The background of the slide is a photograph of a sea with white-capped waves. In the distance, a coastal structure with a tower and other buildings is visible against a sky with scattered clouds.

Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция
"Современные проблемы дистанционного зондирования
Земли из космоса", 13–17 ноября 2017 г.

Особенности колебаний уровня моря в северо-
восточной части Чёрного моря: спектральный состав
и связи с региональной гидродинамикой и
атмосферными воздействиями

*Мельников В.А., Зацепин А.Г.,
Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И.*

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН

15 ноября 2017 г.

Москва, ИКИ РАН

Цель работы

На основе измерительной информации "Черноморского гидрофизического полигона Института океанологии РАН, полученной в 2008-2016 гг., с использованием данных спутниковых дистанционных зондирований и различных реанализов, рассматриваются гидрометеорологические условия в шельфовой зоне северо-восточной части Черного моря.

Одним из индикаторов региональной системы атмосфера-море является уровень моря. Представляет интерес изучение изменений уровня моря, связанных с рядом регулярно наблюдающихся вдоль побережий в северо-восточной части Чёрного моря, явлений, таких как значительные и резкие похолодания морских прибрежных вод, сгоны и нагоны, апвеллинги и даунвеллинги, разномасштабные вихревые и волновые течения и их проявления на поверхности моря.

Данные

Анализ основан на данных измерений при помощи различных зондов на гидрофизическом Полигоне ИО РАН на Черном море, стандартных метеорологических измерений в период 1998-2011 гг. на 134 прибрежных метеорологических станциях (из списка сети ВМО) вокруг всего побережья Черного моря, а также в некоторых регионах Северного полушария (www.meteoinfospace.ru), включая более продолжительные (1938-2017 гг.) измерения на метеорологической станции Геленджика. Использовались базы данных NCEP-NCAR, Sciron, QuickSCAT и PathFinder v5.

Методы обработки

Для визуализации временных рядов векторных величин (направления и скорости ветра и течений) построены прогрессивные векторные диаграммы. Вариации параметров на разных временных масштабах были получены посредством различных фильтров с контролем воздействия сверток на исходный ряд по спектрам. Статистические соотношения оценивались методами традиционного корреляционного, спектрального и вэйвлет анализов.

Рассмотрены следующие вопросы:

- 1.. Основные особенности гидрометеорологической системы на гидрофизическом Полигоне ИО РАН на Черном море. Ветровые циклы. .
2. Разномасштабные вариации уровня моря на Полигоне.
Спектры и вэйвлеты, оценки амплитуд, долговременные изменения .
Инерционные колебания. Перемежаемости.
3. Интеркалибрация; спутниковые данные; спектры когерентности
сравнение с данными метеостанции и контактными измерениями.
4. Влияние сезонных ветров на температуру воздуха, температуру поверхности моря и уровень моря.
5. Климатические вариации уровня моря и гидрометеорологических элементов.
6. Отклики "гидрофизической системы" на ветровые циклы..
7. Выводы

Спектр мощности рассчитывался на основе представления ряда измерений обобщённого параметра $V(t)$, в декартовой системе координат, в точке с координатами $r: \{x, y, z\}$, в моменты времени $t_i = i\delta t$, $i=1, 2, \dots, N$, при помощи ряда Фурье:

$$V(t) = \operatorname{Re} \sum_{m=1}^{\frac{N}{2}-1} \hat{V}_m e^{if_m t},$$

где: $\hat{V}_m = [2/(N\delta t)] \sum \delta t V_k(t) \exp(-i2\pi mk/(N\delta t))$ - коэффициенты Фурье на частотах $f_m = 2\pi m/(N\delta t)$, δt - интервал дискретизации. Матрица S_{ij} спектра мощности векторной величины $V(t)$ определяется как $S_{ij} = \langle \hat{u}_i^* \hat{u}_j \rangle$, где \hat{u}_i - компоненты вектора \hat{V}_m ; * - комплексное сопряжение; скобки обозначают осреднение по ансамблю, которое в силу гипотезы об эргодичности процесса, заменяется на осреднение по окну полосы разрешения.

Непрерывное прямое вэйвлет-преобразование $W_n(s)$ определяется как свёртка последовательности значений обобщённого параметра X_i , $i=0, 2, \dots, N-1$, с функцией $\psi_n((n'-n)\delta t/s)$, которая задаётся как нормированная и растянутая копия компактного ядра $\psi_0(\eta)$:

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} X_{n'} \psi^* \left(\frac{(n' - n) \delta t}{s} \right),$$

где: * - комплексное сопряжение, s - масштаб временного вэйвлет-окна; n - индекс момента времени. Среди некоторого класса подходящих функций можно выбрать удобный вэйвлет Морле:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i2\pi f_0 \eta} e^{-\eta^2/2},$$

с преобразованием Фурье $\hat{\psi}(f) = \pi^{-1/4} H(f) e^{-\pi(f-f_0)^2}$, где $H(f)$ - функция

Хэвисайда. Условия нормировки важно выбирать так, чтобы дисперсия ряда (общая "энергия") равнялась сумме квадратов $W_n(s)$, согласно теореме Парсеваля.

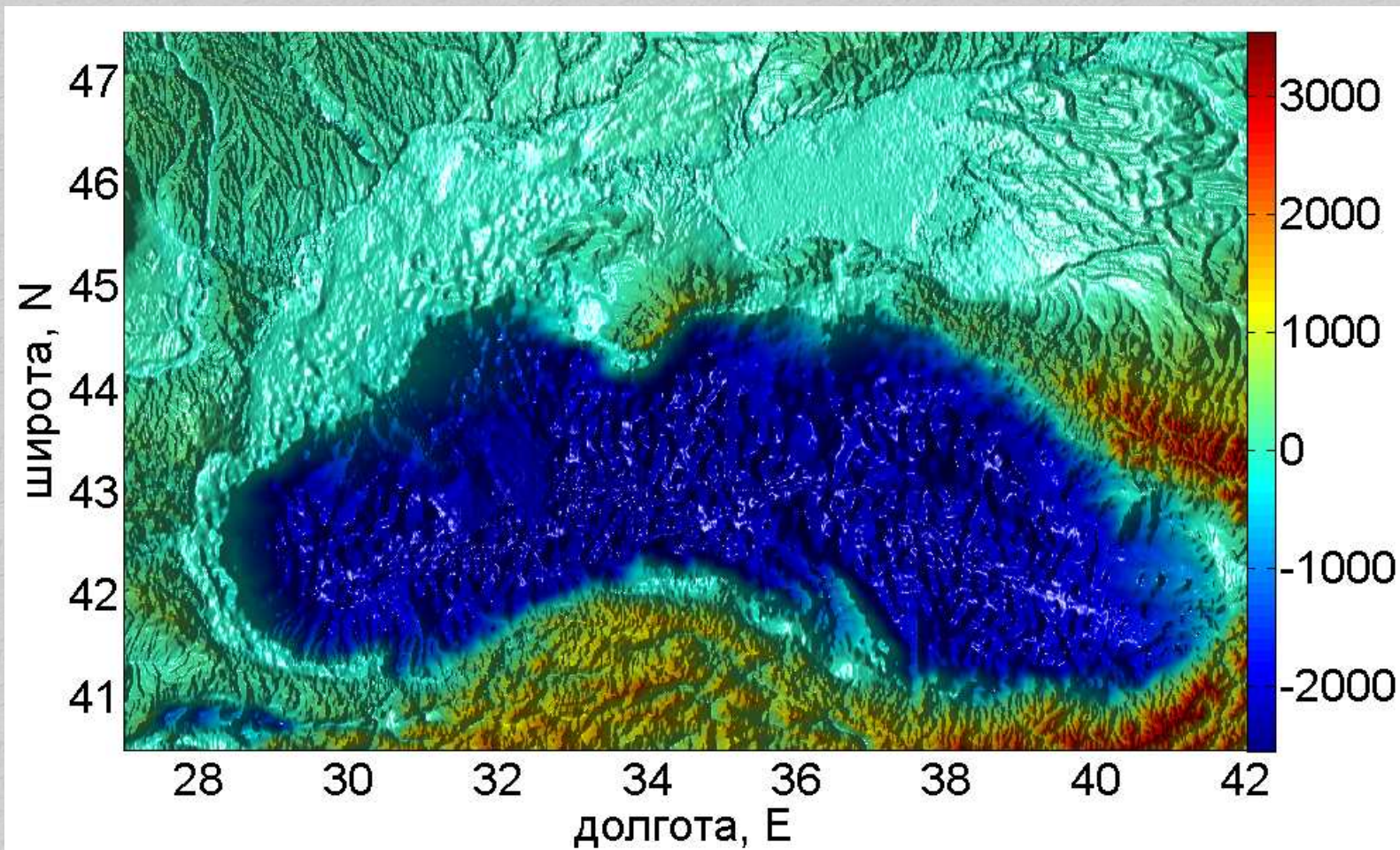
3 фундаментальные методологические работы:

- 1. Calman J. On the interpretation of ocean current spectra. Part I: The kinematics of three-dimensional vector time series//J. Phys. Oceanogr., v. 8, pp. 627-643.
- 2. Calman J. On the interpretation of ocean current spectra. Part II: Testing Dynamical Hypotheses// J. Phys. Oceanogr., v. 8, pp. 644-652.
- 3. C.Torrence, G.P. Compo. A Practical Guide to Wavelet Analysis// Bull. Am. Meteorol. Soc., v.79, 1, 1998, pp. 61-78.

