибирского антициклона (SA) – с востока. Азорский антициклон вместе с Исландским минимумом давления составляют дипольную барическую систему Северо-Атлантическое колебание (NAO). NAO охватывается ещё более обширной барической структурой Восточная Атлантика (EA). Обнаруживаются взаимосвязи Сибирского антициклона с азиатскими муссонами и процессами в системе Эль-Ниньо-Южное колебание (ENSO). Обе барические структуры NAO и SA связаны с крупномасштабной циркуляцией в Арктике, которая параметризуется индексом Арктическое колебание (AO), [4].

4. Климатический меридиональный перенос воздушных масс над Средиземным и Черным морями находится под контролем NCP (North sea-Caspian pattern, барический диполь Северное море-Каспийское море) или EAWR (East Atlantic –West Russia, диполь давления Восточная Атлантика-Западная Россия) [7].

5. Детальный анализ и систематизация погодных условий в Средиземном и Черном морях, проведенные в работе [6], показывают, что разнообразие синоптических ситуаций возможно классифицировать на обозримое число типичных случаев. Для каждого сезона, удалось выделить 5-7 наиболее вероятных распределений высокого и низкого давления.. В результате показано, что рассматриваемый регион в зимний период, также зависит от центров низкого давления над Кипром и в Тирренском море; летом – от персидской ложбины давления; весной – от областей низкого давления "Sharav" или "Khamsin"; и круглый год от депрессии над Красным морем.

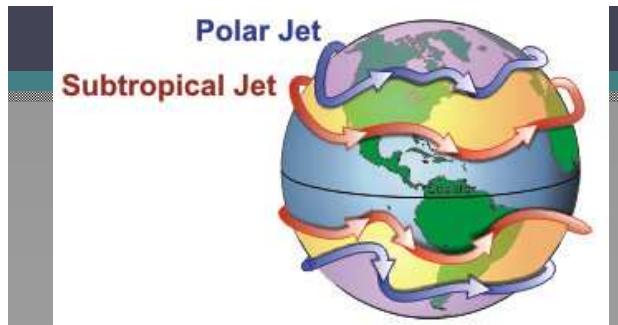
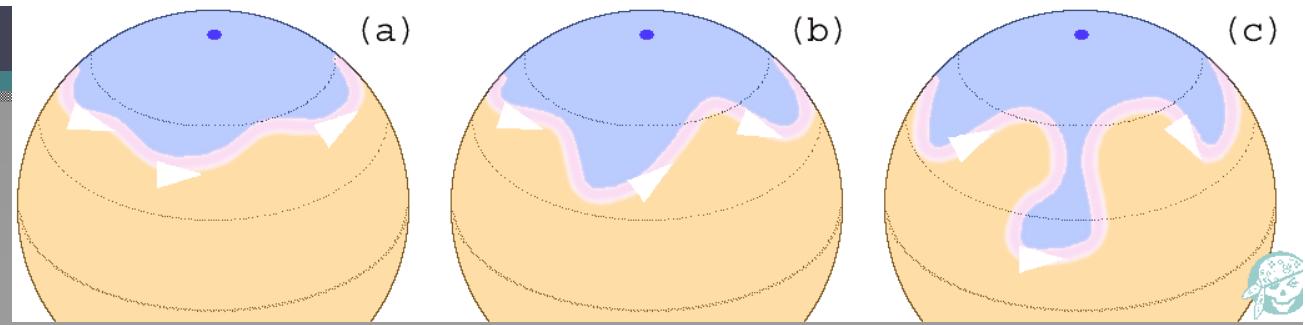


Схема полярного и субтропического струйных течений .



Меандры полярного струйного течения.  
Формирование вторжения арктического воздуха.

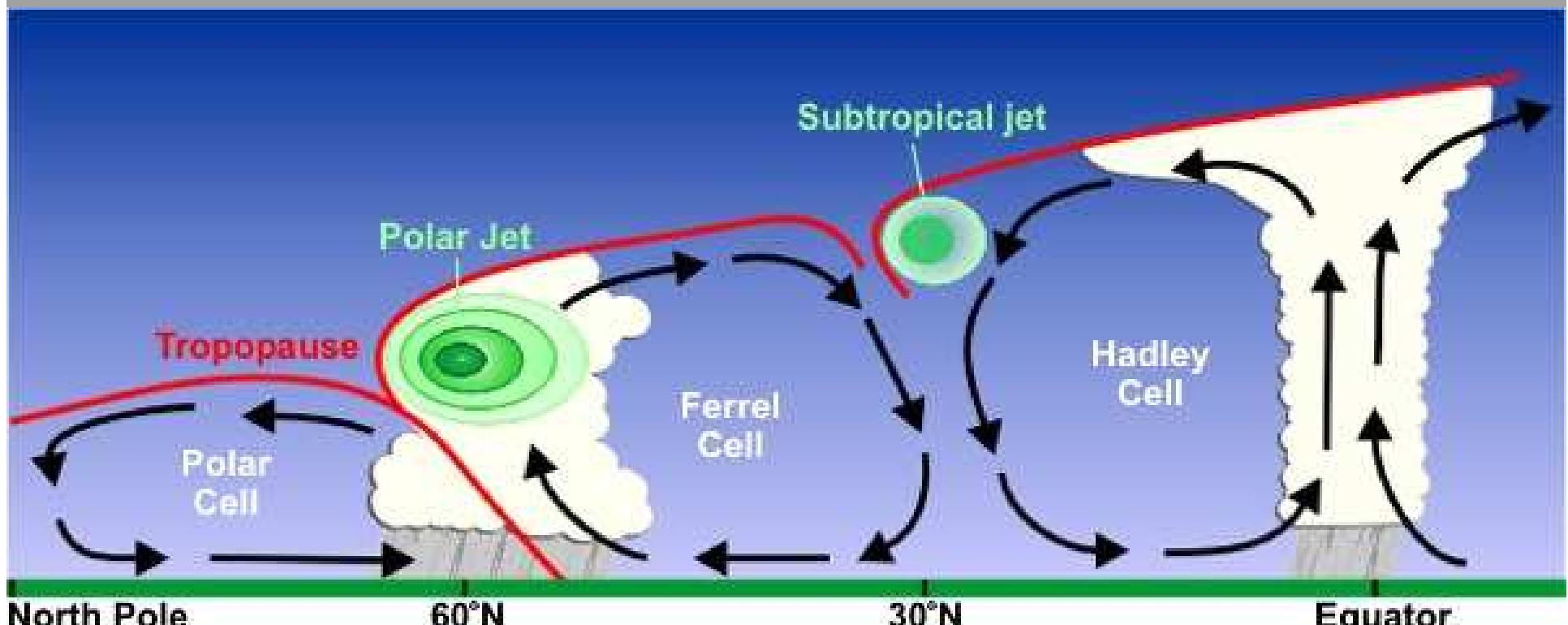
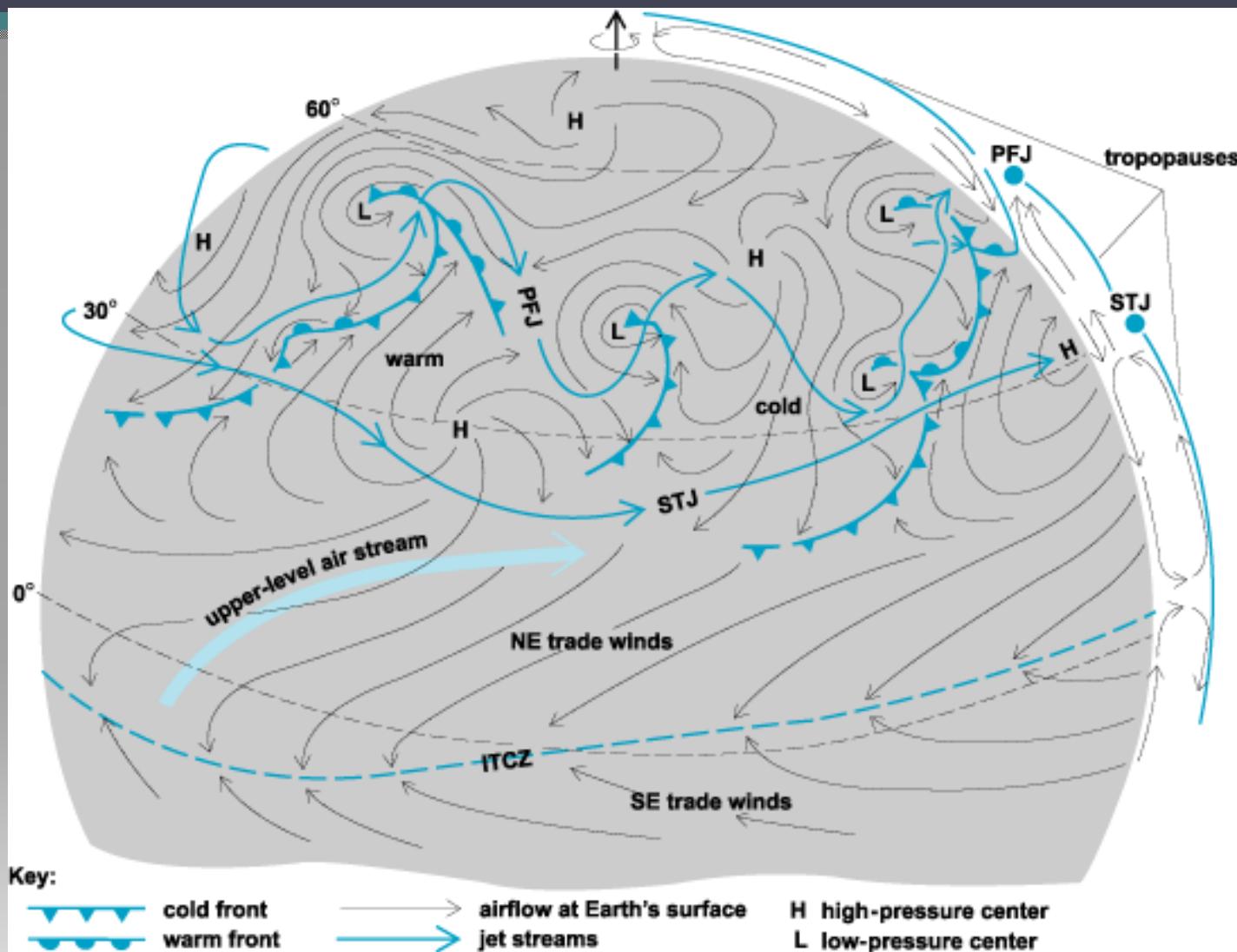
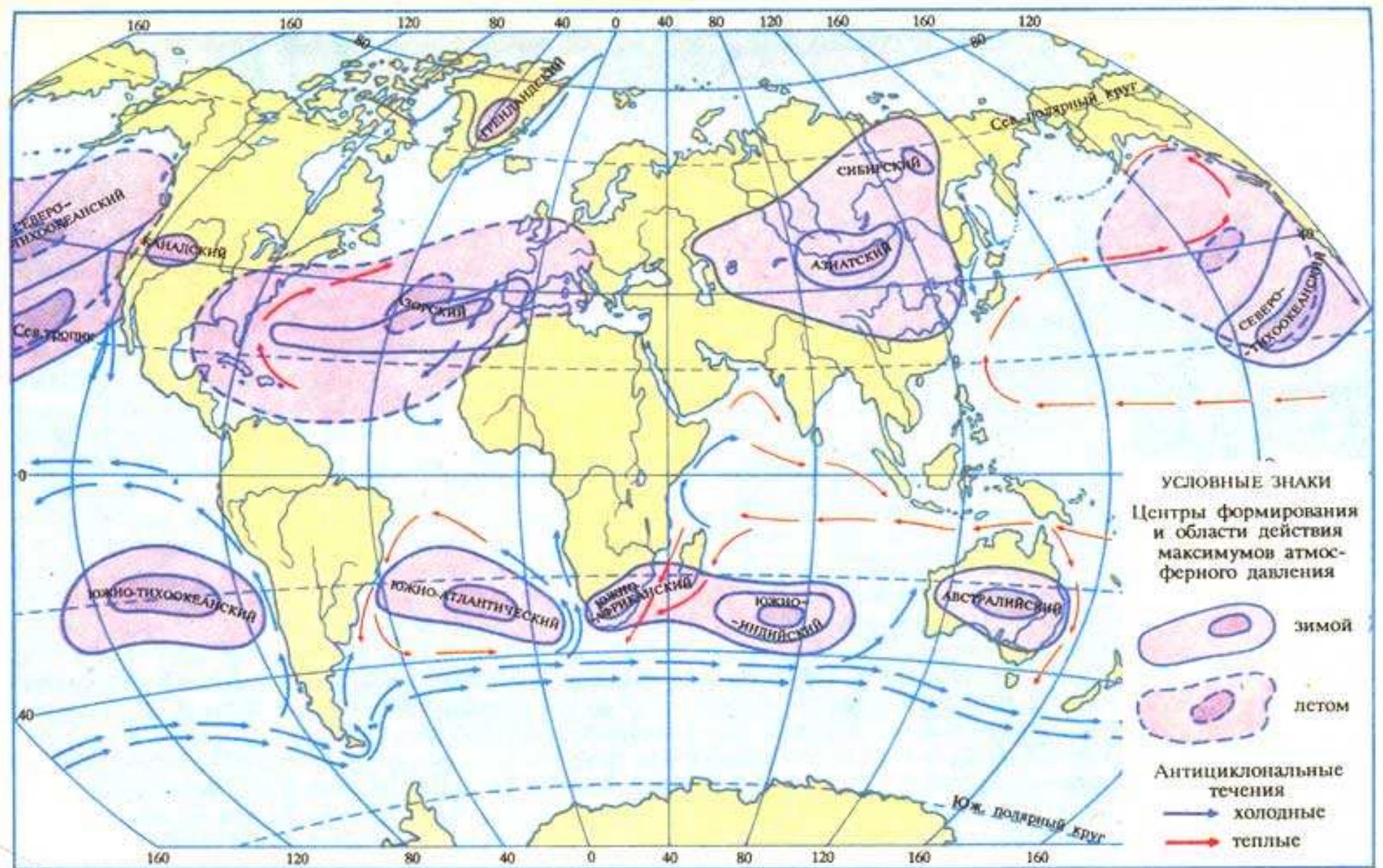
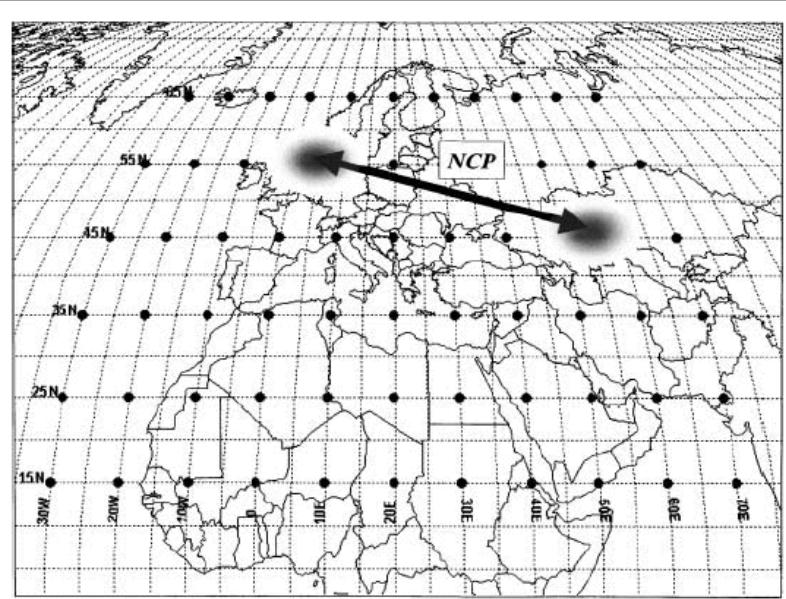
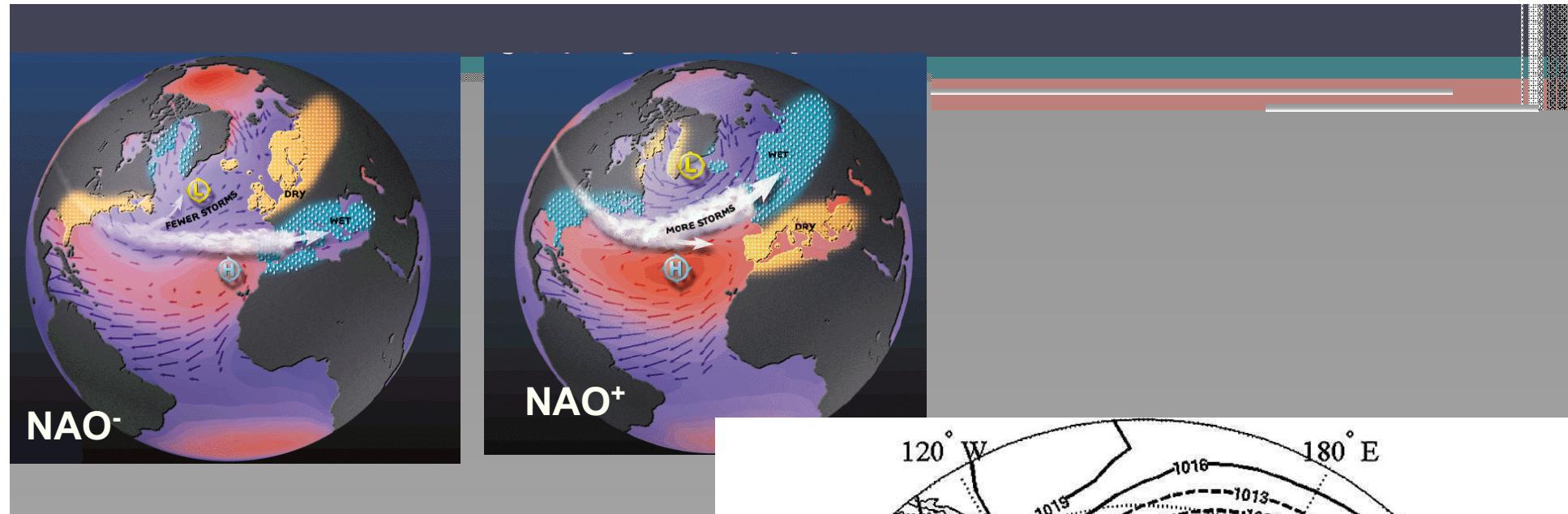


Схема положения струйных течений. Сечение вдоль меридиана.

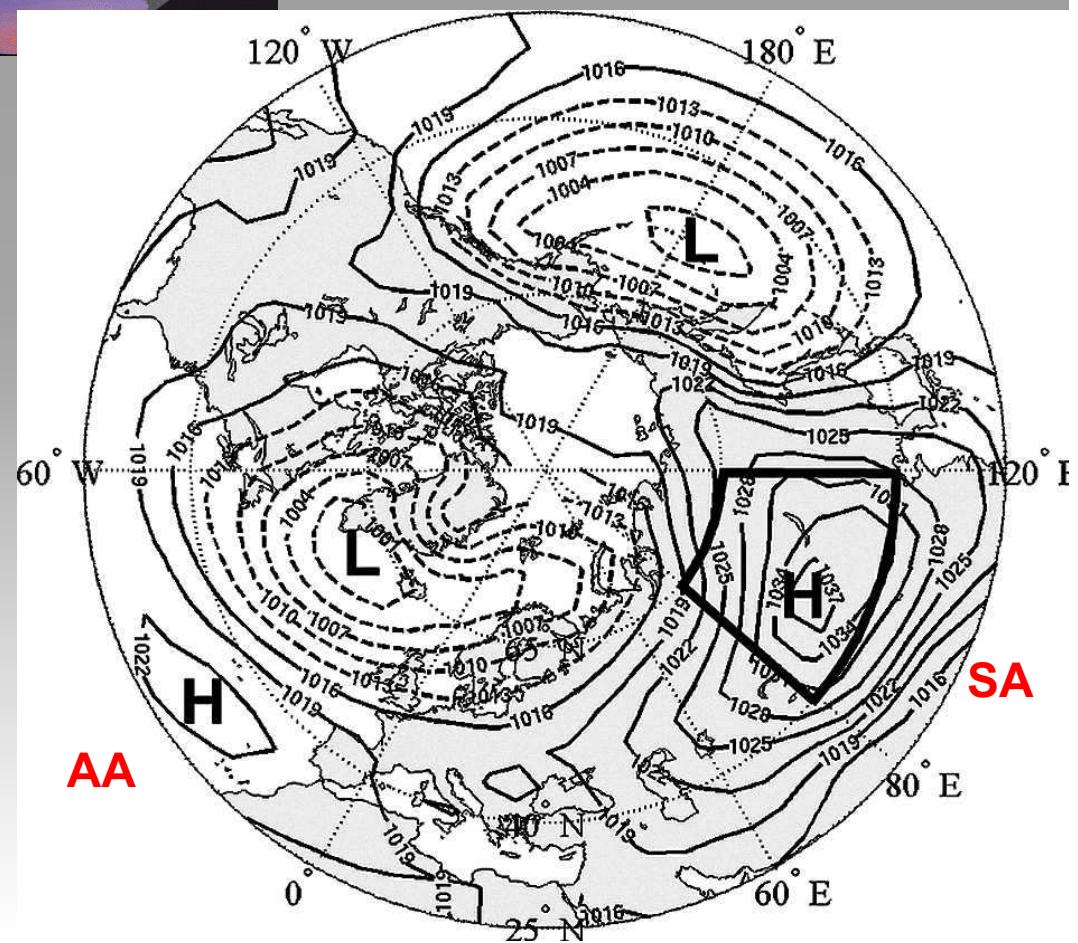


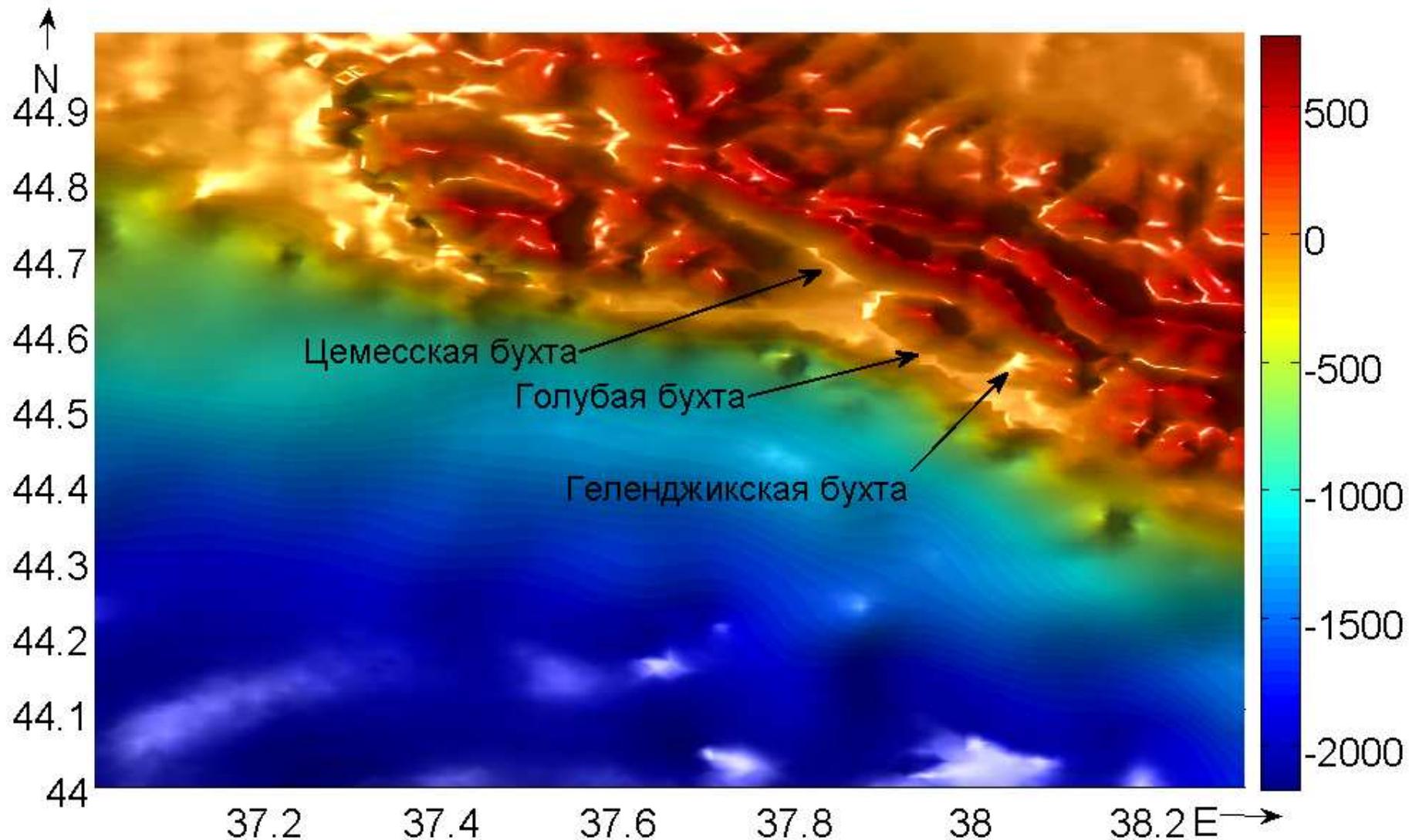
*Schematic circulations over the Northern Hemisphere in winter. The intertropical convergence zone (ITCZ) lies entirely north of the Equator in the summer. Eastward acceleration in the upper-level tropical airstream is due to Earth rotation and generates the subtropical jet stream (STJ). The vertical section (right) shows the dominant meridional circulation in the tropics and shows airstreams relative to the polar front in middle latitudes. <http://www.answers.com/topic/atmospheric-general-circulation>*





**NCP**





Северо-восточная часть Черного моря.  
Рельеф земной поверхности и дна моря.

## **2.2 Море.**

1. Представляющая интерес Северо-восточная часть Черного моря охватывает акваторию на площади  $43\text{--}45.5^{\circ}\text{N}$ ,  $36.5\text{--}39^{\circ}\text{E}$ , от Керченского пролива до Адлера, вдоль побережья (Рис.2). Береговая линия проходит примерно с юго-восток на северо-запад, в генеральном направлении. Континентальный шельф в этом районе очень узкий и занимает полосу щириной не более 5-7 морских миль. К северу от  $44.7^{\circ}\text{N}$ , шельф становится гораздо шире. Континентальный склон параллелен береговой линии и мало изменяется в этом направлении. Напротив, по нормали к берегу склон достаточно крутой: глубины увеличиваются от 100 м до 2200 метров на расстоянии порядка 35 морских миль. На суше, параллельно береговой линии располагаются несколько горных хребтов, которые состоят из невысоких гор, с высотами (не более  $\sim 600$  м над уровнем моря (Рис.2). В цепи гор встречаются ущелья, по которым континентальный северный воздух в виде узких струй постоянно втекает в прибрежную область суши и моря.
2. Вытянутость всех орографических структур и рельефа дна в направлении под углом примерно  $-56^{\circ}$  по азимуту существенным образом определяет региональную динамику атмосферы и моря. В частности, типичный для района северо-восточный ветер ("норд-ост") возникает в результате перетекания более холодного(зимой) и более теплого(летом) северного равнинного воздуха через ущелья в цепи гор(слабый норд-ост) и поверх гор(сильный норд-ост). Норд-ост, как правило, сменяется юго-восточным ветром, направленным вдоль береговой линии. Анизотропия ветрового режима хорошо заметна на рис.2.
3. Реакция морской среды на анизотропные атмосферные воздействия усиливается в условиях дополнительной геометрической анизотропности бассейна, обусловленной конфигурацией береговой линии, шельфа и континентального склона. Вертикальная и горизонтальная адвекции вод ограничены по возможным направлениям и усиливаются по модулю. Вследствие этого, по-видимому, динамические процессы в этой части Черного моря в широком диапазоне режимов и масштабов очень чувствительны к атмосферным воздействиям, что хорошо известно (Зацепин,Флинт,2002,[3]). В сборнике приведены некоторые примеры атмосферных "событий" и их гидрофизических следствий, таких как усиление и ослабление Основного черноморского течения, изменения вихревого поля, "следы" Новороссийской боры в открытом море, прибрежные апвеллинги и другое.

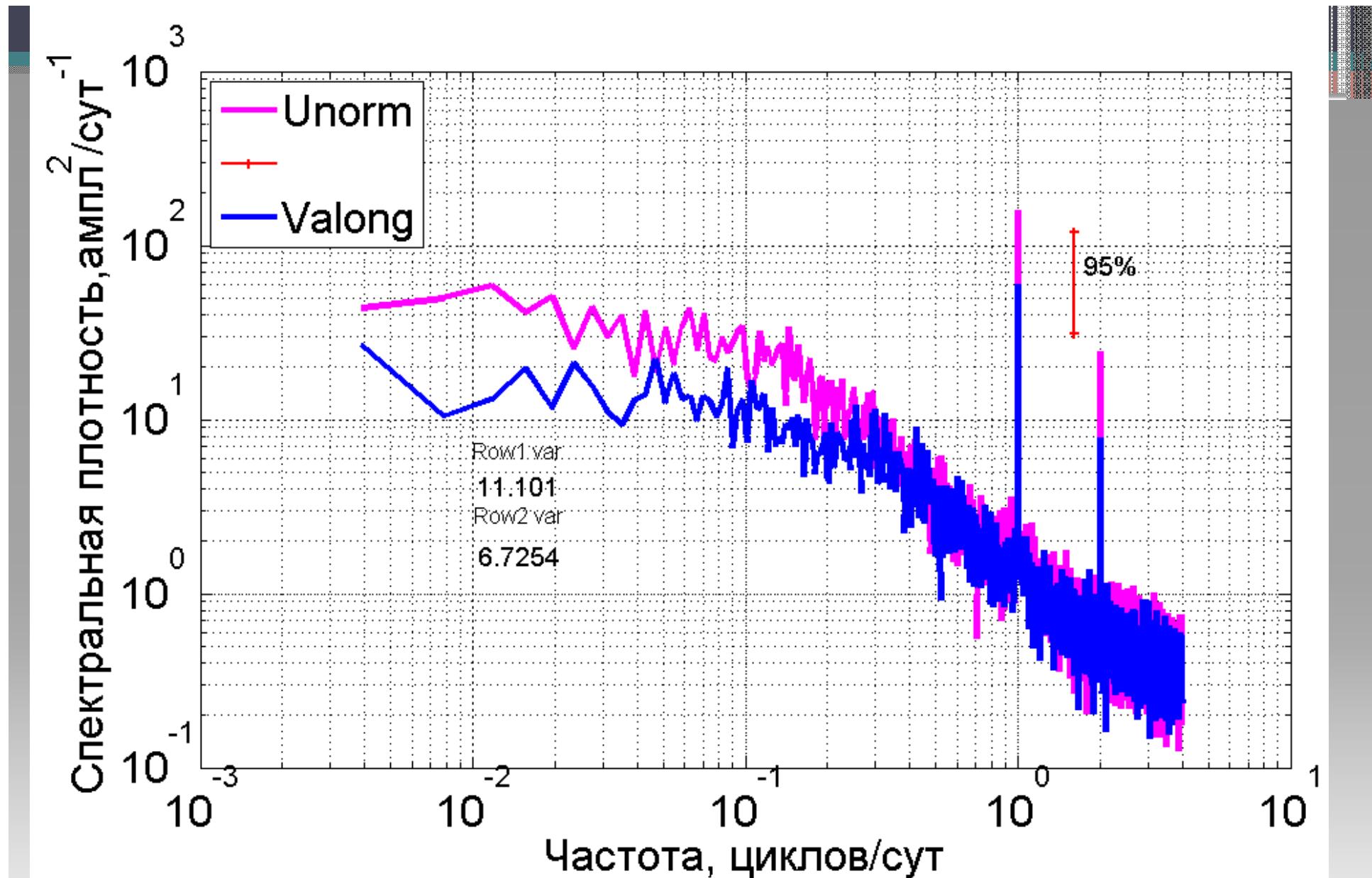
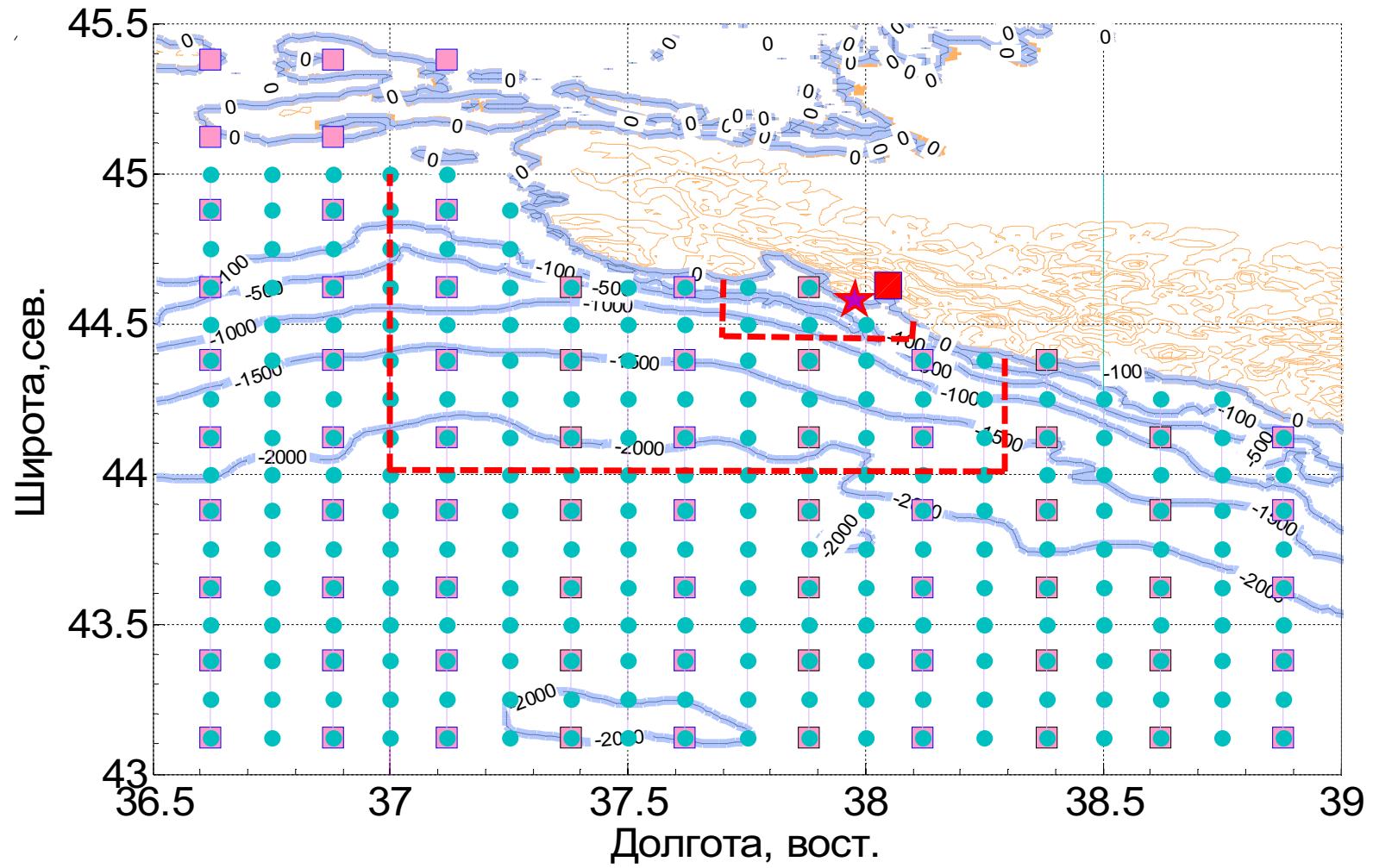


Иллюстрация анизотропности ветра. Спектральные плотности вдоль береговой и нормальной к береговой линии компонент ветра, по временному ряду 1980-2009 гг., метеостанции Геленджика, дискретность отсчётов – 3 часа.