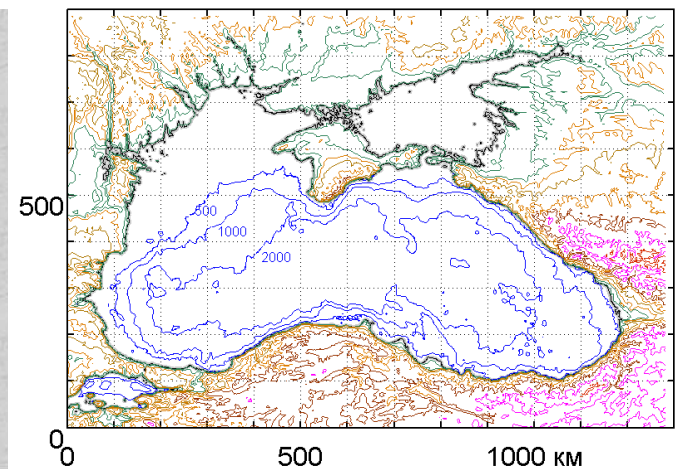
Псевдолагранжевы траектории: прогрессивно-векторные диаграммы ветра и течений

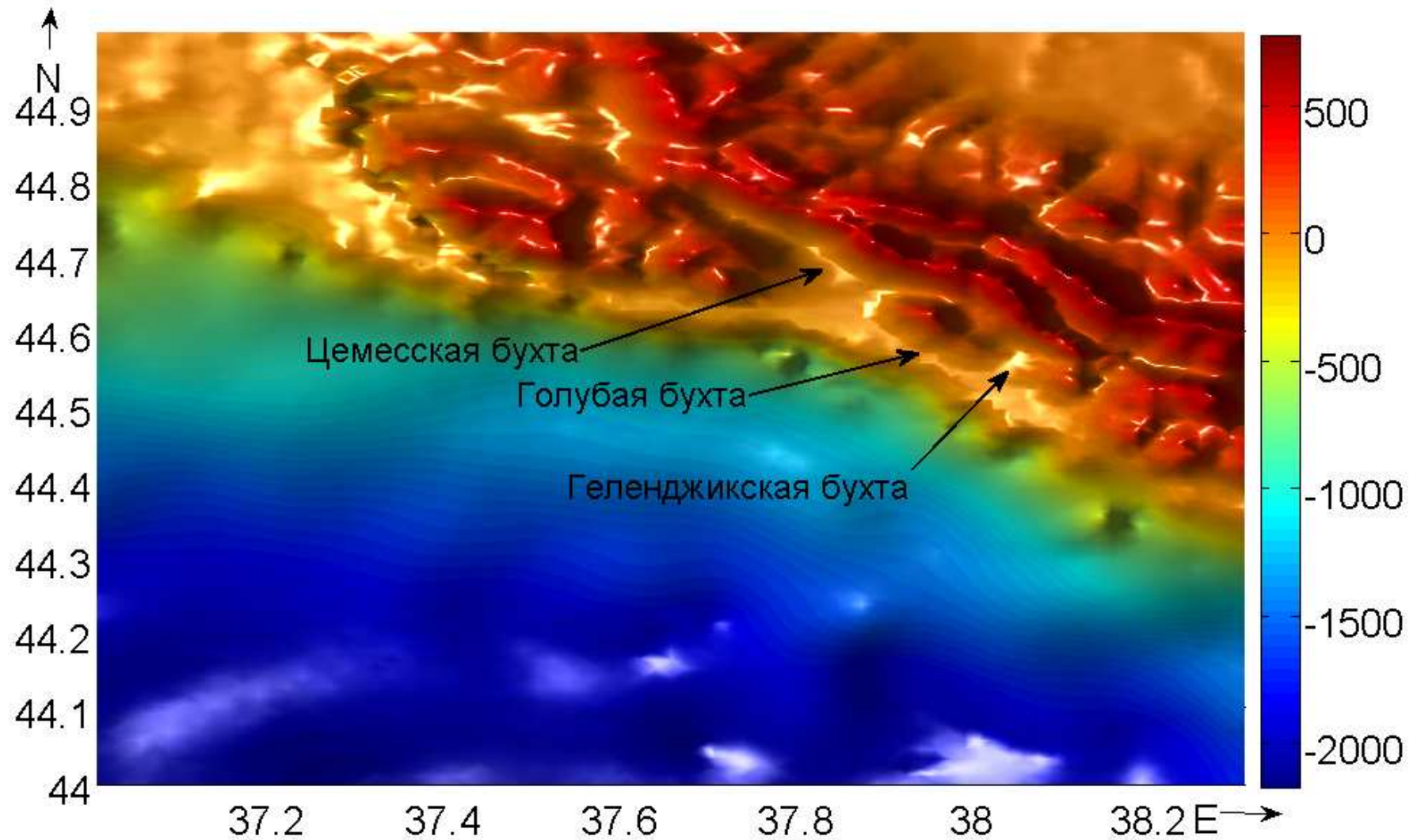
Движение индивидуальных жидких элементов в сплошной среде под воздействием поля скорости, удовлетворяющего уравнениям Навье-Стокса $\mathbf{U}(\mathbf{r}, t)$, находится из соотношения $d\mathbf{X}/dt = \mathbf{U}(\mathbf{r}, t)$, где $\mathbf{X}(\mathbf{r}, t)$ - координаты частицы жидкости на траектории. При измерениях в точке \mathbf{r}_0 (например на метеостанции) удобно представить вариации скоростей течений в форме прогрессивной векторной диаграммы течений или псевдолагранжевой траектории:

$$\mathbf{X}(\mathbf{r}_0, t_n) = \int_0^{t_n} \mathbf{U}(\mathbf{r}_0, t) dt \approx \sum_{i=1}^{i=n} \mathbf{U}(t_i) \delta t$$



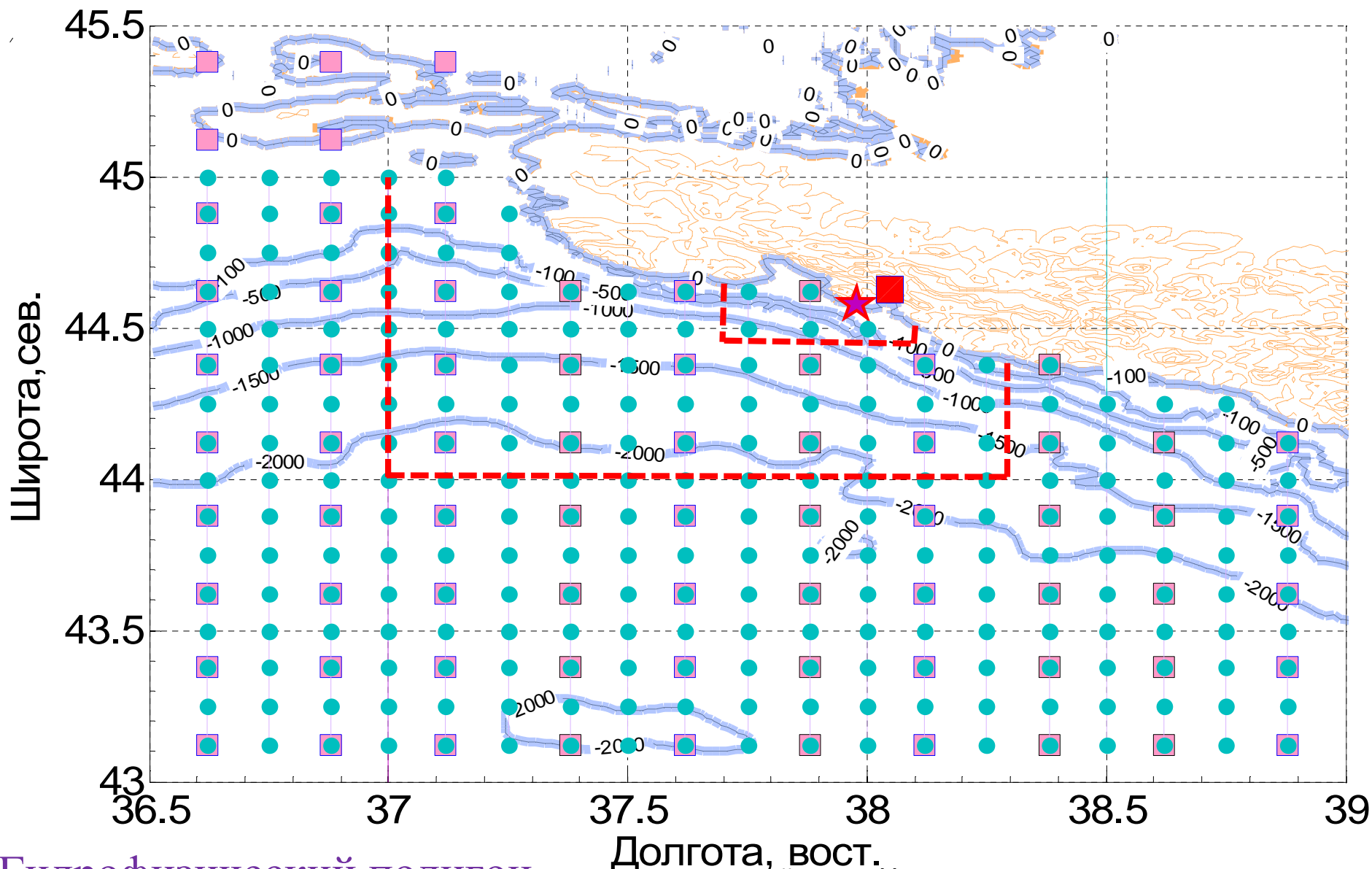
Черное и Азовское моря. Рельеф земной поверхности и дна моря. Шкала высот и глубин в метрах. Данные из Smith, W.H.F. and D.T.Sandwell (1997), разрешение 2'.