## Район исследований.

### Условные обозначения:

красная звездочка – причал ИО РАН ( $44.575^{\circ}\text{N}$ ,  $37.979^{\circ}\text{E}$ , Голубая бухта, г.Геленджик);

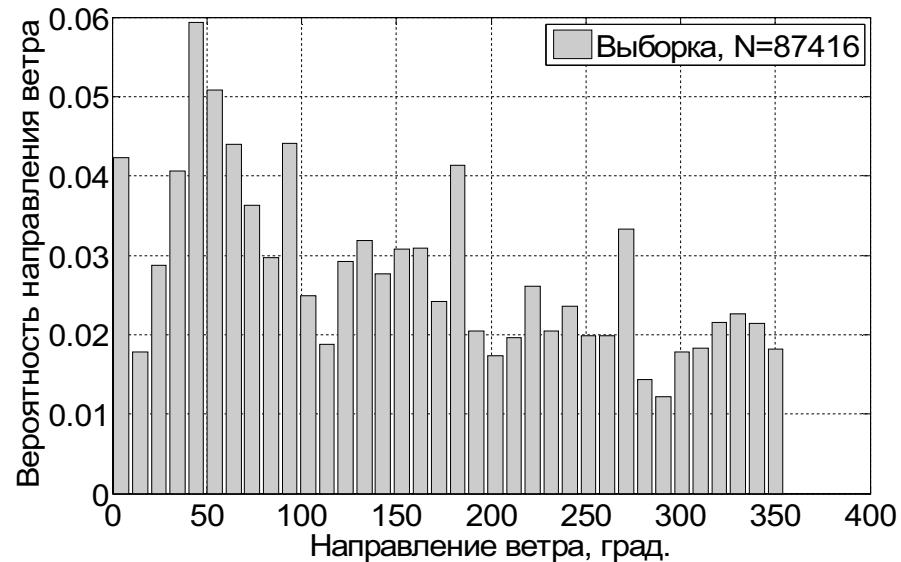
красный квадрат – метеостанция ( $44.55^{\circ}\text{N}$ ,  $38.05^{\circ}\text{E}$ , г.Геленджик);

розовые квадраты - ряды спутниковой температуры поверхности моря(1985-2008г.г., nightly SST, AVHRR, NOAA);

голубые точки - ряды аномалий уровня моря (Black Sea MSLA, AVISO products);

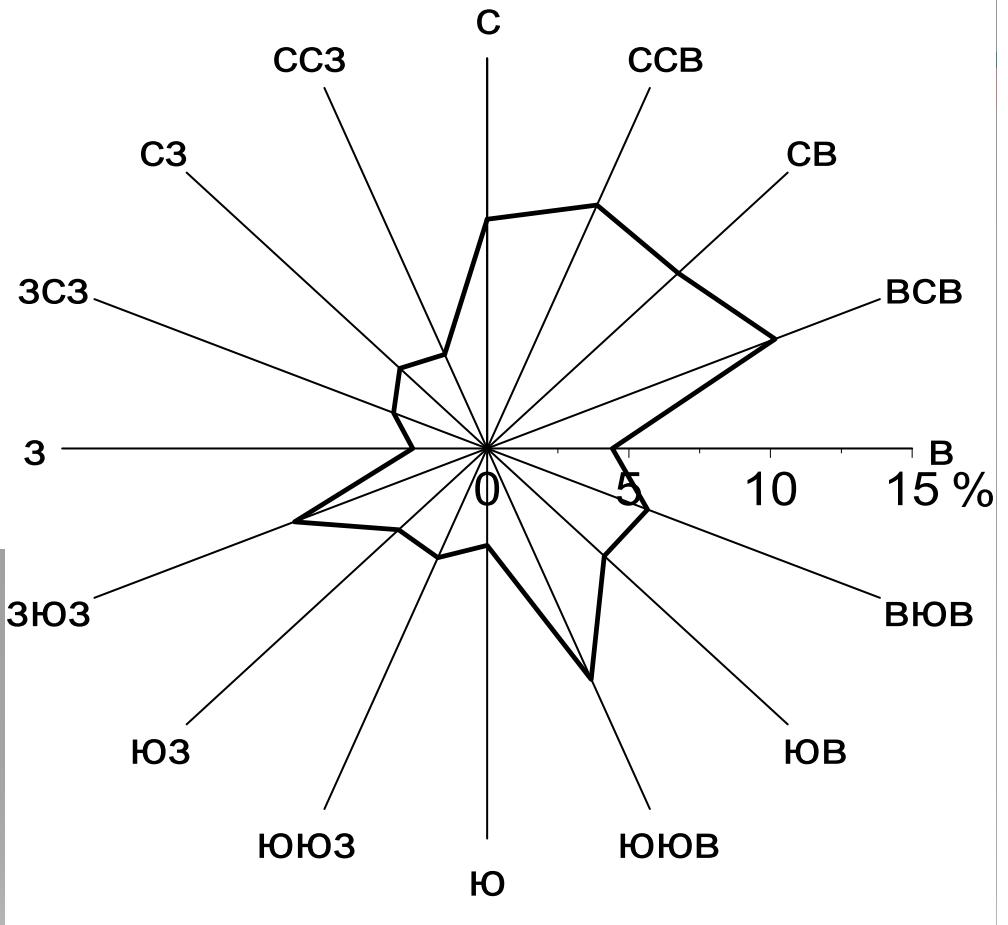
голубые линии - изолинии глубины моря (в метрах); оранжевые линии- изолинии (без оцифровки) прибрежного рельефа суши; штриховые красные линии отмечают три Полигона.

### 3.1. Вероятностные и спектральные характеристики.



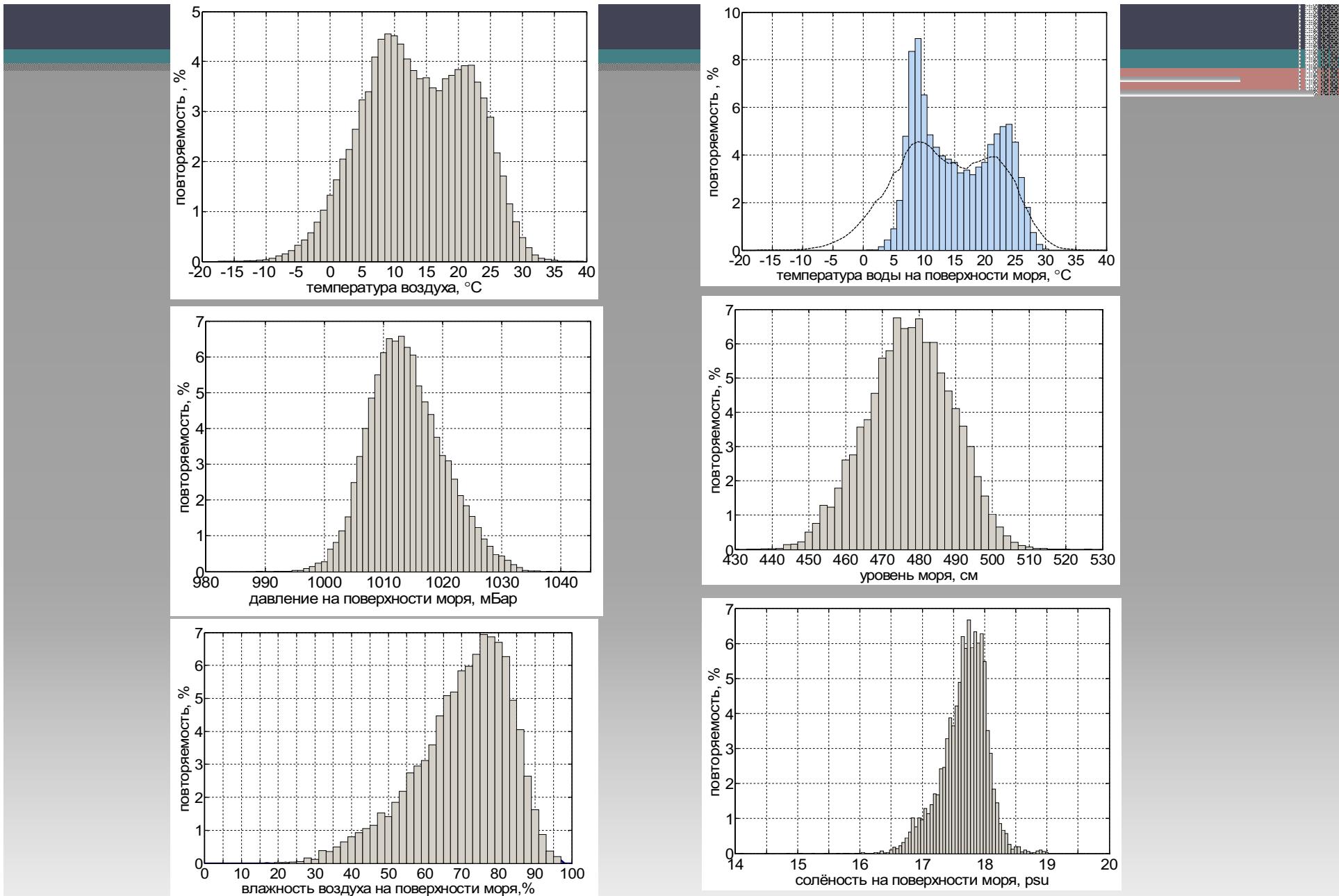
## Гистограмма направлений ветра на метеостанции г. Геленджика за период 1968-2011 гг.

Азимут максимума, град.	Диапазон распределения, град.	Вероятность направления ветра, %
45 ±5	10-110	40
135±5	110-200	25
225±5	200-280	20
315±5	280-370	15

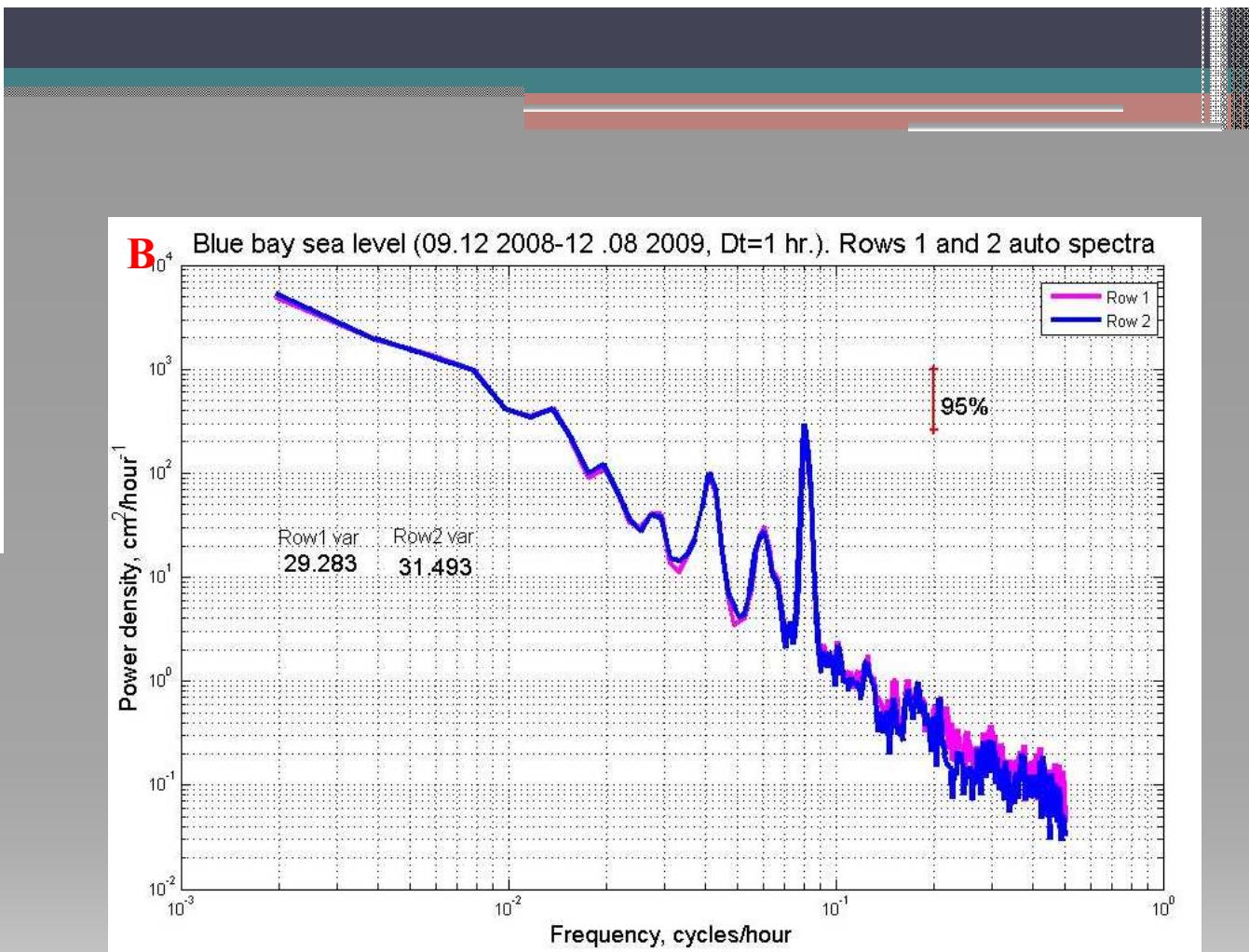
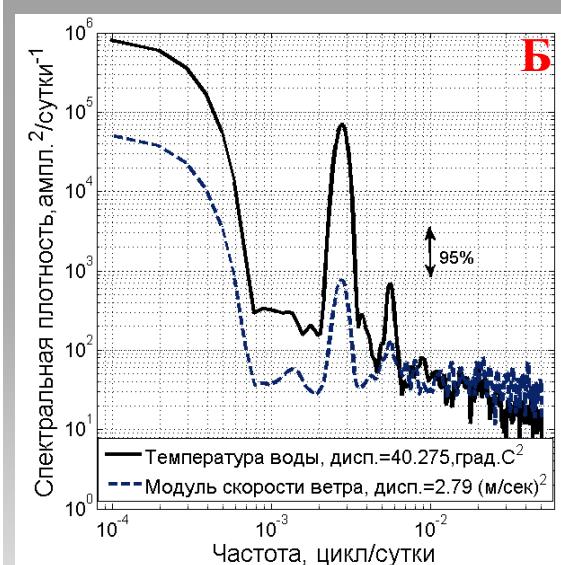
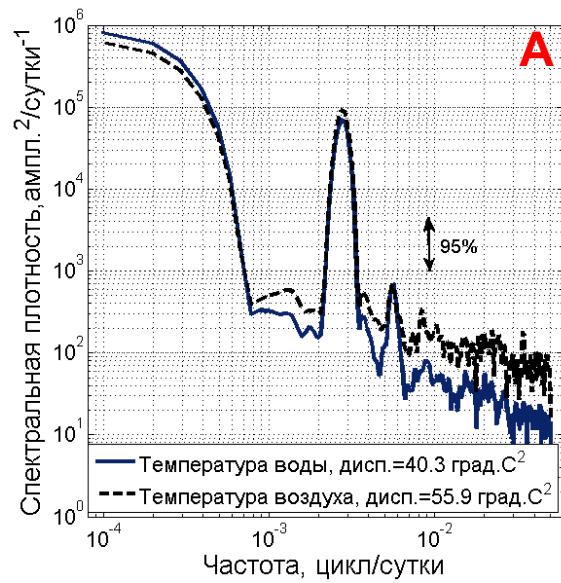


Повторяемость направления ветра по 16 румбам за период 1980 - август 2010 г. и основные румбы направлений С (337.5-0-22.5°), СВ (22.5-45-67.5°), В (67.5-90-112.5°), ЮВ (112.5-135-157.5°), Ю (157.5-180-202.5°), ЮЗ (202.5-225-247.5°), З (247.5-270-292.5°), СЗ (292.5-315-337.5°).

Повторяемости основных направлений ветров. Максимумы 4x- модального распределения перечислены в направлении убывания вероятности.

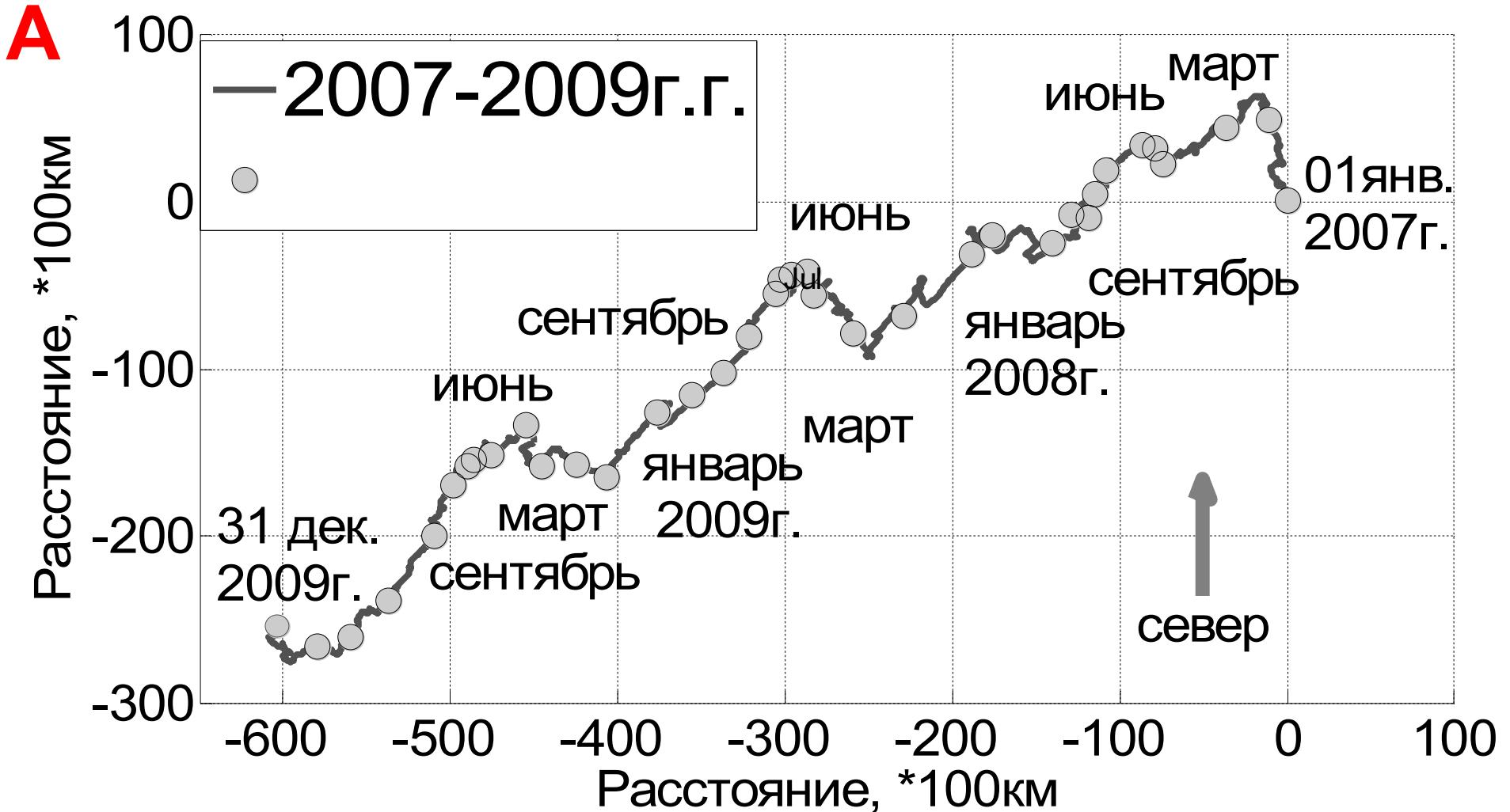


Гистограммы метеопараметров по измерениям  
на метеостанции г. Геленджика.