Рельеф земной поверхности и дна в северо-восточной части Чёрного моря, в районе Гидрополигона.

Шкала высот и глубин в метрах.



Гидрофизический полигон в северо-восточной части Черного моря.

Условные обозначения: звездочка—причал ИО РАН(44.58°N,37.98°E, Голубая бухта); черный квадрат—метеостанция(44.55°N,38.05°E,г.Геленджик); серые квадраты-ряды спутниковой ТПМ, 1985-2008гг.,(nightly SST,AVHRR,NOAA); точки-ряды аномалий уровня моря (Black Sea MSLA, AVISO products); жирные линии - изолинии глубины моря (в метрах); тонкие линии- изолинии (без оцифровки) рельефа суши; штриховые линии отмечают три области Полигона.

- - метеостанции
- ▲ - уровнемерный пост
- ▲ - донный ADCP
- - заякоренная термокося
- - профилограф Аквалог
- - CTD-станции на судовом разрезе
- - галсы судна при буксировке ADCP

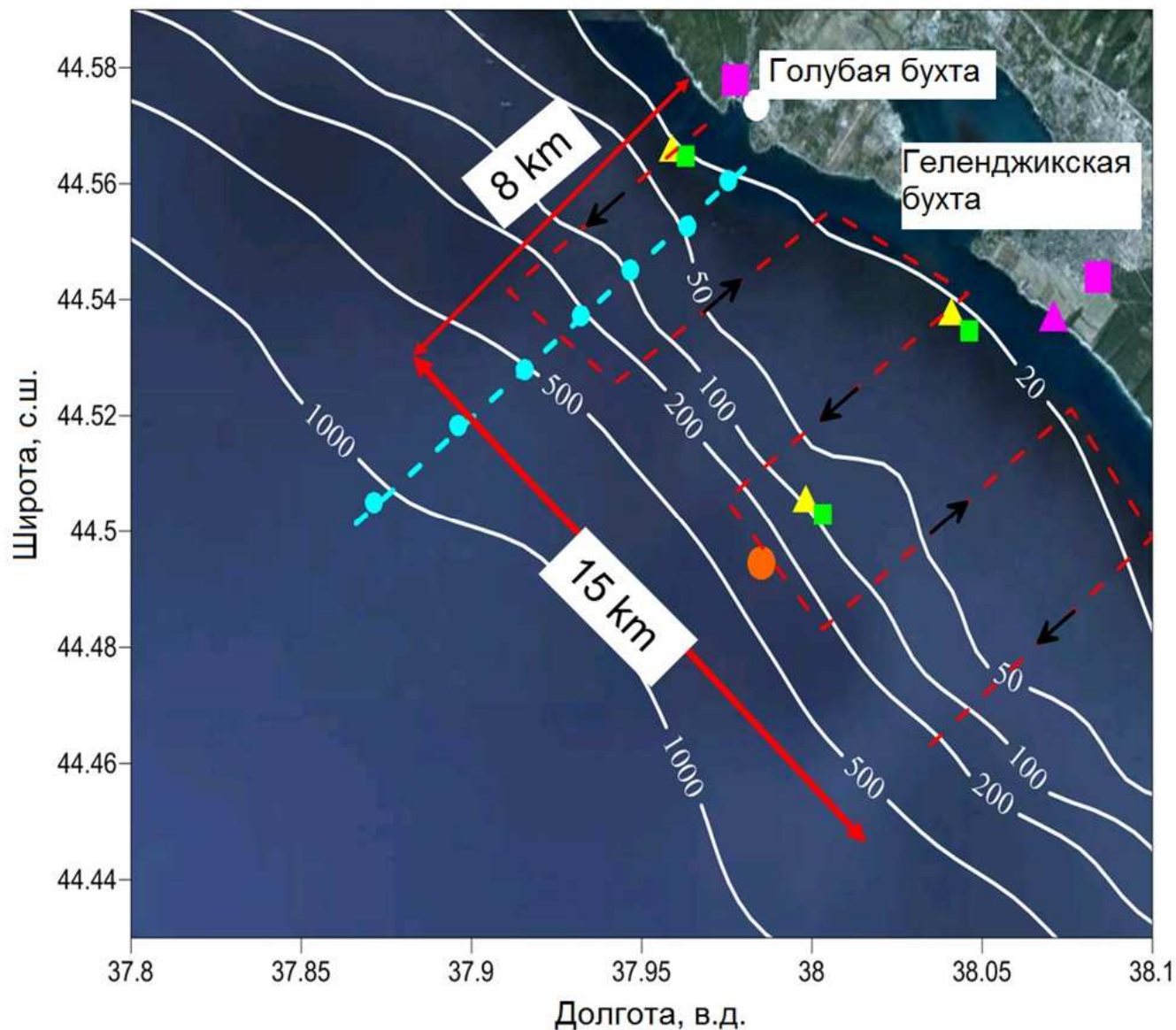
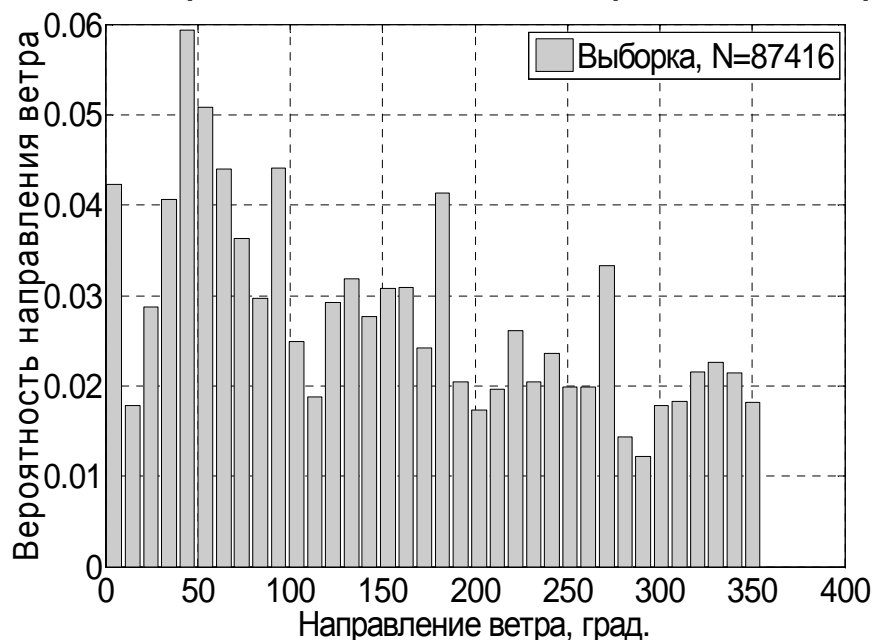


Схема контактных измерений на Гидрополигоне ИО РАН:

Пунктирной линией со стрелками обозначены галсы судна при проведении измерений поля скорости течения, с помощью буксируемого за судном ADCP.

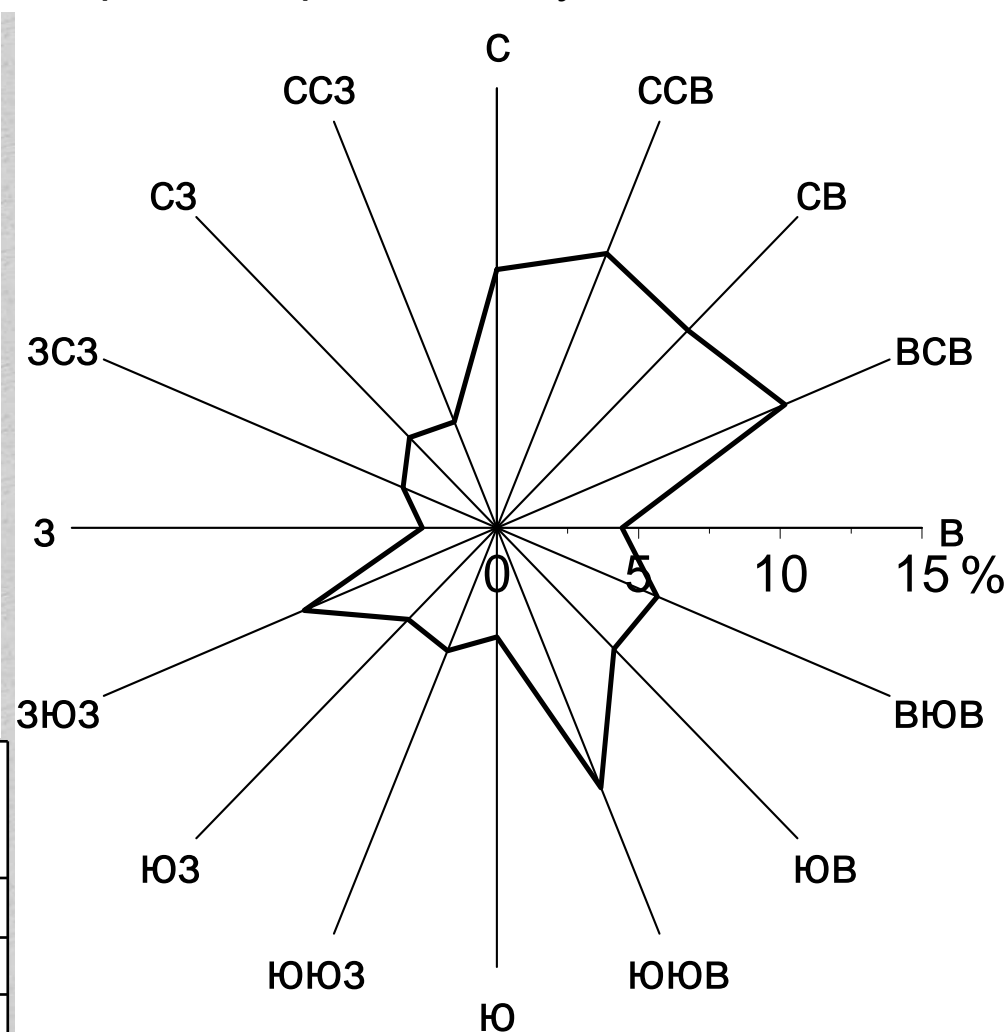
Традиционные представления ветров (гистограммы и “розы” ветров) не позволяют анализировать нестационарные векторные ряды скорости воздушных течений.



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

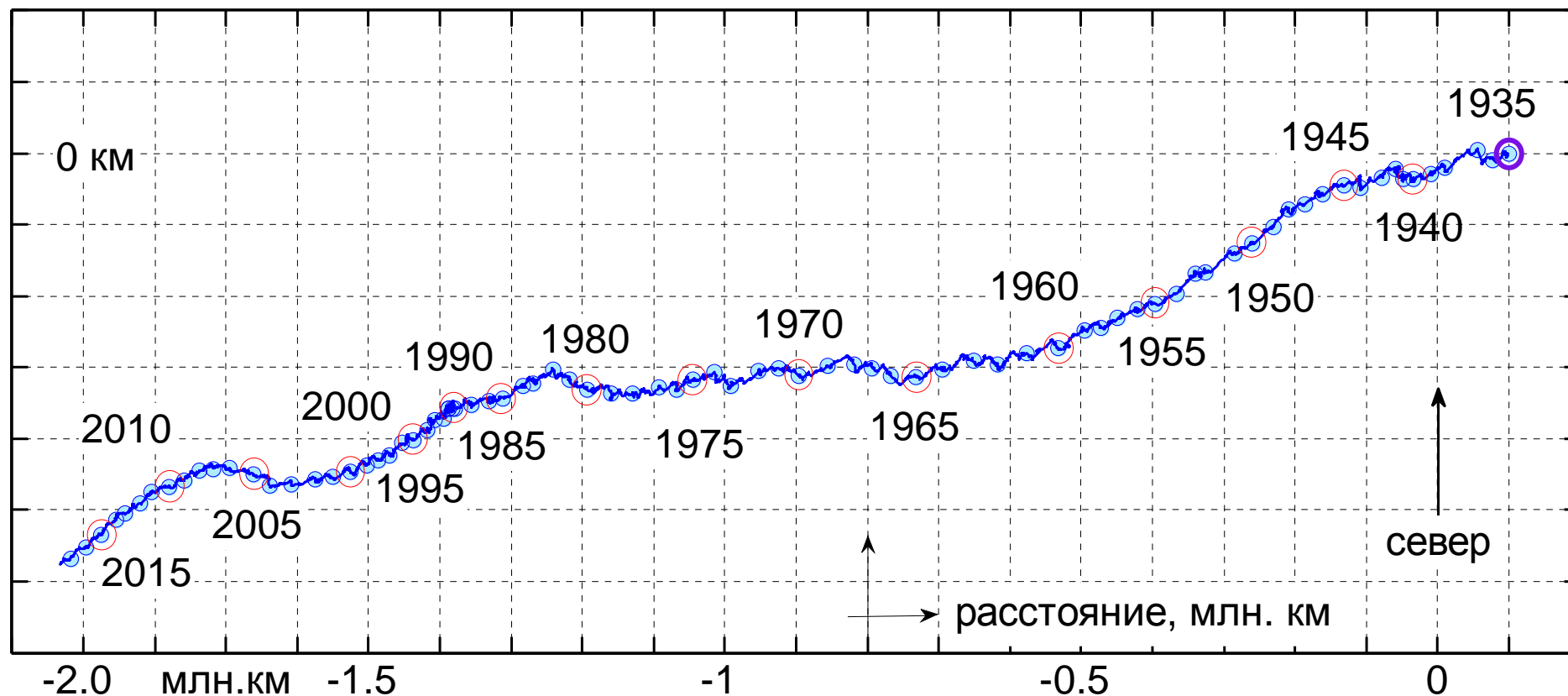
Азимут максимума, град.	Диапазон распределения, град.	Вероятность направления ветра, %
45 ±5	10-110	40
135±5	110-200	25
225±5	200-280	20
315±5	280-370	15