**Спектральные плотности:** А-температуры поверхности моря и температуры воздуха; Б-температуры воды и модуля скорости ветра; оба спектра по 10-дневным данным в период 1938-2009 гг., дисперсии ТПМ, температуры воздуха и модуля скорости ветра –  $40.3 (\text{°C})^2$ ,  $55.9 (\text{°C})^2$ ,  $2.8 (\text{м/c})^2$ , соответственно. В-спектральная плотность колебаний уровня моря в Голубой бухте ( $44.58^\circ\text{N}$ ,  $37.98^\circ\text{E}$ ) в период с декабря 2008 по август 2009 г. по измерениям датчиком давления через 1 час, дисперсия- $31.5 \text{ см}^2$ .

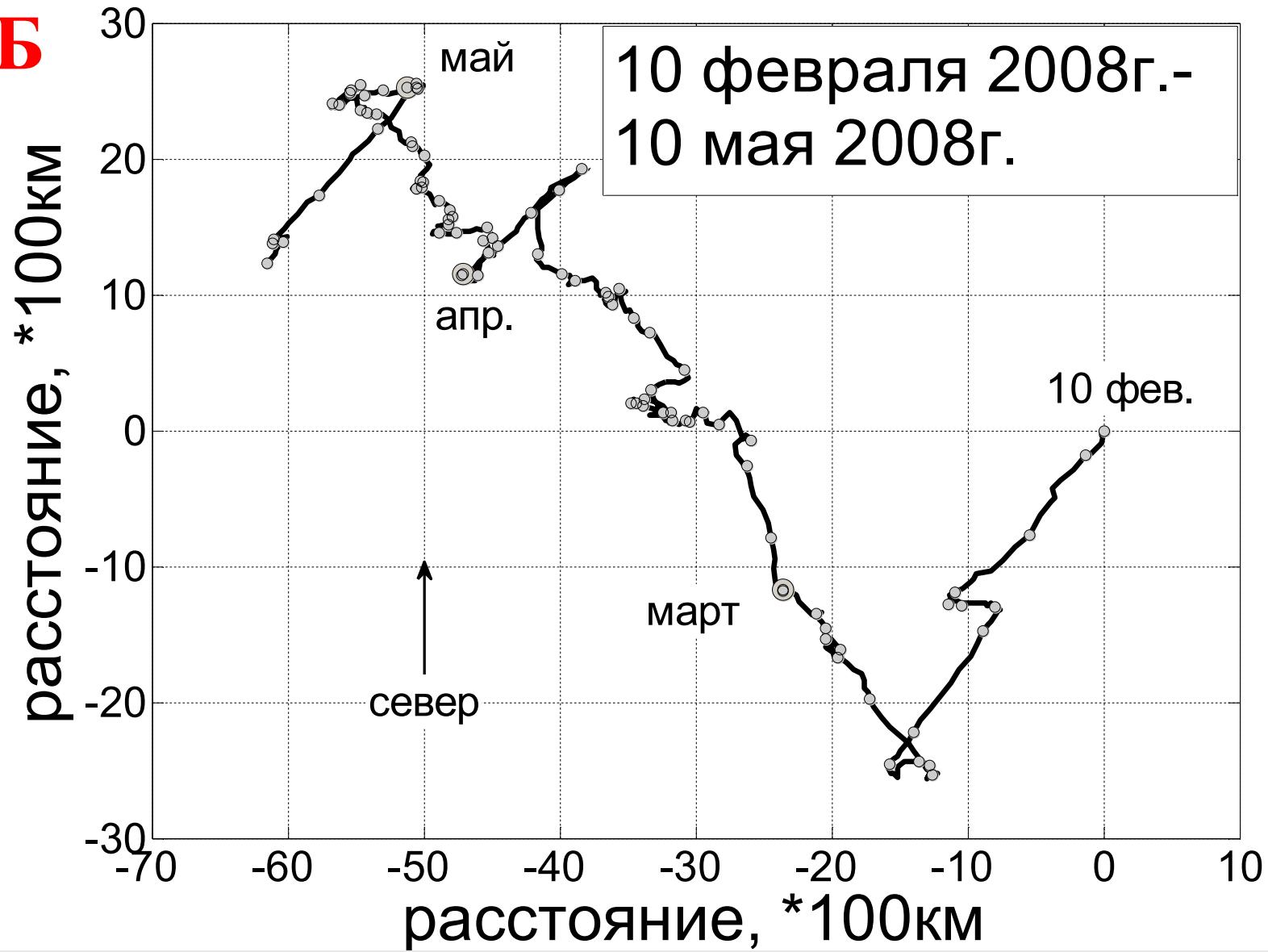
### **3.2. Элементарные ветровые циклы и признаки самоподобного случайного процесса.**



Прогрессивные векторные диаграммы ветра:

**А** - характерные сезонные циклы по годам (2007 – 2009 гг.); **Б** - первая фаза ЭЦ - ЮВ ветер; **В** - вторая фаза ЭЦ – переходный период слабых ветров разных направлений; **Г** - третья фаза ЭЦ - СВ ветер; **Д** - пример близовых колебаний в переходный период;. **Е** - долговременные годовые изменения ветра.

**Б**



**Б** - первая фаза ЭЦ - ЮВ ветер

**В**

расстояние, \*100км

17 июня 2008г.-  
28 июля 2008г.

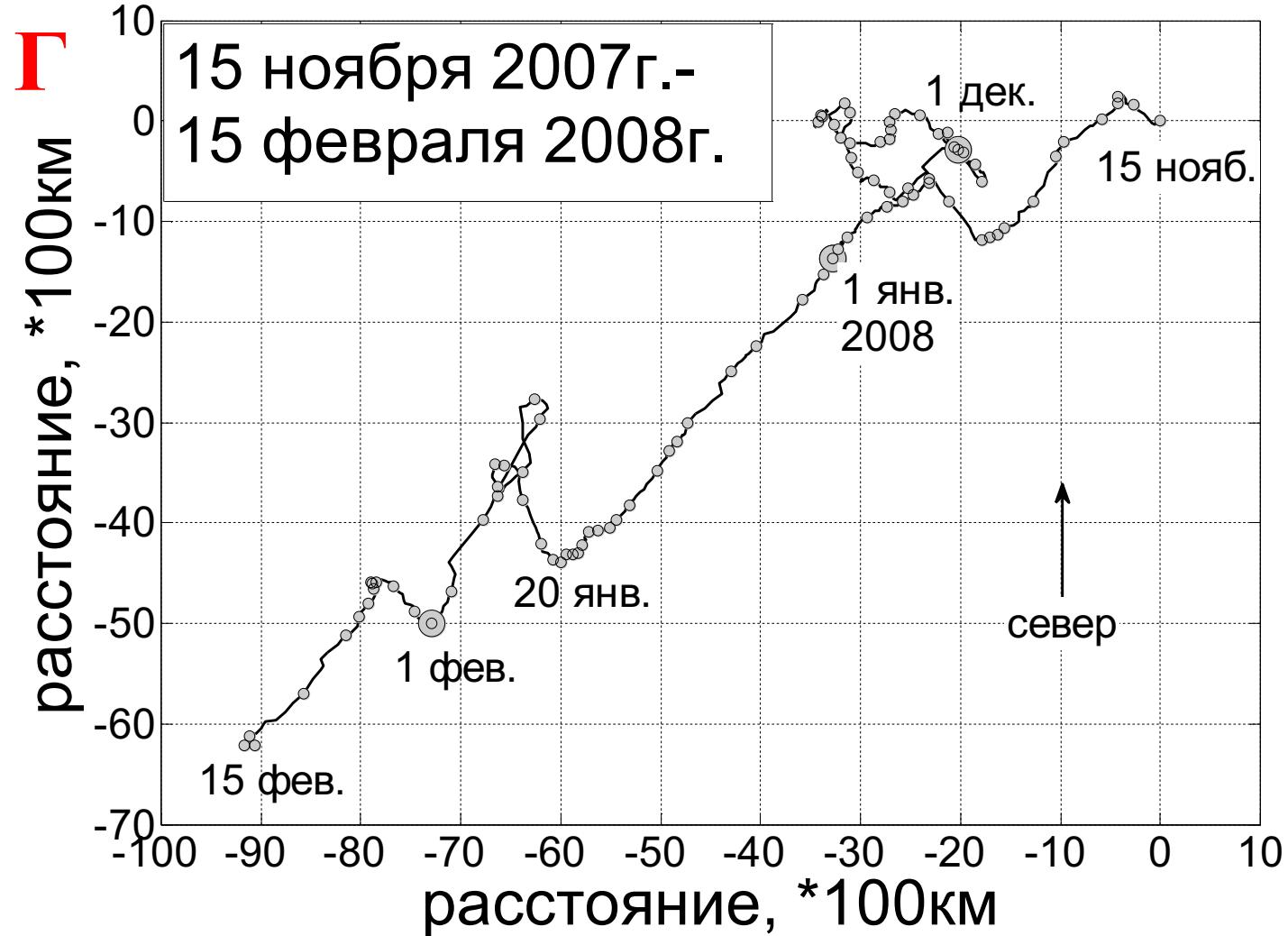
север

1 июля

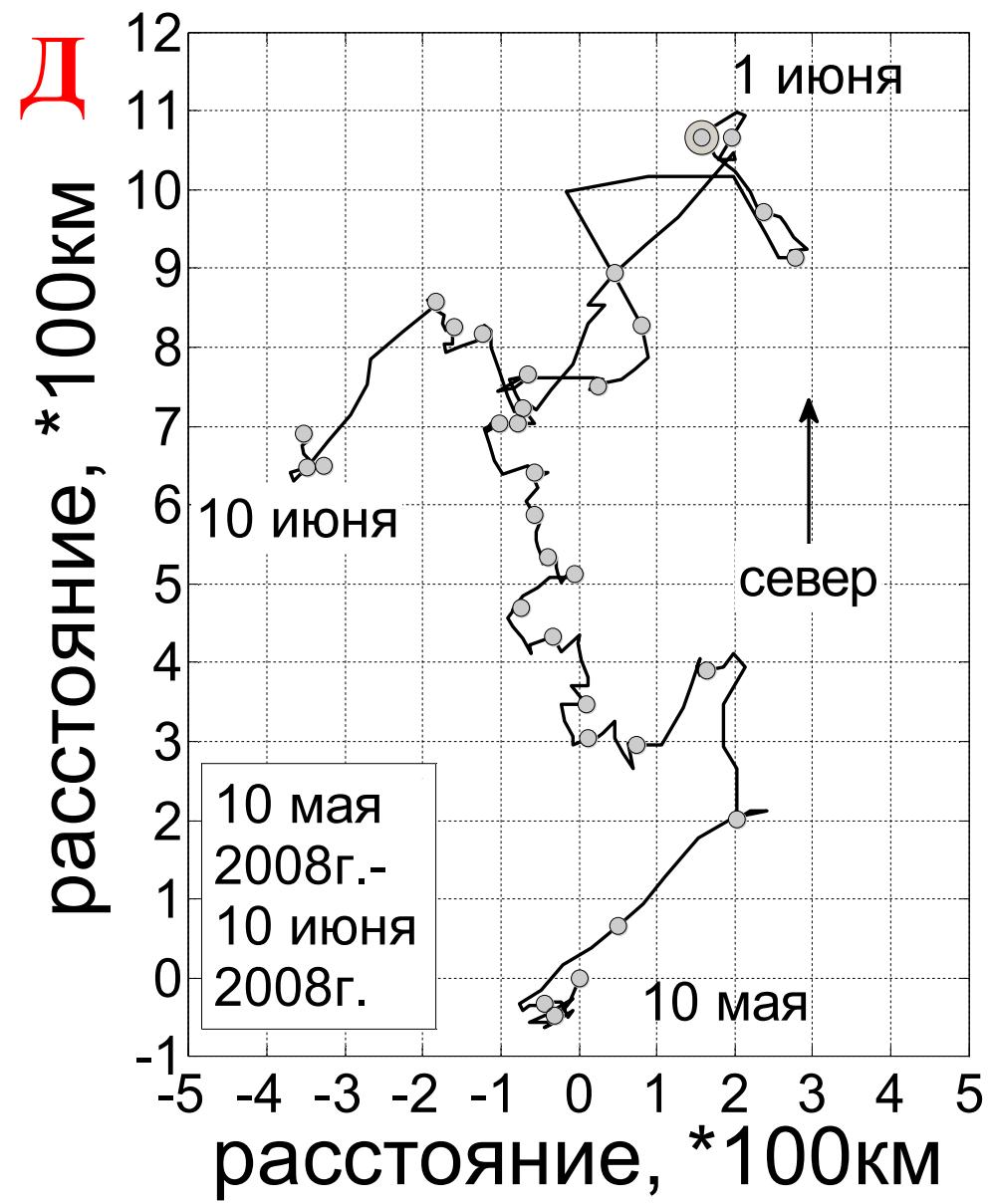
28 июля 17 июня

расстояние, \*100км

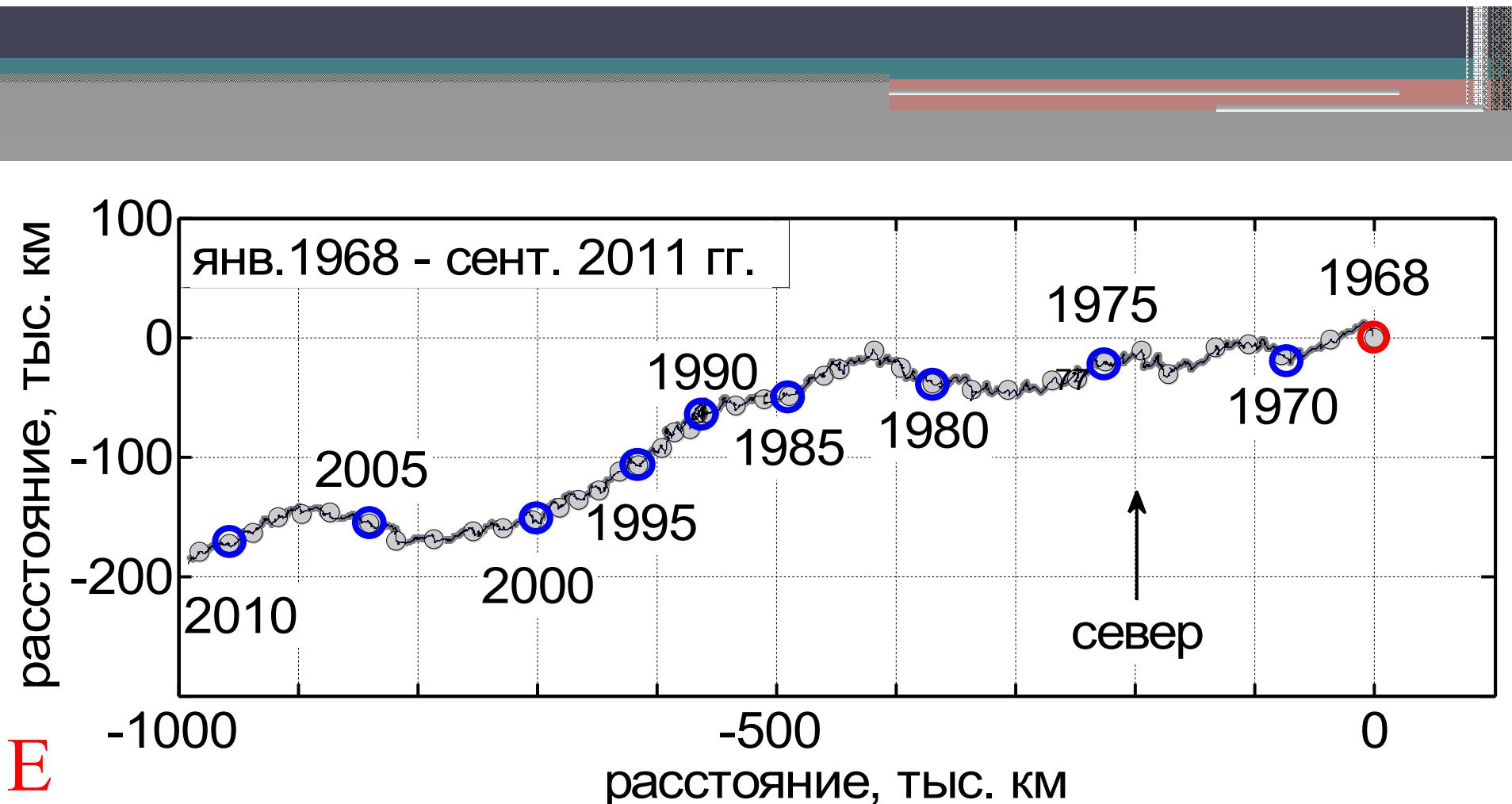
**В** - вторая фаза ЭЦ – переходный период слабых ветров разных направлений;