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

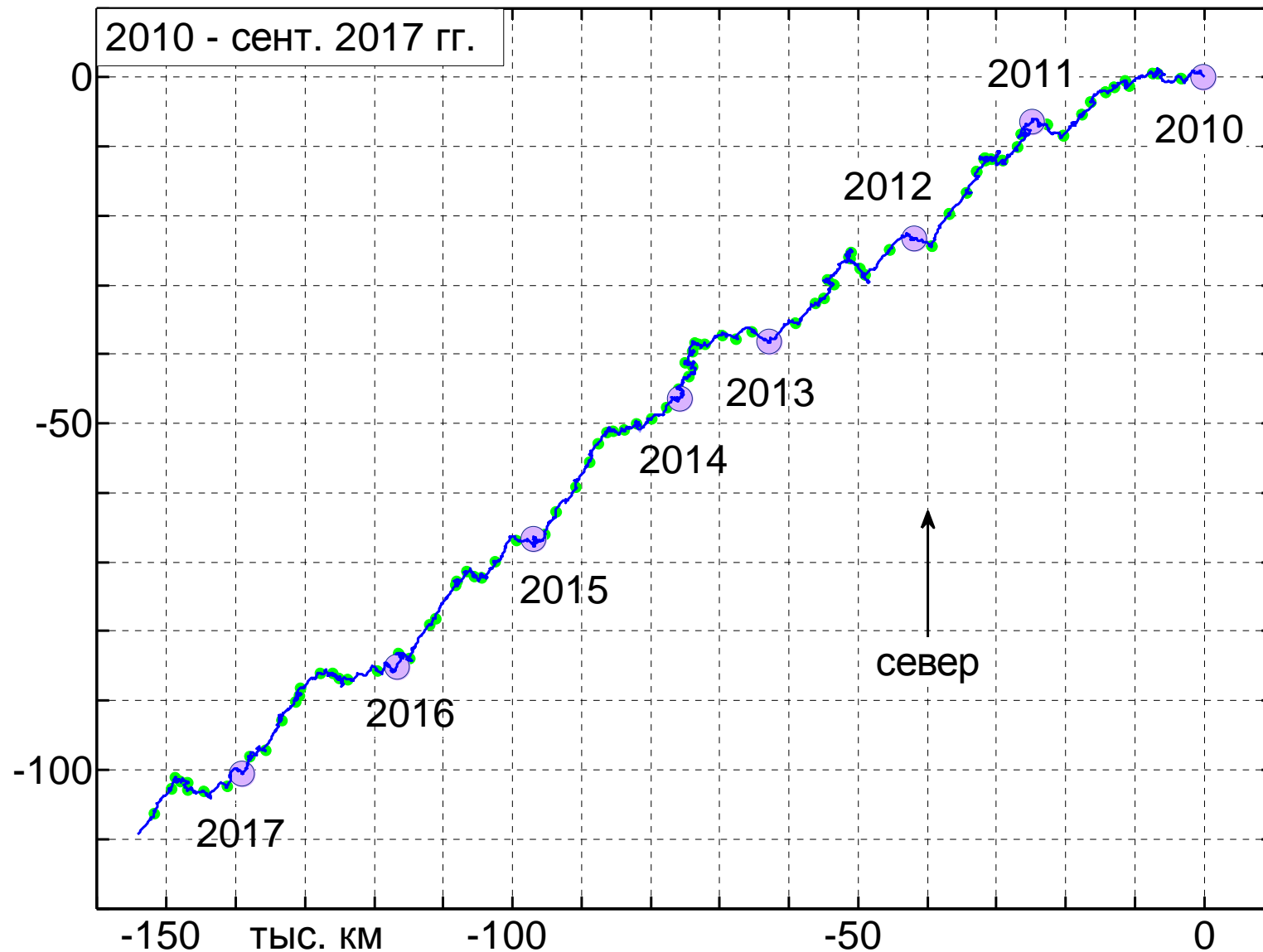


“Роза” ветров на метеостанции в Геленджике - повторяемость направления ветра по 16 румбам за период 1980 - 2010 гг. Основные румбы направлений С (337.5-0-22.5°), СВ (22.5-45-67.5°), В (67.5-90-112.5°), ЮВ (112.5–135-157.5°), Ю (157.5-180-202.5°), ЮЗ (202.5-225-247.5°), З (247.5-270-292.5°), СЗ (292.5-315-337.5°).

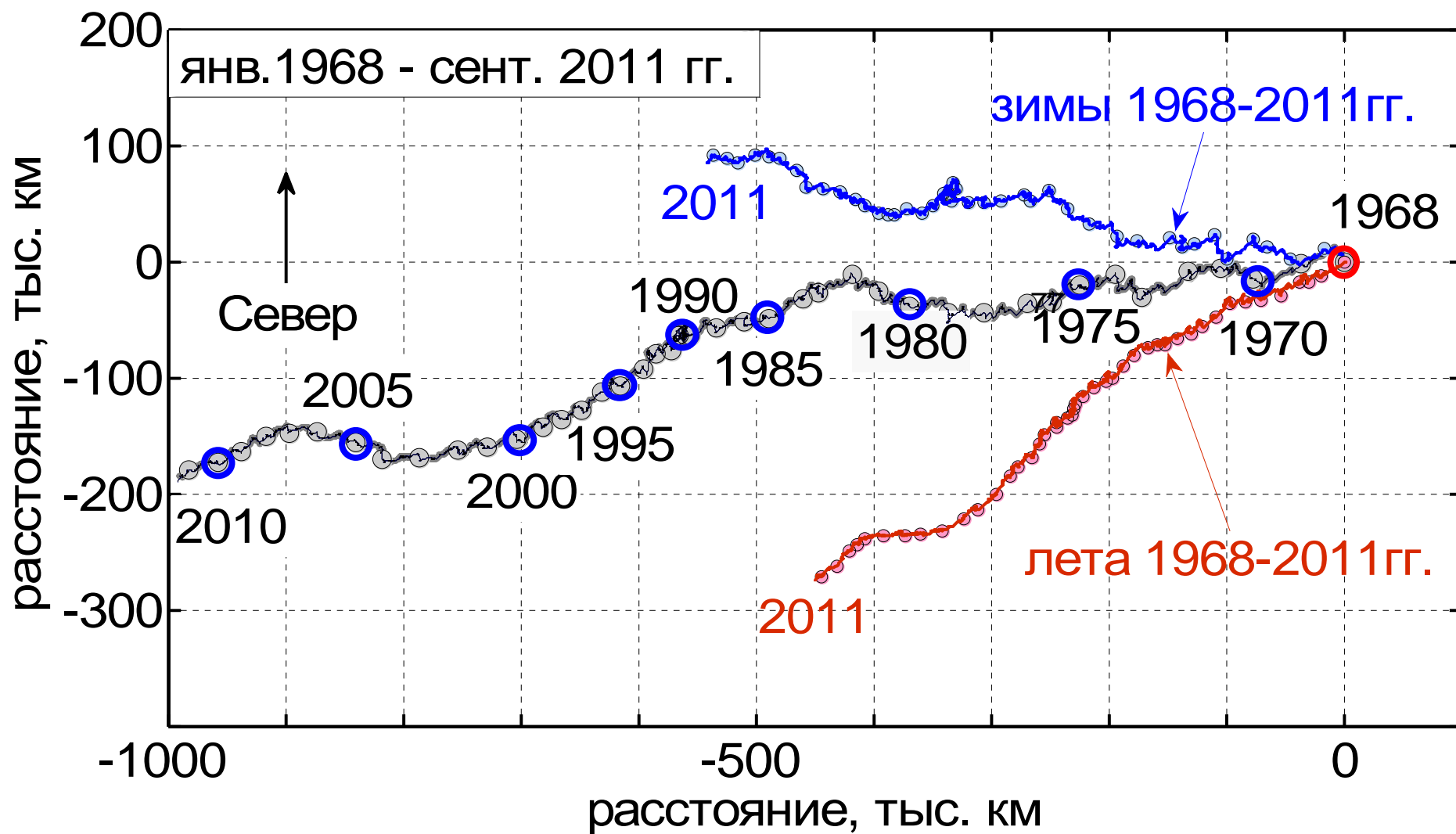
Ветровые циклы



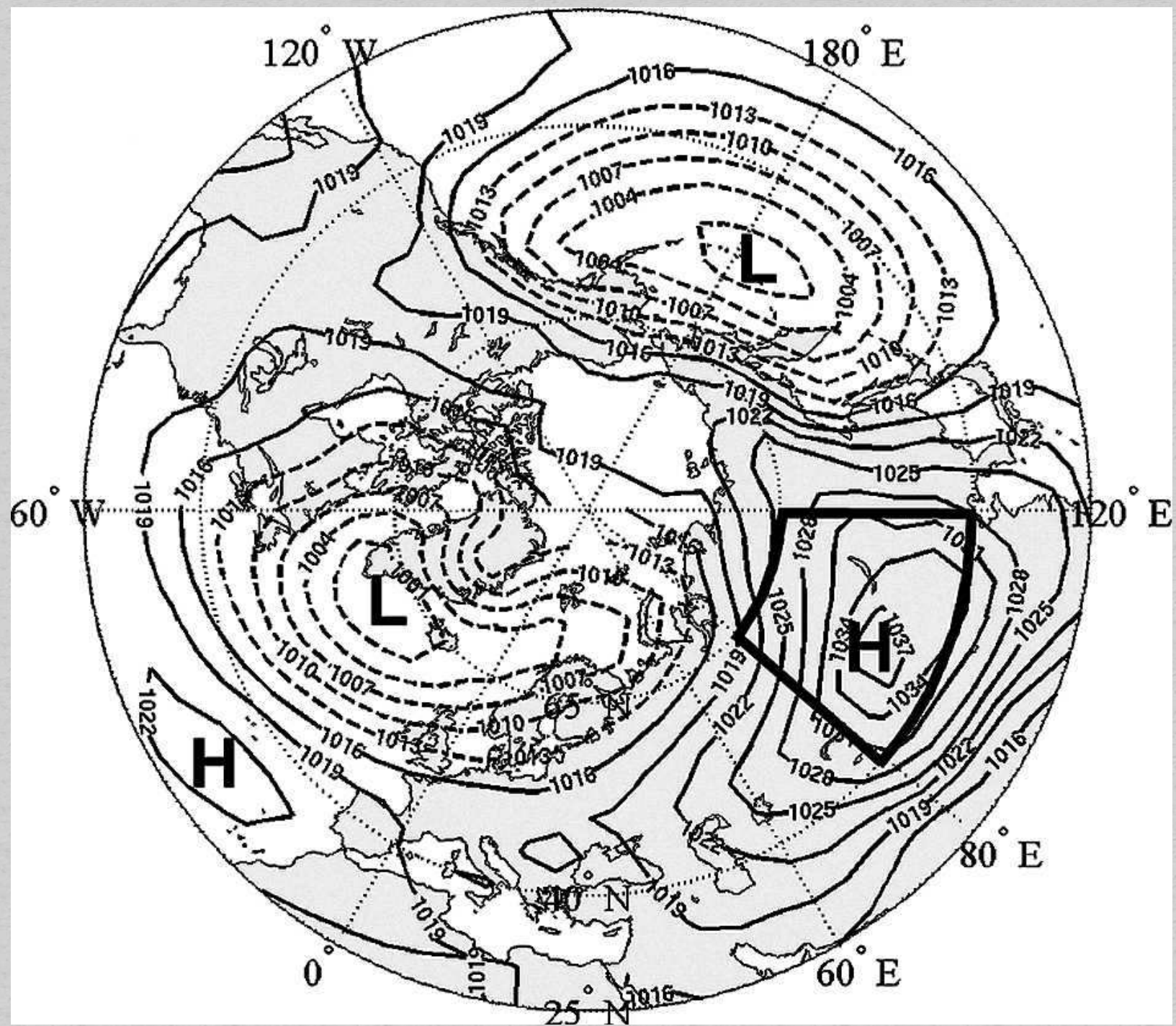
Прогрессивная векторная диаграмма ветра в период 1935-2017 гг. по измерениям на метеостанции Геленджика. Синие кружки отмечают годы. Красные кружки отмечают пятилетия.