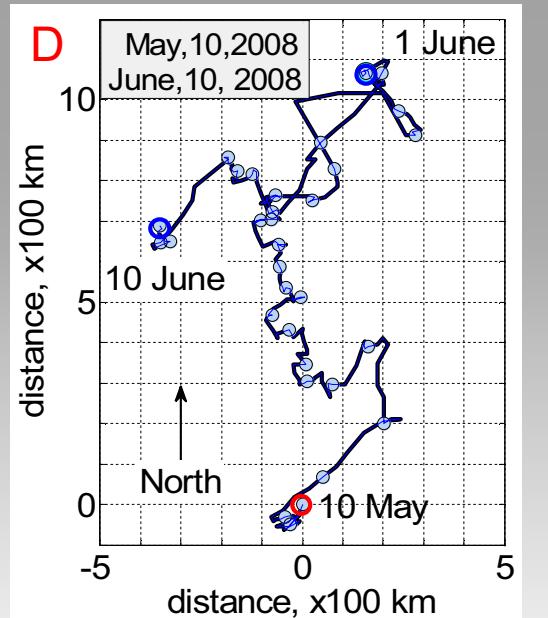
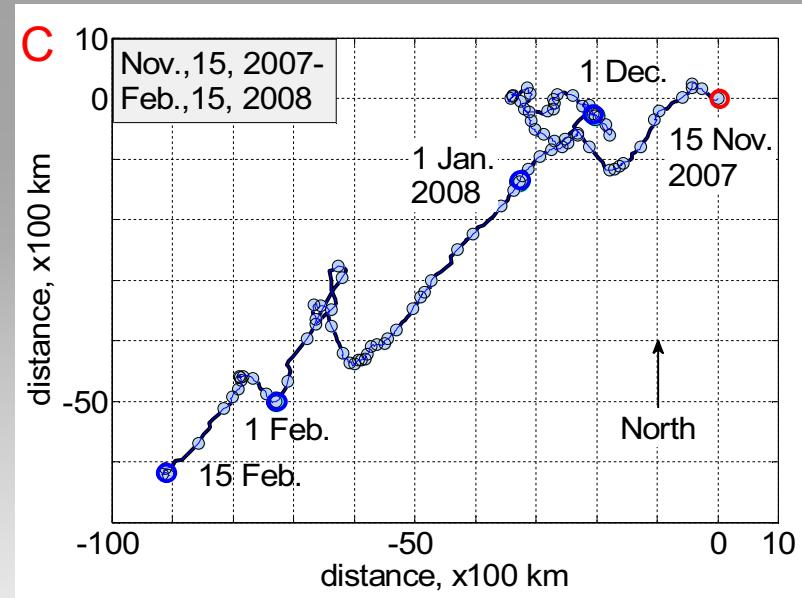
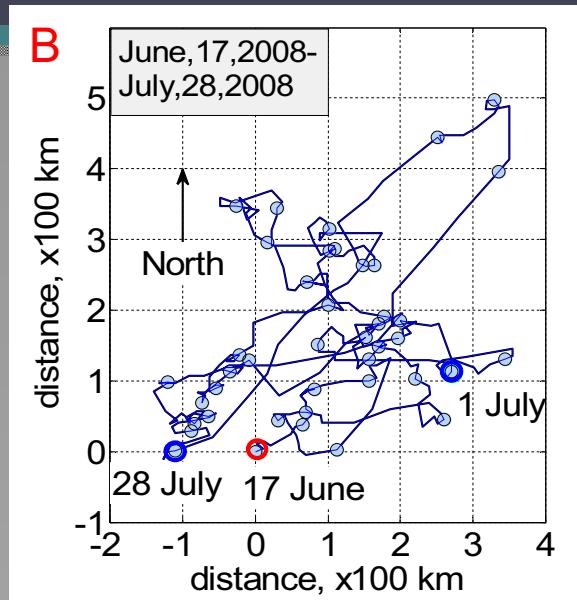
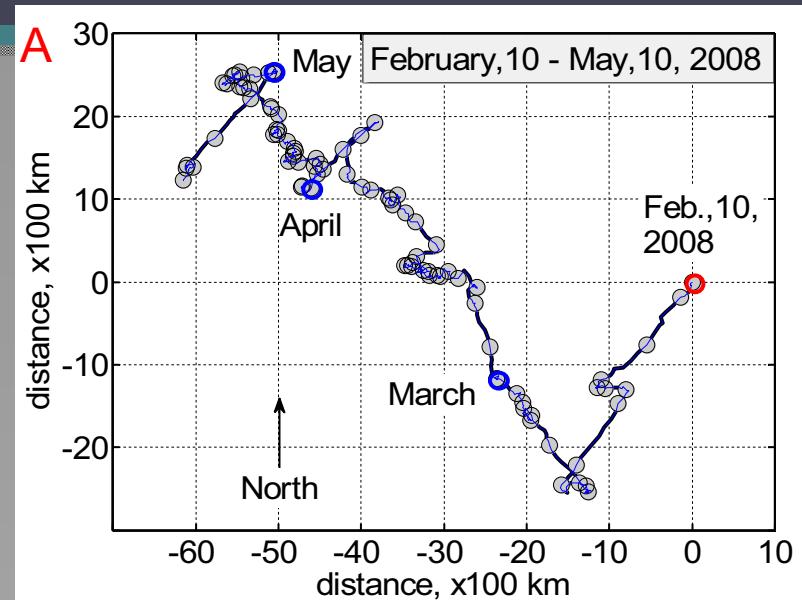
Г - третья фаза ЭЦ - СВ ветер; Е - пример близовых колебаний в переходный период.



**Д** - пример бризовых колебаний в переходный период.

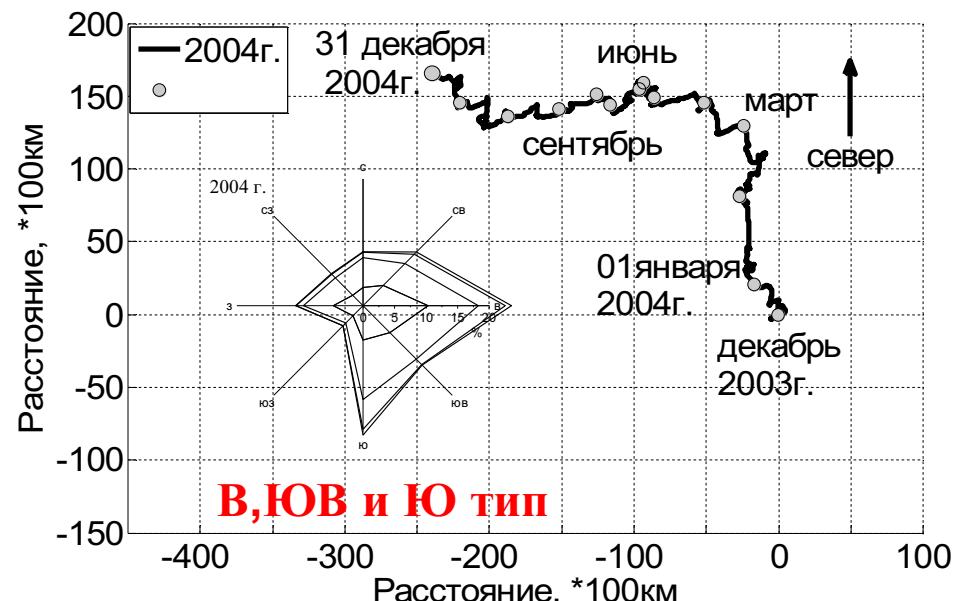
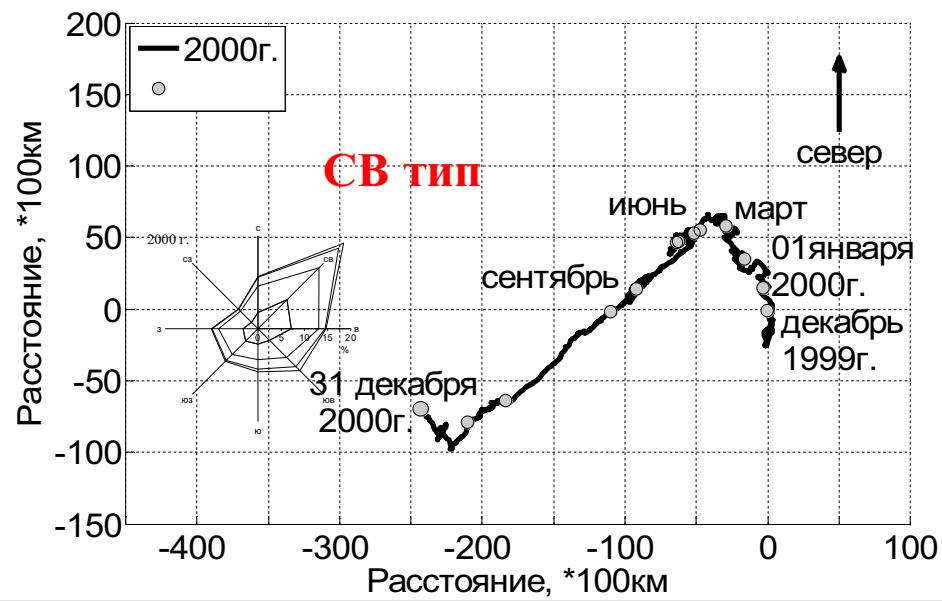
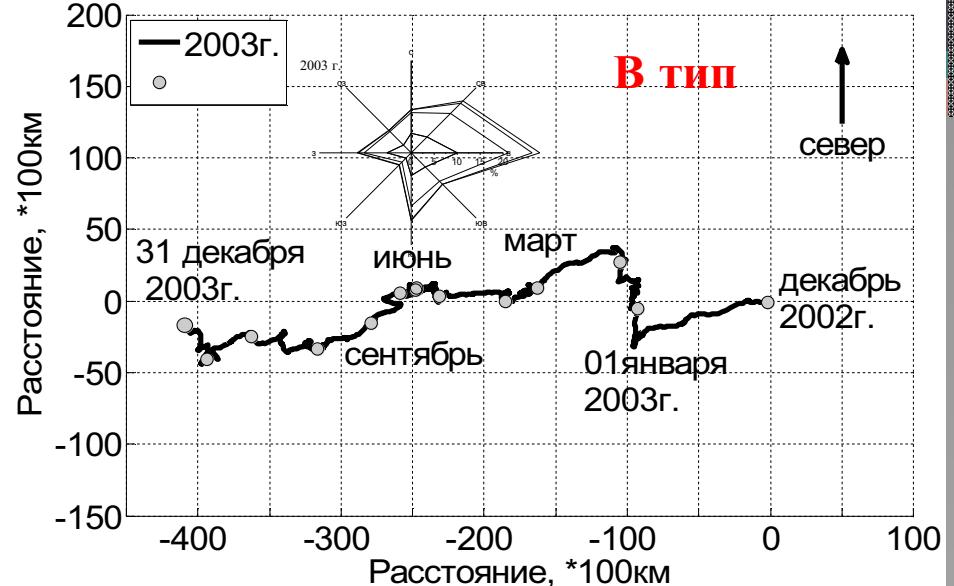
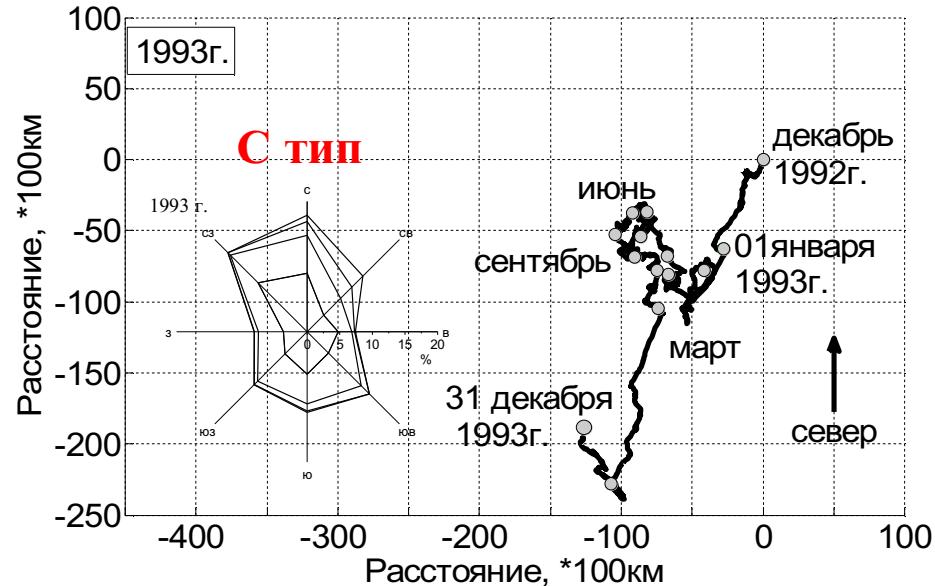


E - долговременные изменения ветра – климатические ЭЦ.

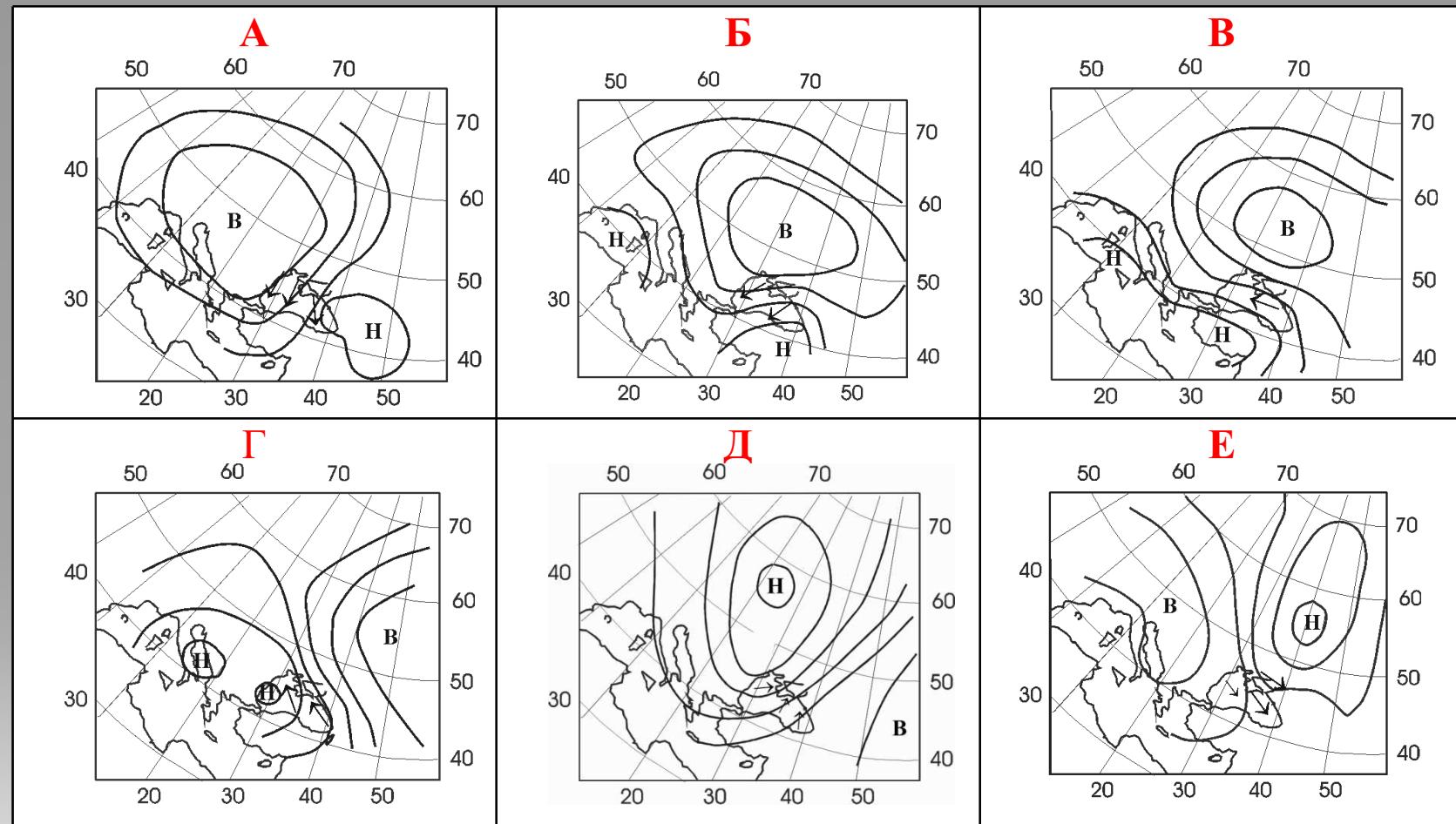


**Fig. 9.** **A**- first phase of the EC(SE wind); **B** - second phase of the EC (the transitional period of weak winds in different directions), **C** - the third phase of the EC (NE winds), and **E** - transition period breeze fluctuations.

### 3.3 Соотношение доминирующих ветров и типовых атмосферных барических полей.

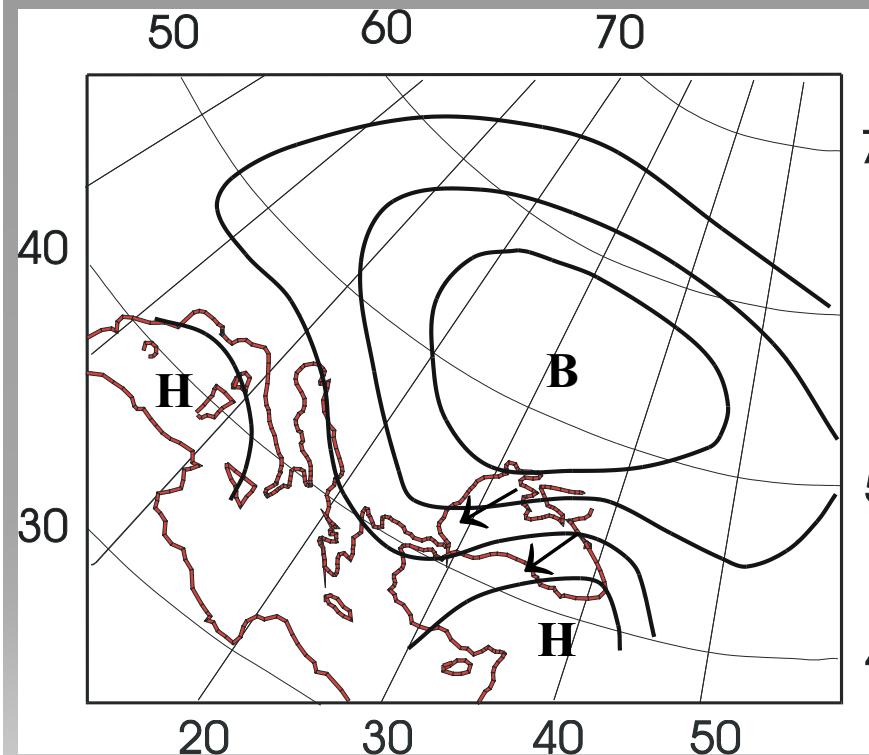


Характерные типы ветрового режима за период 1980 - 2010 гг. и прогрессивные векторные диаграммы ветра по выделенным типам преобладающего ветра.

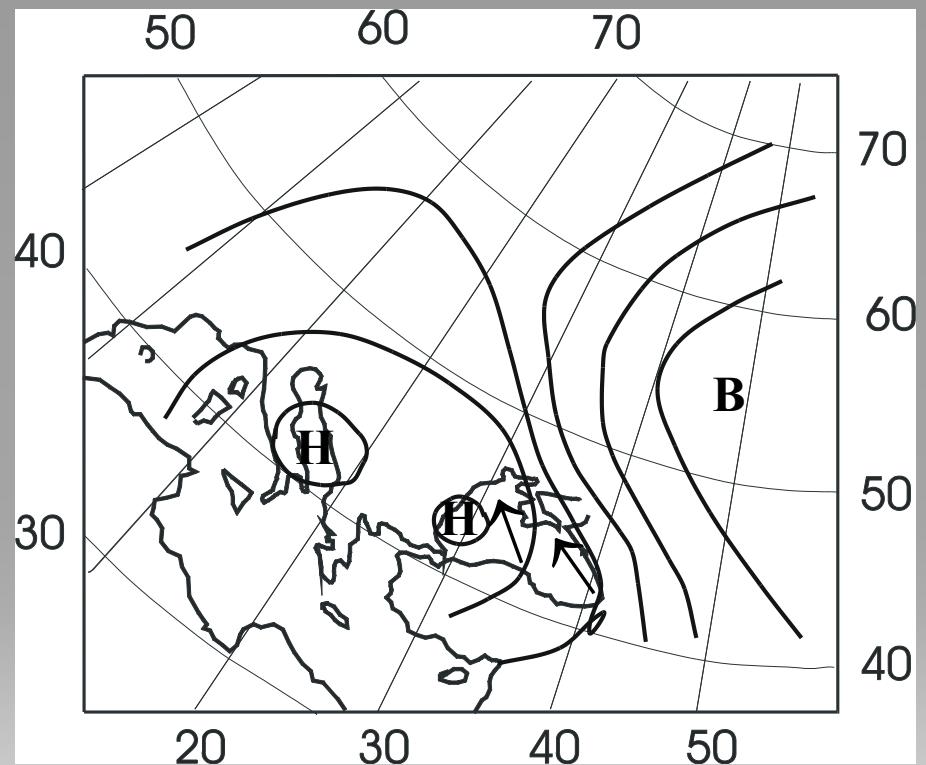


**Рис. 8.** Типовые поля атмосферного давления по основным типам ветровой обстановки: А - северный (С), Б - северо-восточный (СВ), В - восточный (В), Г - юго-восточный (ЮВ), Д - юго-западный (ЮЗ), Е – северо-западный (СЗ)[1].

СВ

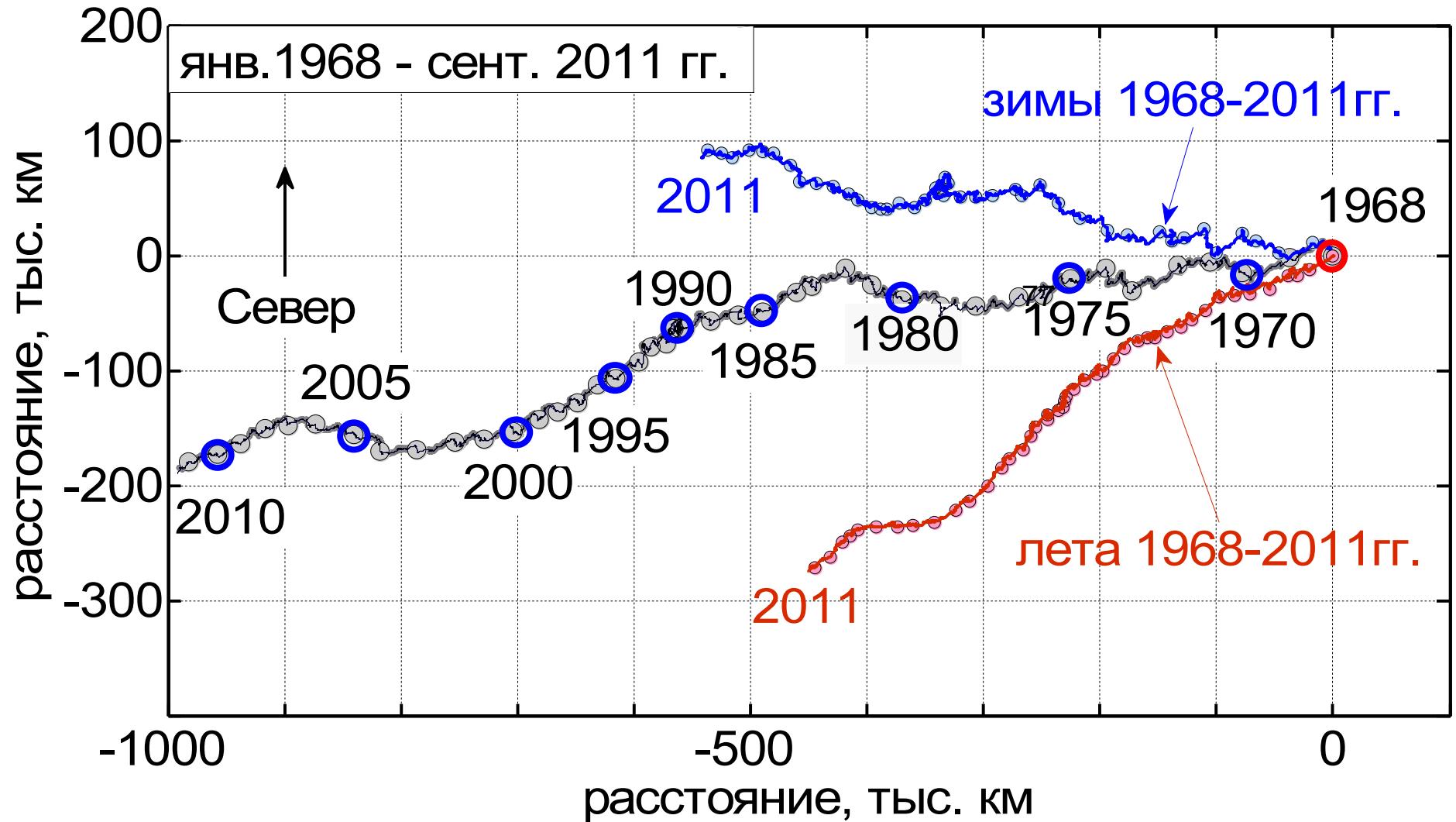


ЮВ

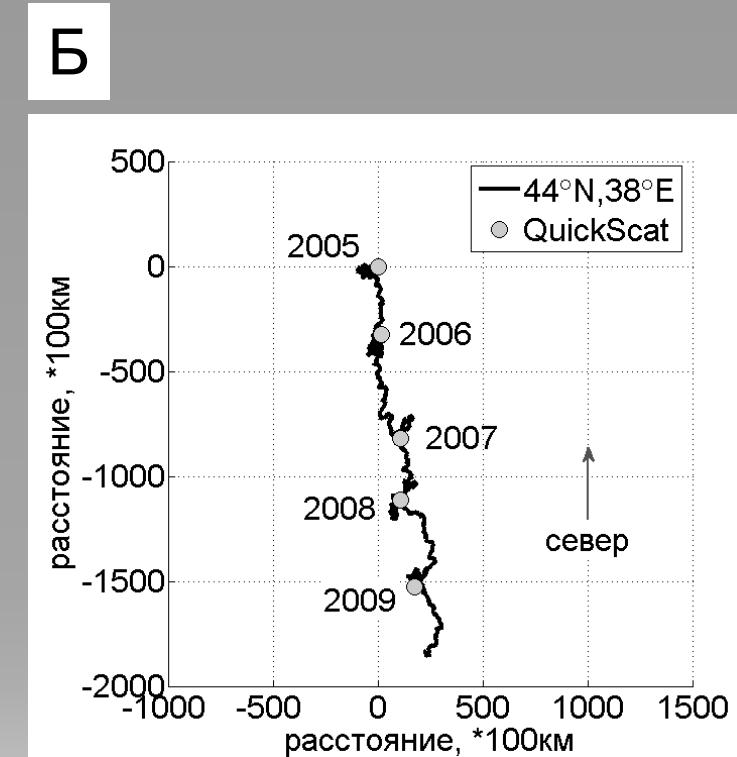
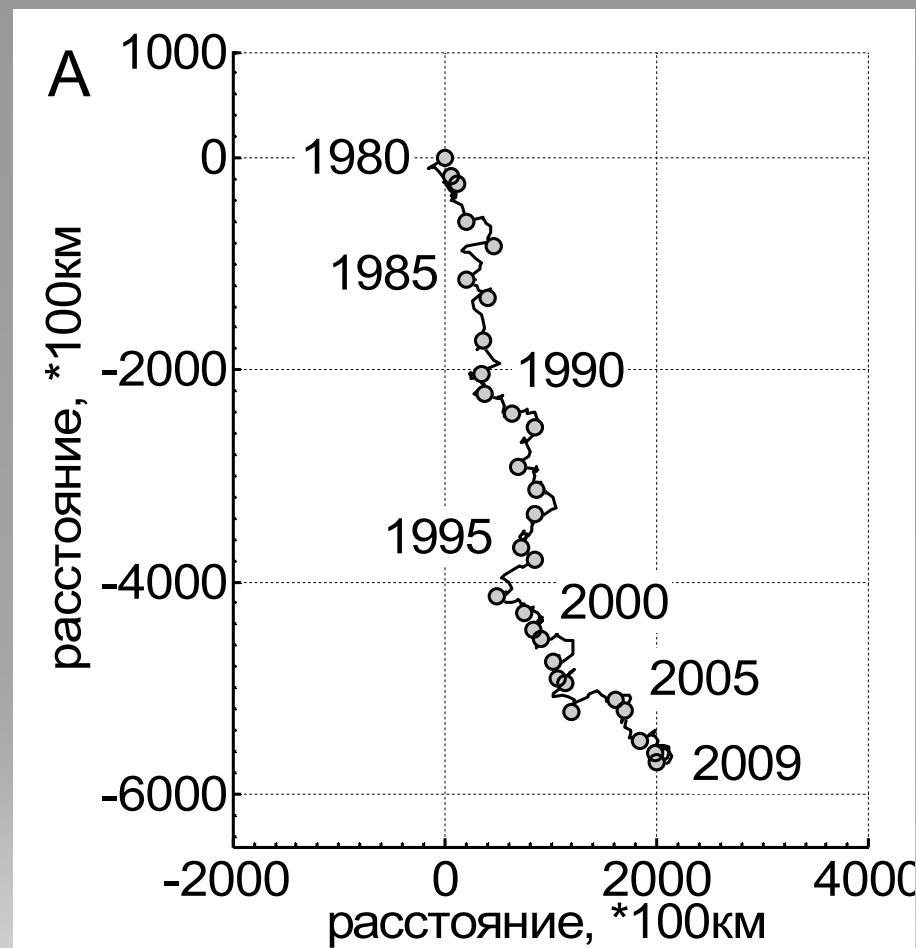


Преобладающие в северо-восточной части Черного моря  
барические поля .

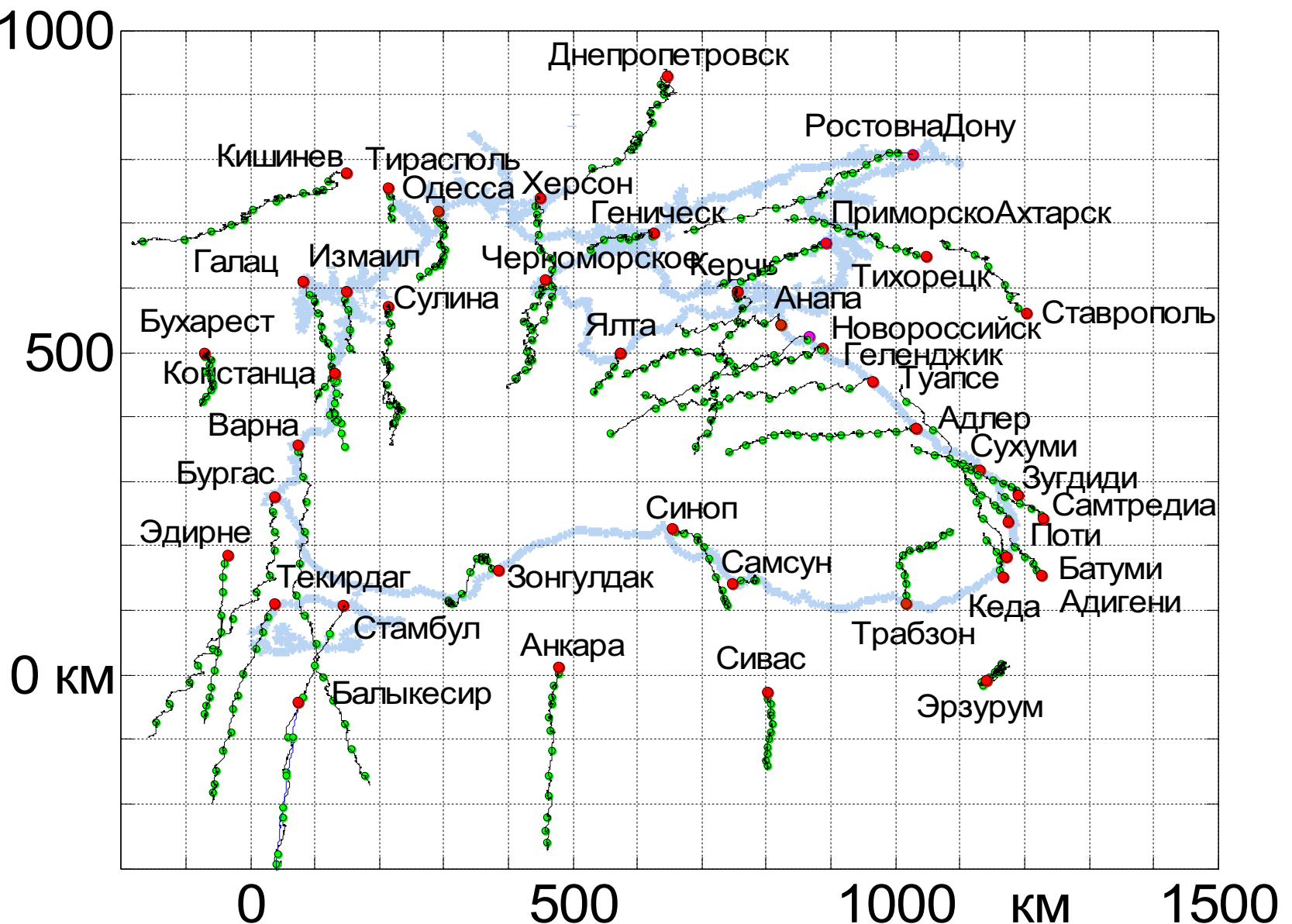
### **3.4 Долговременные ветровые циклы над Черным морем**



Прогрессивные векторные диаграммы ветра на метеостанции Геленджика.  
Долговременные изменения ветра. Показаны сезонные ветры.