Прогрессивная векторная диаграмма ветра в период 2010 г.- сент. 2017 г. по измерениям на метеостанции Геленджика. Синие кружки отмечают годы. Зелёные кружки отмечают месяцы.



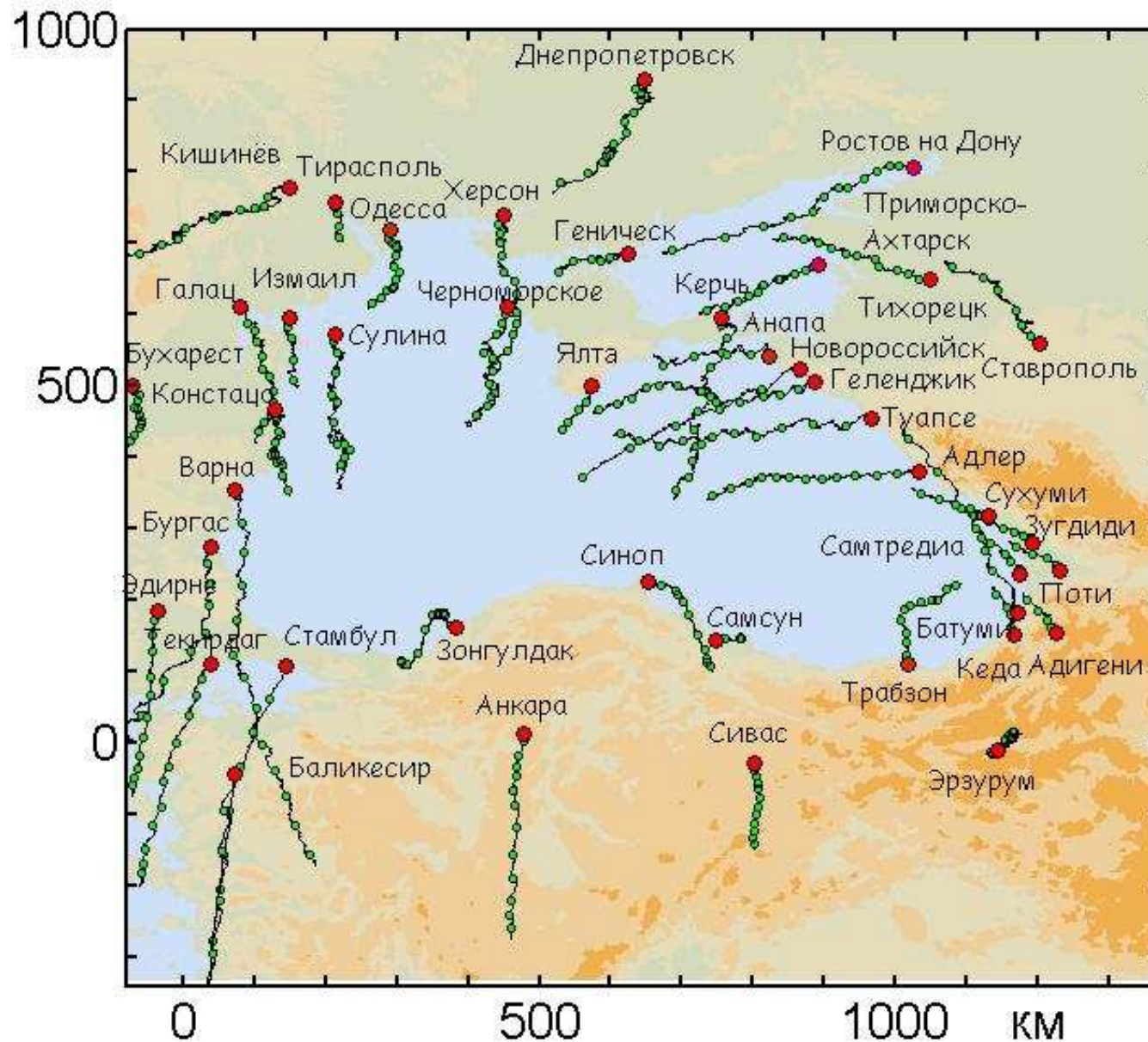
Долговременные изменения ветра на метеостанции Геленджика.
Показаны диаграммы сезонных ветров.



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° – 65° N, 80° – 120° E),

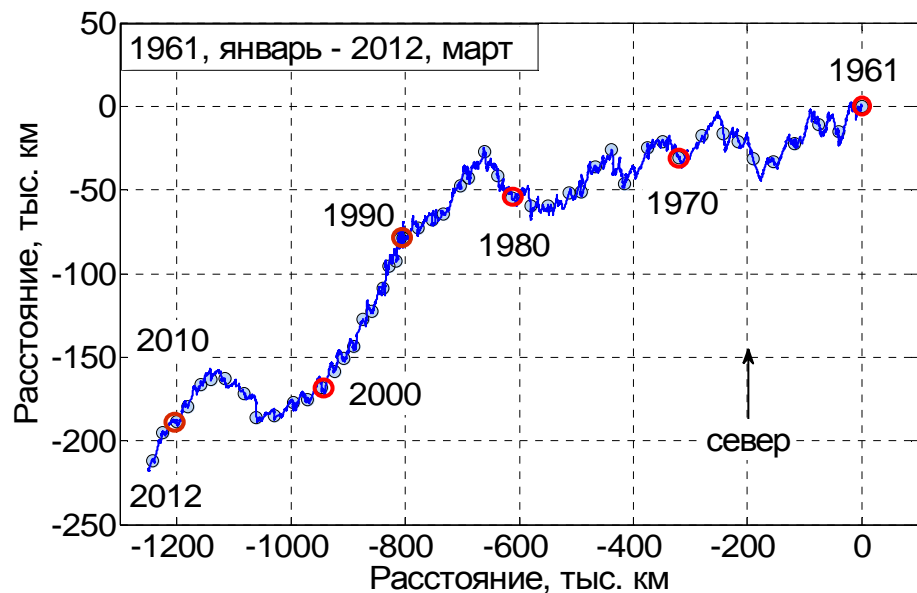
Из работы:

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.

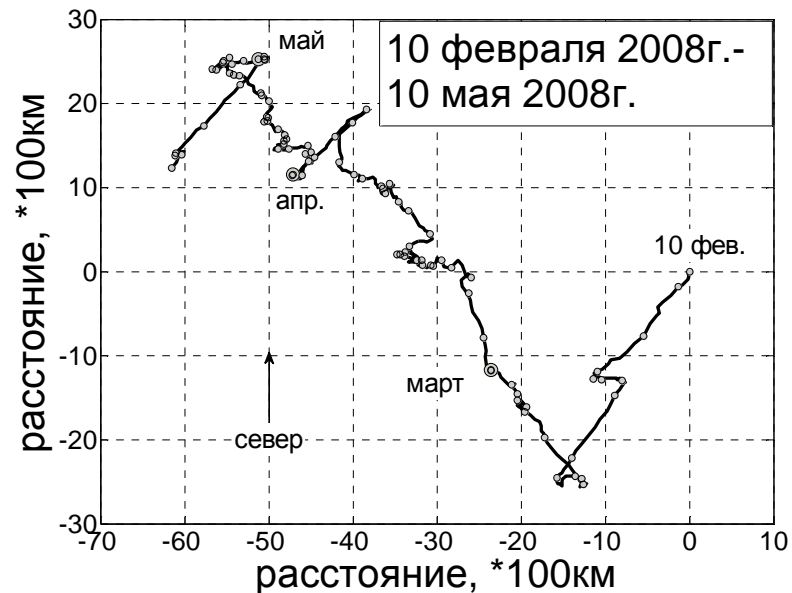


Прогрессивные векторные диаграммы ветра по данным черноморских прибрежных метеостанций в период 1998-2011 гг. Диаграммы построены в масштабе: 1 деление шкалы расстояний=1000 км. Зелёные кружки отмечают годы. Красные кружки отмечают местоположение метеостанции и начало каждой диаграммы.

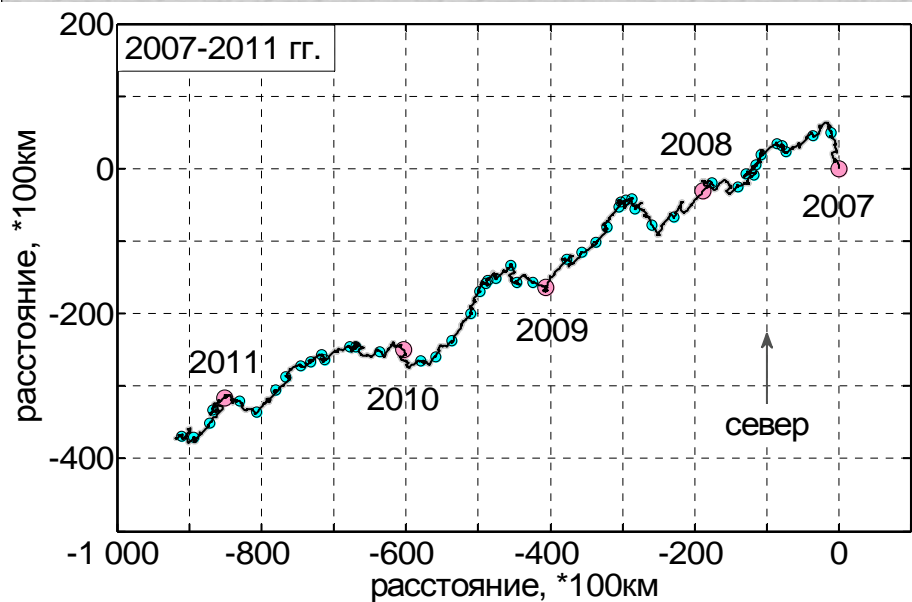
Элементарные ветровые циклы и
признаки самоподобного случайного
процесса



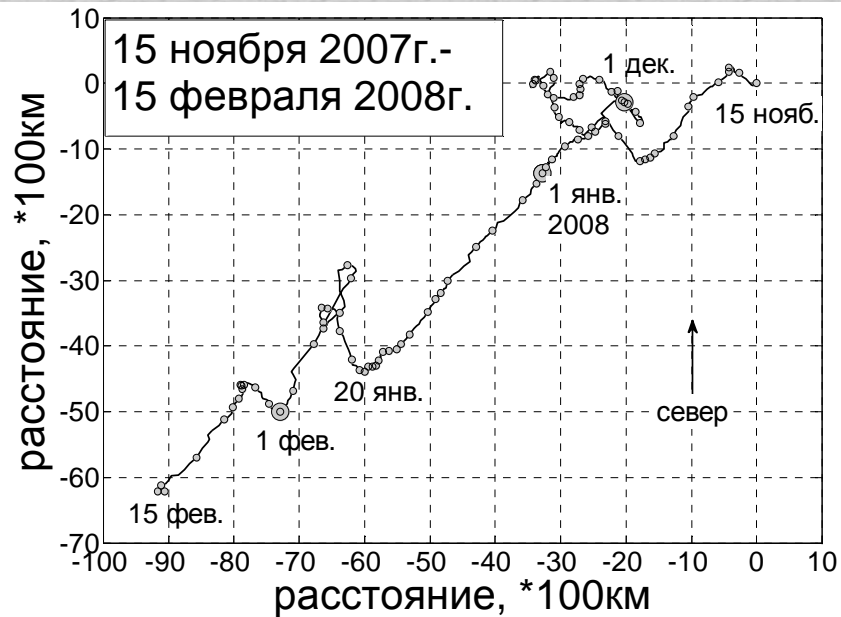
10-3-летние циклы.



Внутрисезонные циклы.

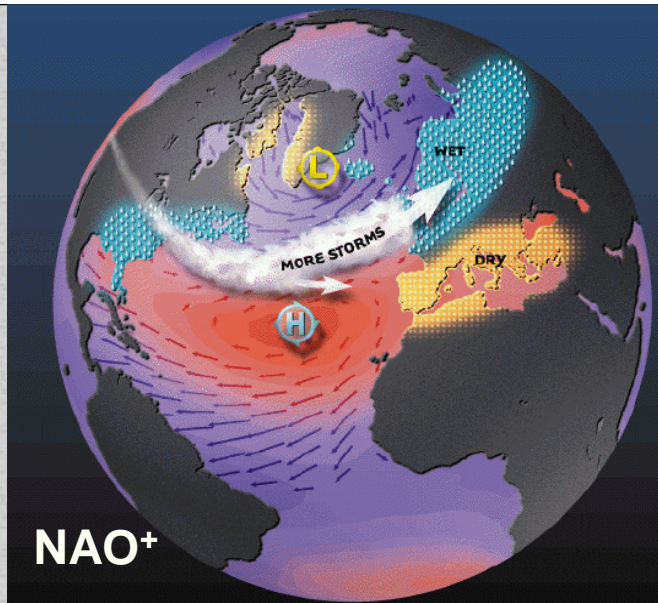
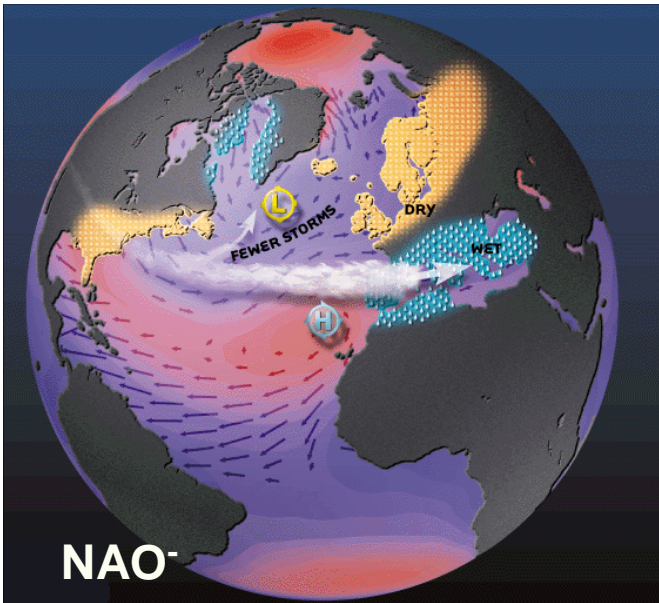


Годовые циклы.

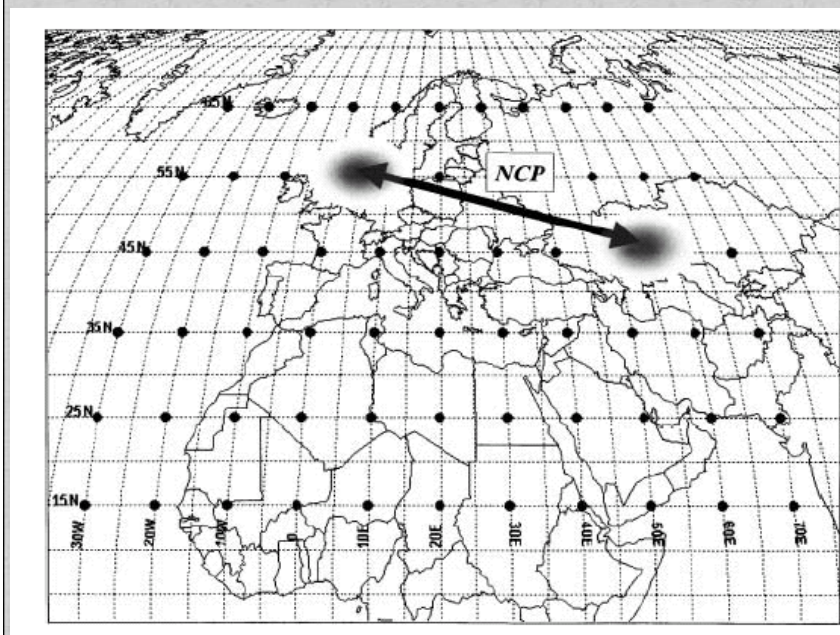


10-дневные е циклы.

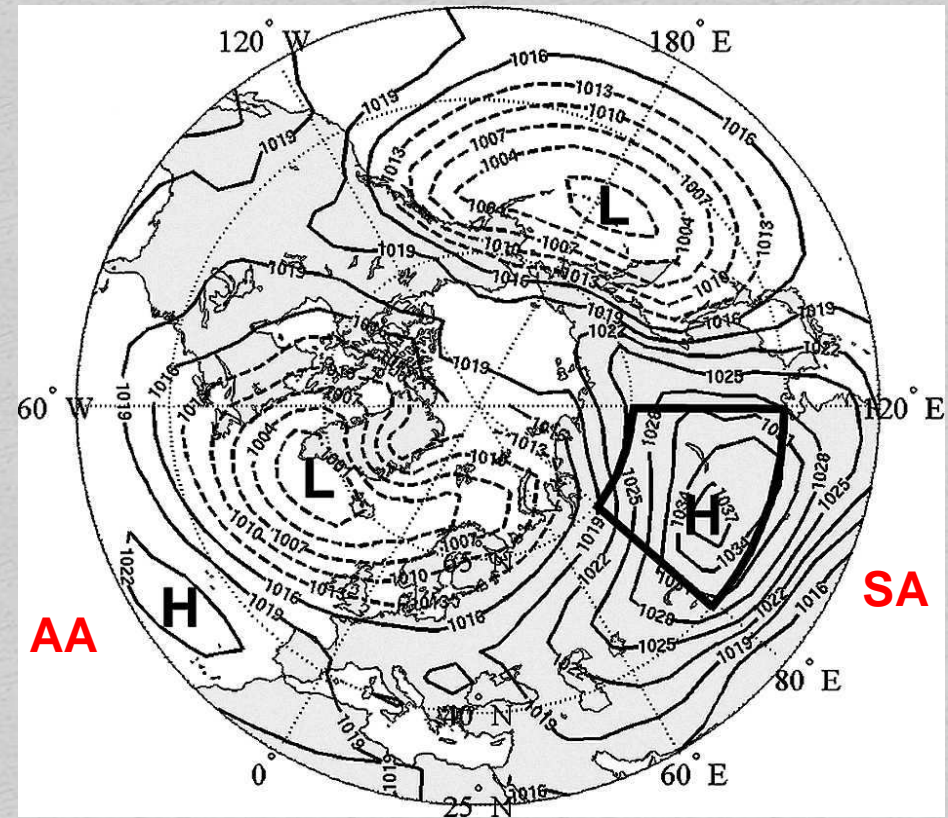
Подобие изменений ветров на метеостанции Геленджика на разных временных масштабах.