Прогрессивные векторные диаграммы ветра: А - по данным реанализа(NCEP/NCAR) в квадрате 44-45°N, 37.5-38.5°E; Б - по спутниковым данным QuickScat в точке 44.0°N, 38.0 °E



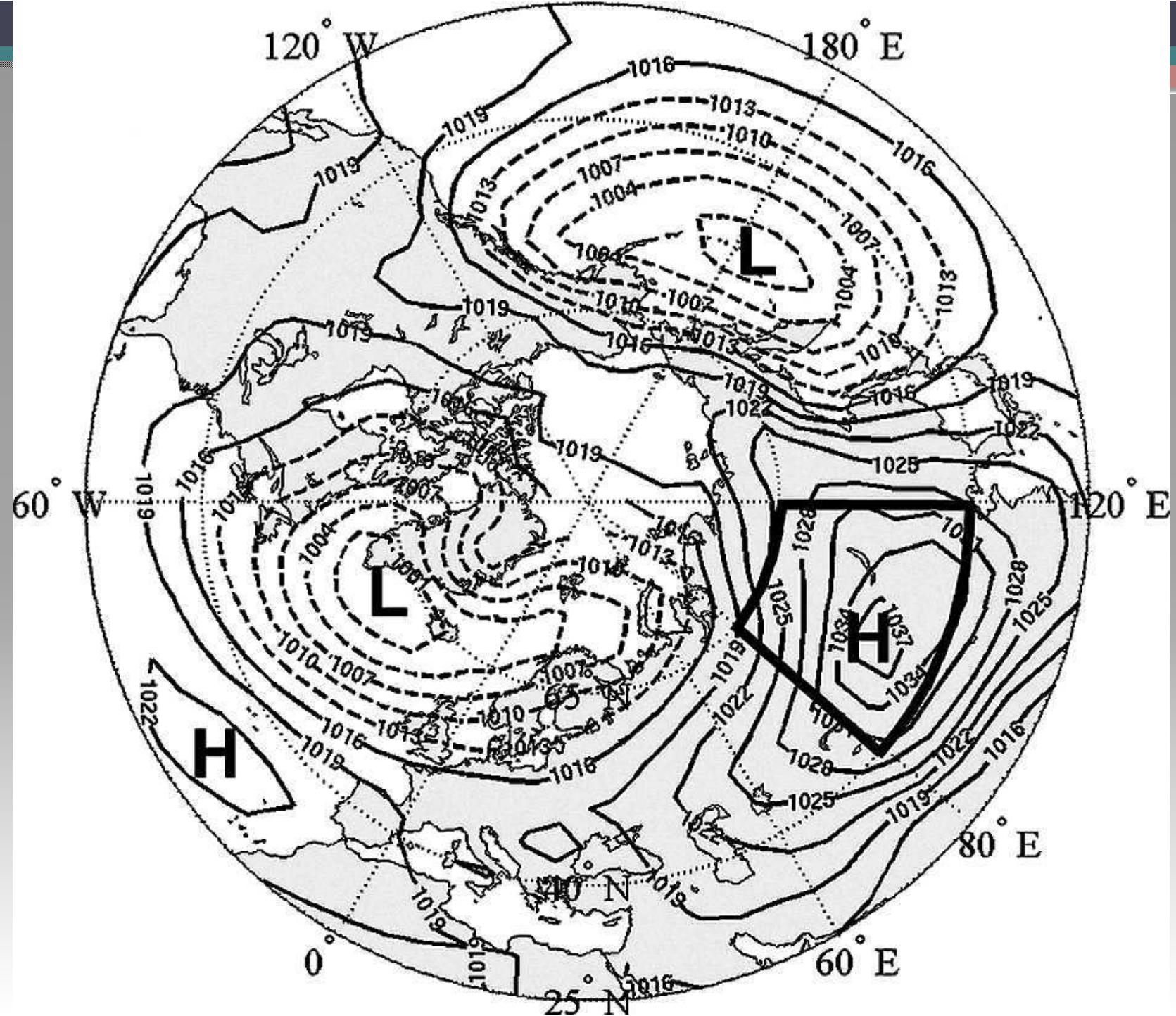
Прогрессивные векторные диаграммы ветра по данным черноморских прибрежных метеостанций. Диаграммы построены в масштабе: 1 деление шкалы расстояний=1000 км. Зелёные кружки отмечают годы. Красные кружки отмечают местоположение метеостанции и начало каждой диаграммы Серая линия- линия побережья на уровне 0 метров.

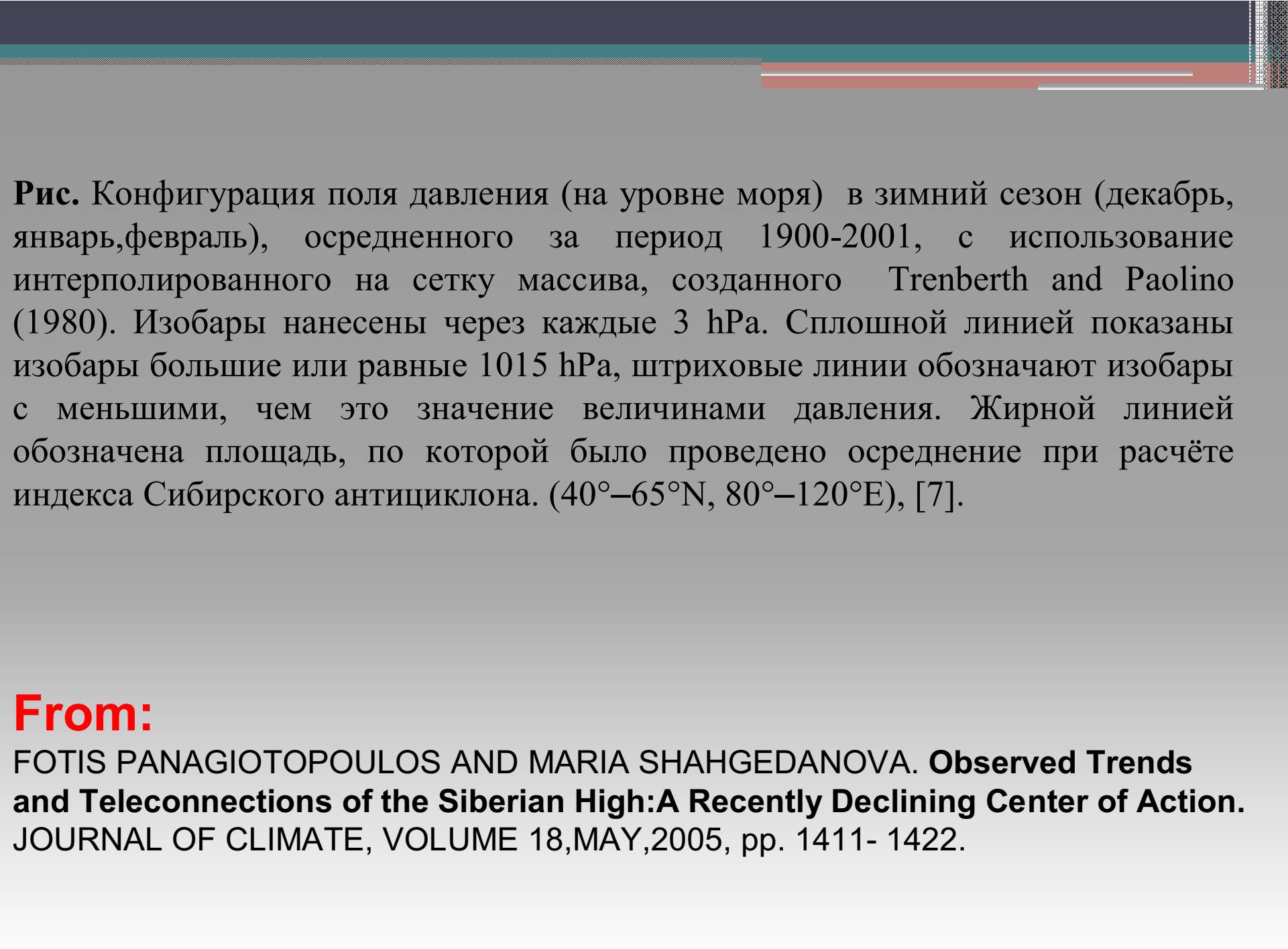
Meteorological station	Station WMO #	Latitude, North	Longitude, East	Station height over sea level, m	Period of measurements, yyyy,mm,dd
Anapa	37001	44°53'	37°17'	32	1998.11.26-2004.06.15
Novorossiysk	37006	44°43'	37°50'	3	1998.11.26-2004.06.15
Gelendzhik	37004	44°34'	38°05'	27	1967.12.31-2011.09.31
Tuapse	37018	44°06'	39°04'	41	2000.03.09-2011.07.25
Adler	37171	43°26'	39°54'	13	1998.11.26-2011.08.06
Suhum	37260	42°52'	41°07'	116	1998.11.26-2004.06.16
Zugdidi	37260	42°31'	41°53'	118	1998.11.26-2004.06.16
					2008.03.14-2011.07.25
Samtredia	37385	42°11'	42°22'	26	2000.03.09-2004.06.15
Poti	37379	42°08'	41°40'	1	2000.03.09-2004.06.15
Batumi	37484	41°39'	41°38'	6	1998.11.26-2004.06.16
					2009.05.30-2011.07.22
Adigeni	37507	41°23'	42°19'	2030	2000.03.09-2004.06.15
Keda	37497	41°22'	41°34'	256	2000.03.09-2004.06.15
Trabzon	17038	41°00'	39°43'	30	2000.03.09-2011.07.25
Erzurum	17096	39°55'	41°16'	1758	2000.03.09-2011.07.25
Sivas	17090	39°45'	37°01'	1285	2000.03.09-2011.07.25
Samsun	17030	41°17'	36°20'	4	2000.03.09-2004.06.15
Sinop	17026	42°02'	35°10'	32	2000.03.09-2011.03.11
Ankara	17128	40°07'	32°59'	949	1998.11.26-2011.07.21
Zonguldak	17022	41°27'	31°48'	136	2000.03.09-2011.07.25
Istanbul	17060	40°58'	28°49'	37	2000.03.09-2011.07.25

Weather stations locations and observation periods (part 1).

Meteorological station	Station WMO #	Latitude, North	Longitude, East	Station height over sea level, m	Period of measurements, yyyy,mm,dd
Balikesir	17150	39°37'	27°55'	102	2000.03.09-2011.07.25
Tekirdag	17056	40°59'	27°29'	4	2000.03.09-2011.07.25
Edirne	17050	41°40'	26°34'	48	2000.03.09-2011.08.08
Burgas	15655	42°29'	27°29'	28	2000.03.09-2011.07.25
Varna	15552	43°12'	27°55'	43	2000.03.09-2011.07.25
Buharest	15420	44°30'	26°08'	91	1998.11.26-2011.08.06
Konstanta	15480	44°13'	28°38'	14	2000.03.09-2011.08.05
Galats	15310	45°30'	28°01'	72	1998.11.26-2011.07.25
Sulina	15360	45°09'	29°40'	9	2000.03.09-2011.07.25
Izmail	33889	45°22'	28°52'	30	2000.03.09-2004.06.15
Tiraspol	33829	46°49'	29°40'	40	2000.03.09-2004.06.15
Chișinău	33815	47°01'	28°52'	173	1998.11.26-2011.08.01
Odessa	33837	46°29'	30°16'	42	1998.11.26-2011.03.11
Herson	33902	46°40'	32°37'	54	1998.11.26-2011.07.25
Chernomorskoe	33924	45°31'	32°42'	10	2000.03.09-2011.07.25
Dnepropetrovsk	34504	48°22'	35°05'	143	1998.11.26-2011.08.01
Genichesk	33910	46°10'	34°49'	15	1998.11.26-2004.06.16
Yalta	33990	44°30'	34°10'	72	1998.11.26-2004.06.16
Kerch	33983	45°22'	36°26'	49	1998.11.26-2011.08.01
Rostov-na-Donu	34730	47°16'	39°49'	75	1998.12.30-2011.07.25
Primorsko-Ahtarsk	34824	46°02'	38°09'	5	2000.03.09-2011.07.25
Tihoretsk	34838	45°51'	40°05'	78	2000.03.09-2011.07.25
Stavropol	34949	45°03'	42°01'	452	2000.03.09-2004.06.15
					2009.03.25-2011.07.25

Weather stations locations and observation periods (part 2).



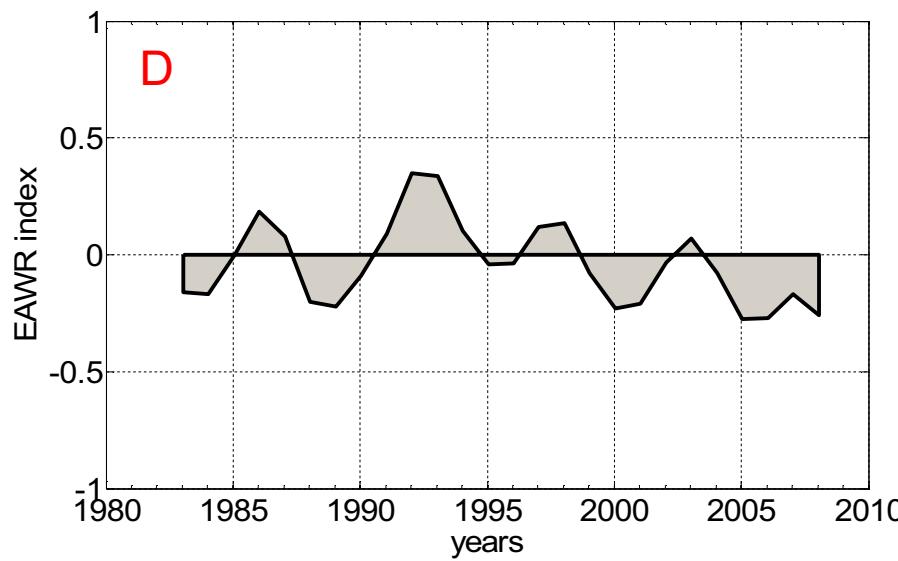
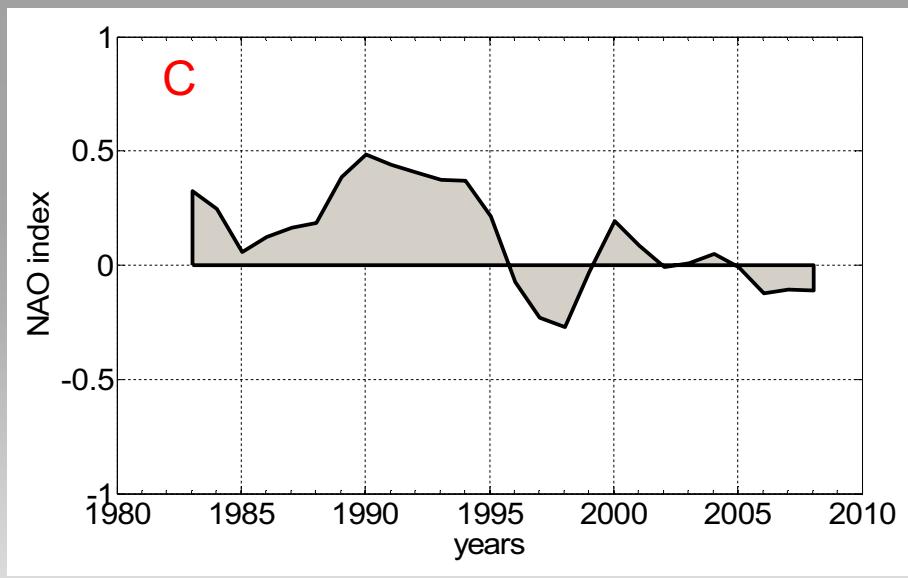
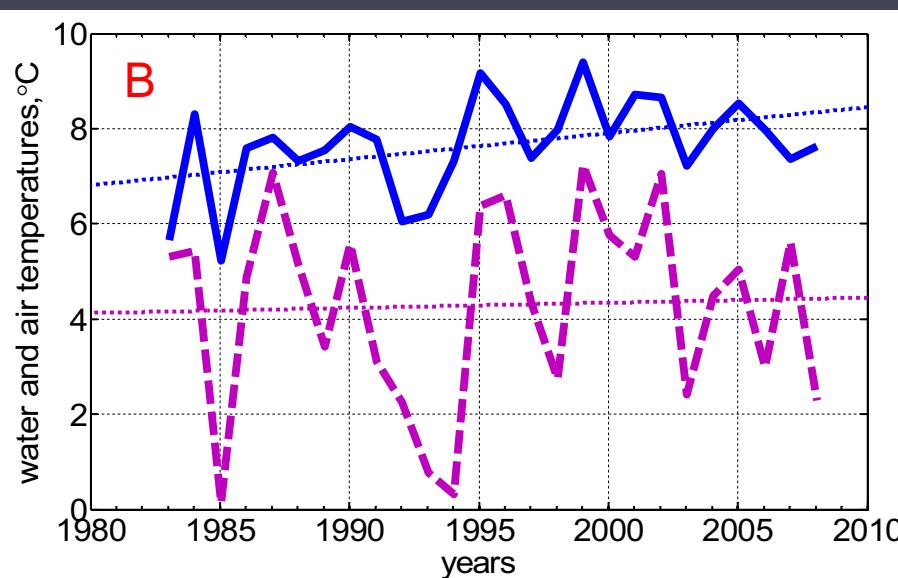
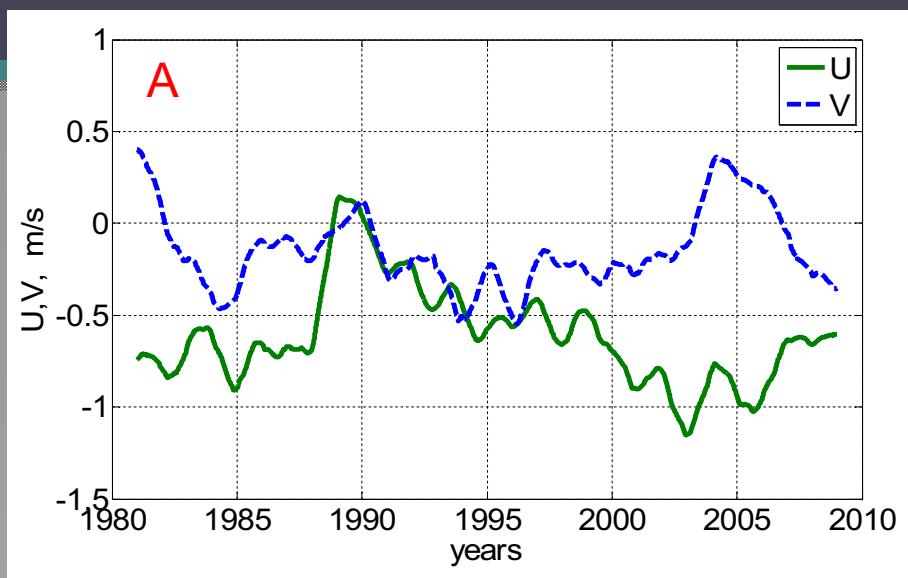


**Рис.** Конфигурация поля давления (на уровне моря) в зимний сезон (декабрь, январь, февраль), осредненного за период 1900-2001, с использованием интерполированного на сетку массива, созданного Trenberth and Paolino (1980). Изобары нанесены через каждые 3 hPa. Сплошной линией показаны изобары большие или равные 1015 hPa, штриховые линии обозначают изобары с меньшими, чем это значение величинами давления. Жирной линией обозначена площадь, по которой было проведено осреднение при расчёте индекса Сибирского антициклона. ( $40^{\circ}$ – $65^{\circ}$ N,  $80^{\circ}$ – $120^{\circ}$ E), [7].

## From:

FOTIS PANAGIOTOPoulos AND MARIA SHAHGEDANOVA. **Observed Trends and Teleconnections of the Siberian High:A Recently Declining Center of Action.**  
JOURNAL OF CLIMATE, VOLUME 18, MAY, 2005, pp. 1411- 1422.

**4. Долговременные взаимосвязи ветров, температур воздуха и воды, индексов атмосферной циркуляции NAO и EAWR.**

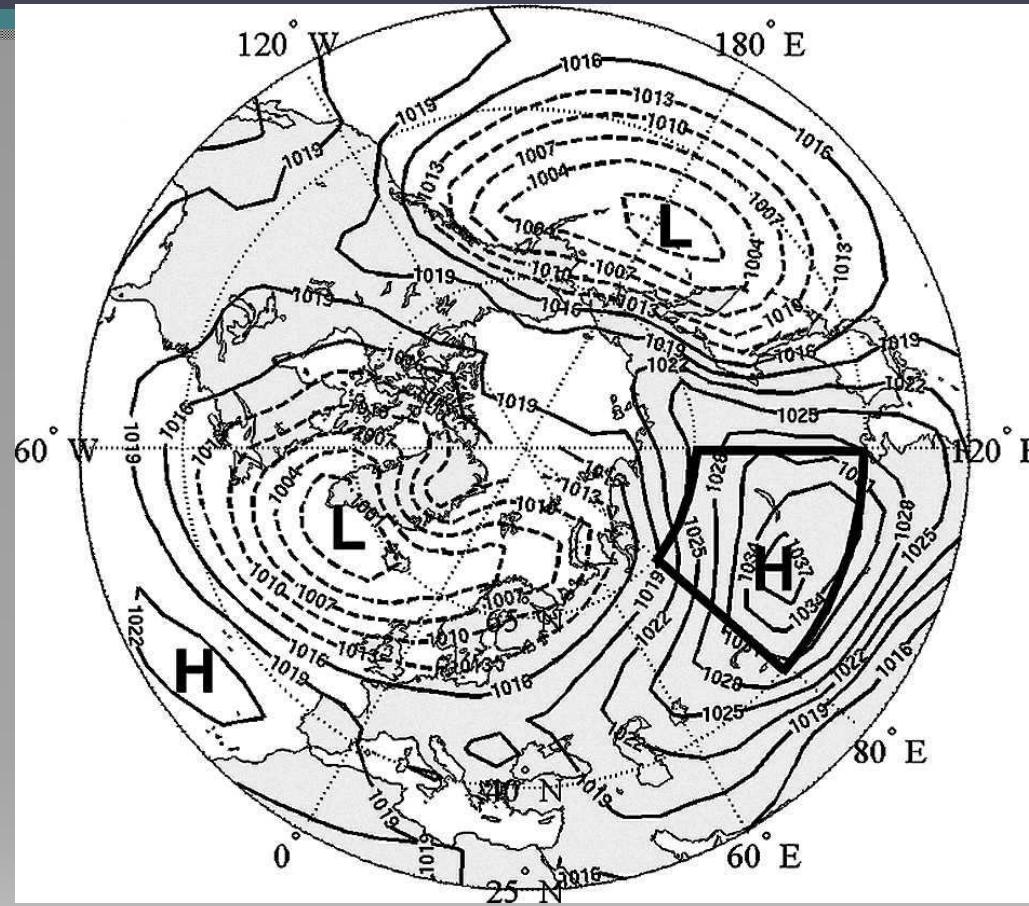


Временной ход сглаженных характеристик:

А - сглаженные компоненты вектора скорости переноса воздуха  $U$  (+ - на восток, сплошная линия),  $V$  (+ - на север, пунктир); Б - сглаженные зимние (февраль) температуры поверхности моря (верхняя кривая - пунктир) и температуры воздуха (нижняя сплошная кривая); В - сглаженный индекс NAO; Г - сглаженный индекс EAWR.

№	Ряды	Коэфф. Корреля- ции	95% дов. мнтервал	вероятность нулевой корреляции (параметр р)	коэффи- циент линейной регрессии
1	NAO - U	0.58	0,25-0,79	$2 \cdot 10^{-3}$	0.69
2	NAO - V	-0.093	-0.46-0,31	0.65	-0.15
3	NAO - Ta	-0.15	-0.51-0,26	0.48	-1.41
4	NAO - Tw	-0.28	-0.60-0,12	0.16	-1.32
5	EAWR - U	0.23	-0.18-0,56	0.26	0.37
6	EAWR - V	-0.27	-0.60-0,13	0.18	-0.32
7	EAWR-Ta	-0.37	-0.67-0,015	0.06	-4.34
8	EAWR-Tw	-0.36	-0.66-0,025	0.07	-2.05
9	Ta-Tw	0.65	0.35-0,83	$3 \cdot 10^{-4}$	0.31

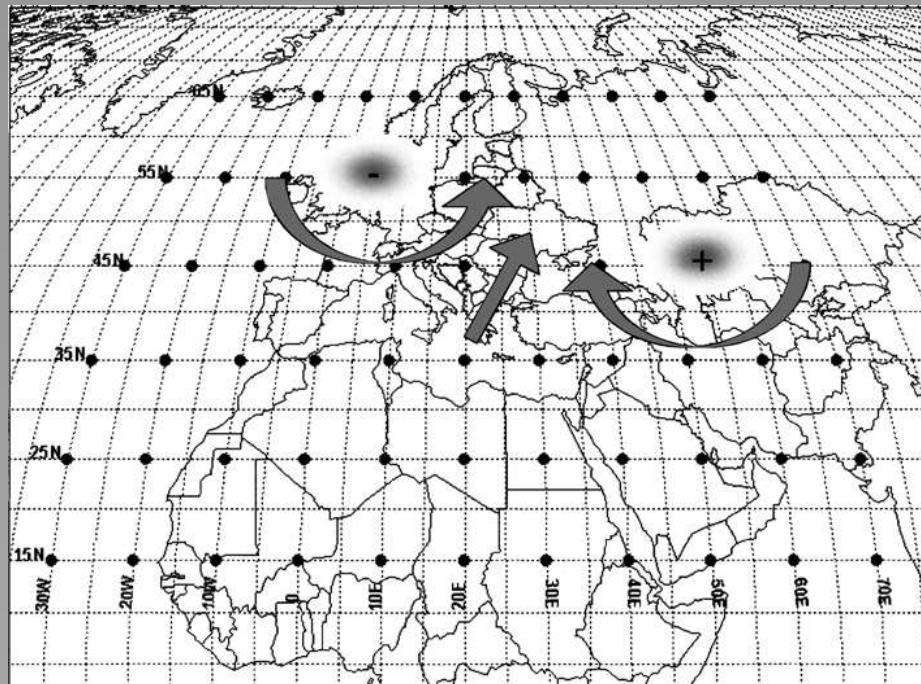
Коэффициенты корреляции гидрометеорологических параметров с индексами атмосферной циркуляции NAO и EAWR.



Winter (DJF) SLP averaged over 1900–2001 using the Trenberth and Paolino (1980) gridded SLP dataset. Isobars are spaced every 3 hPa with solid contours used for SLP values greater or equal than 1015 hPa and dashed lines used for lower values. The area enclosed by the bold line shows the region over which SLP has been averaged to calculate the SH index ( $40^{\circ}$ – $65^{\circ}$ N,  $80^{\circ}$ – $120^{\circ}$ E), [4].

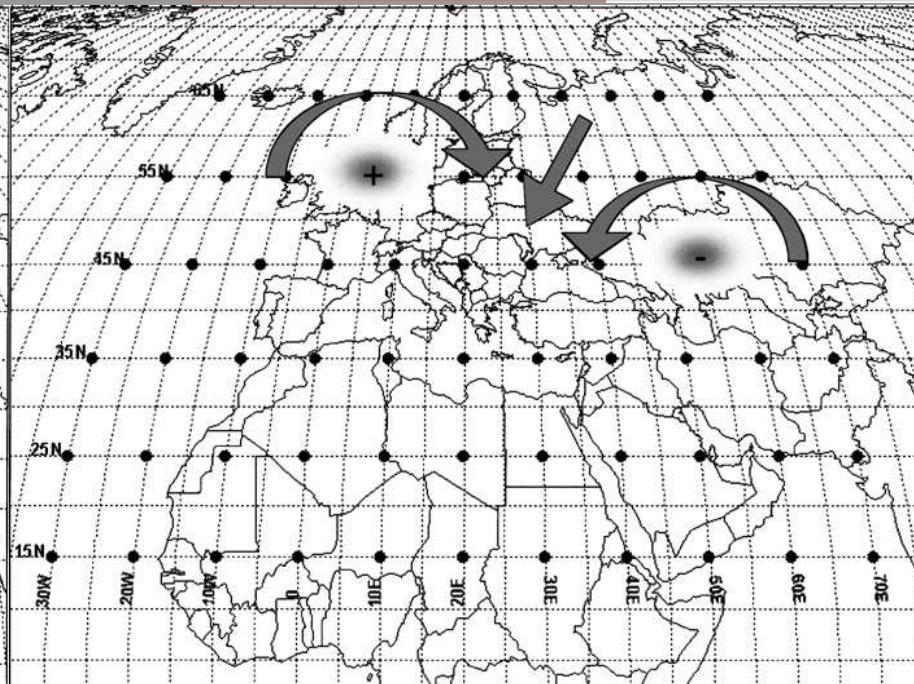
**From:**

FOTIS PANAGIOTOPoulos AND MARIA SHAHGEDANOVA. **Observed Trends and Teleconnections of the Siberian High:A Recently Declining Center of Action.** JOURNAL OF CLIMATE, VOLUME 18, MAY, 2005, pp. 1411- 1422.



a

NCP-



b

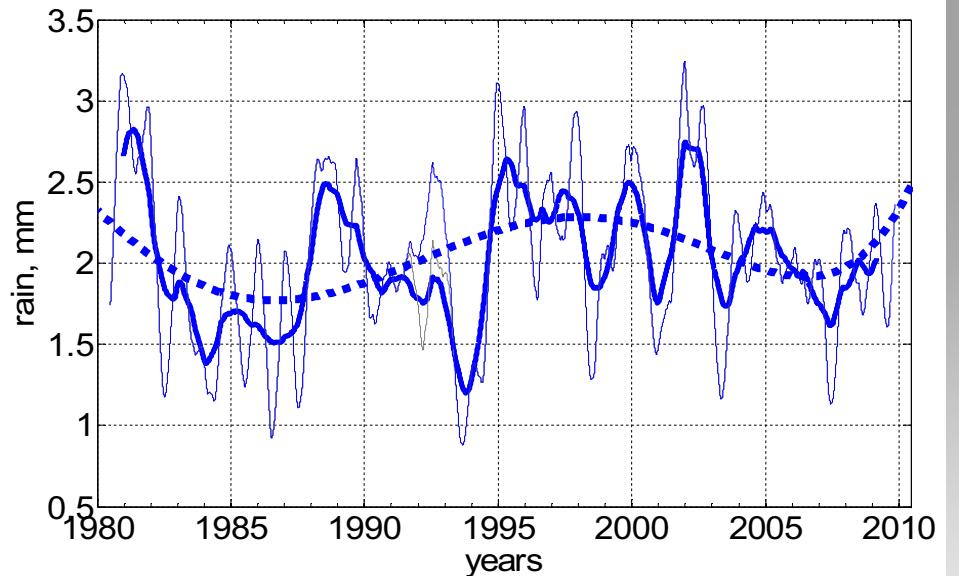
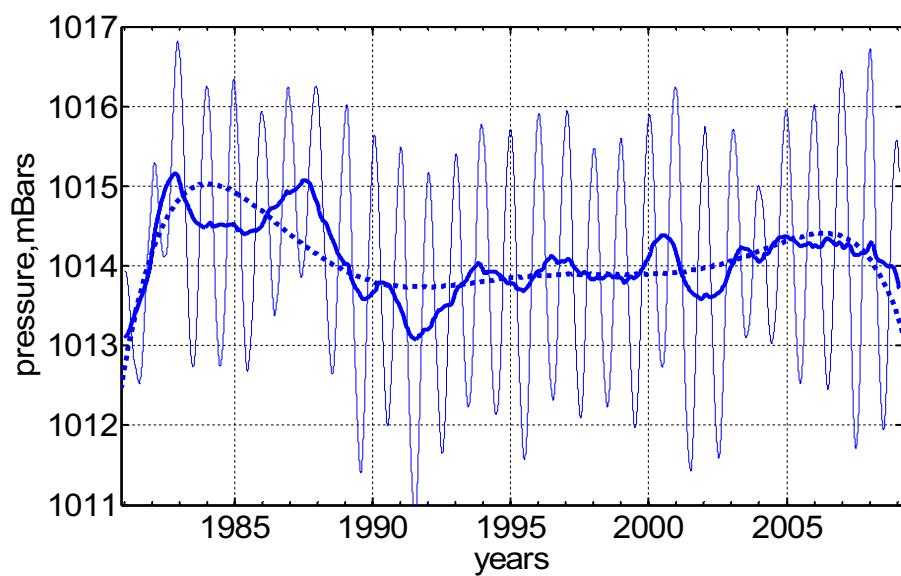
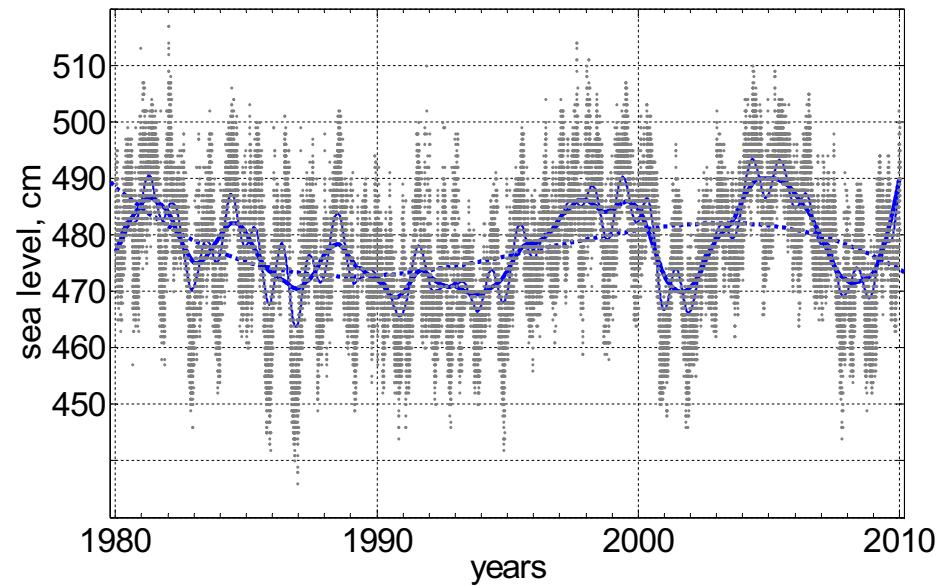
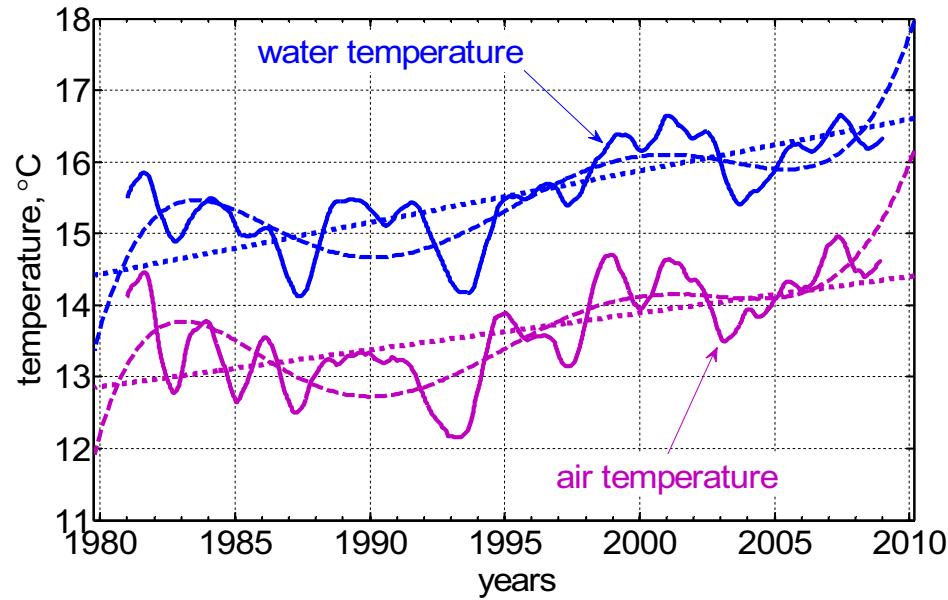
NCP+

Схематическое представление аномалии циркуляции при NCP(-) и NCP(+).

**From:**

Kutiel, H., Benaroch, Y., 2002. North Sea-Caspian Pattern (NCP) — an upper level atmospheric teleconnection affecting the Eastern Mediterranean: identification and definition. *Theor. Appl. Climatol.* v. 71, 17–28.

## **5. Долговременные вариации гидрометеорологических параметров.**



**Долговременные вариации параметров** на метео-станции Геленджика в период 1980-2009 гг. А- температуры воды на поверхности моря и приземного воздуха; Б- уровень моря; В- атмосферное давление; Г-осадки. Тонкие сплошные линии - сглаженные значения, фильтр  $\frac{1}{2}$  года; сплошные линии – фильтр 1 год, точечные и пунктирные линии – линейный тренд и приближение полиномом 10 степени.