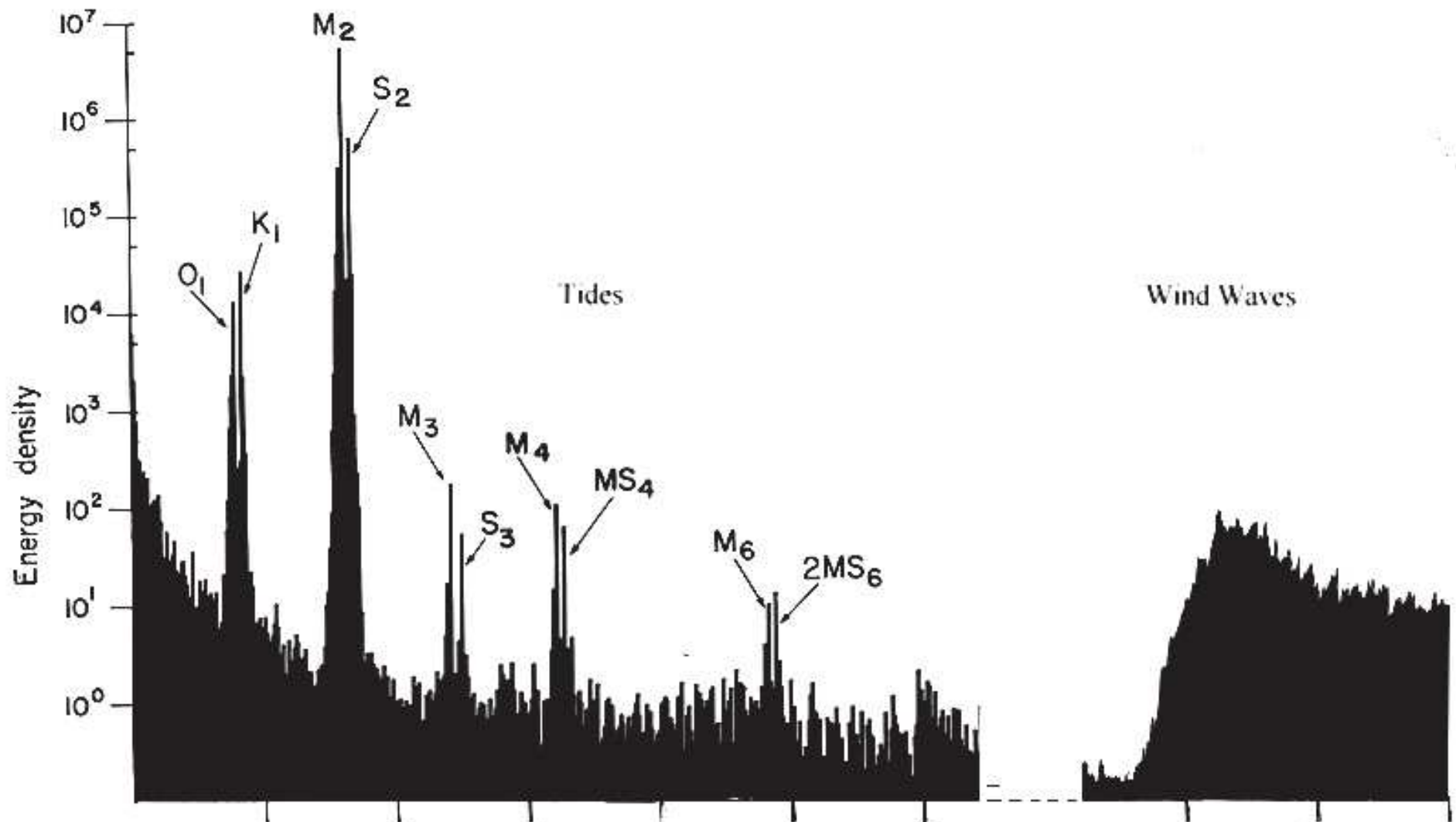
NAO,
EAWR (NCP),
Азорский (AA)
и Сибирский (SA)
антициклоны.



NCP



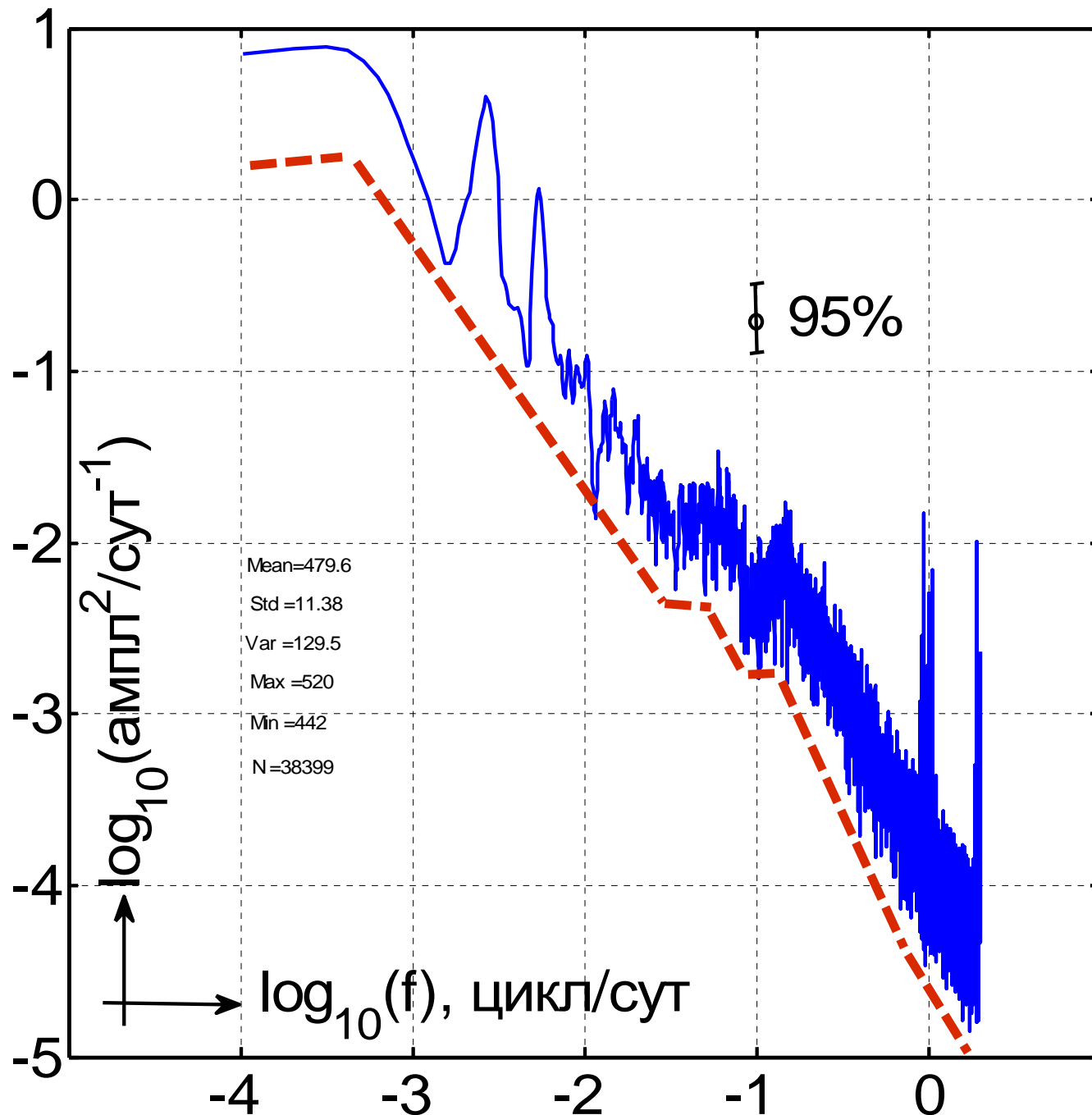
Временная изменчивость уровня моря
и метеорологических параметров



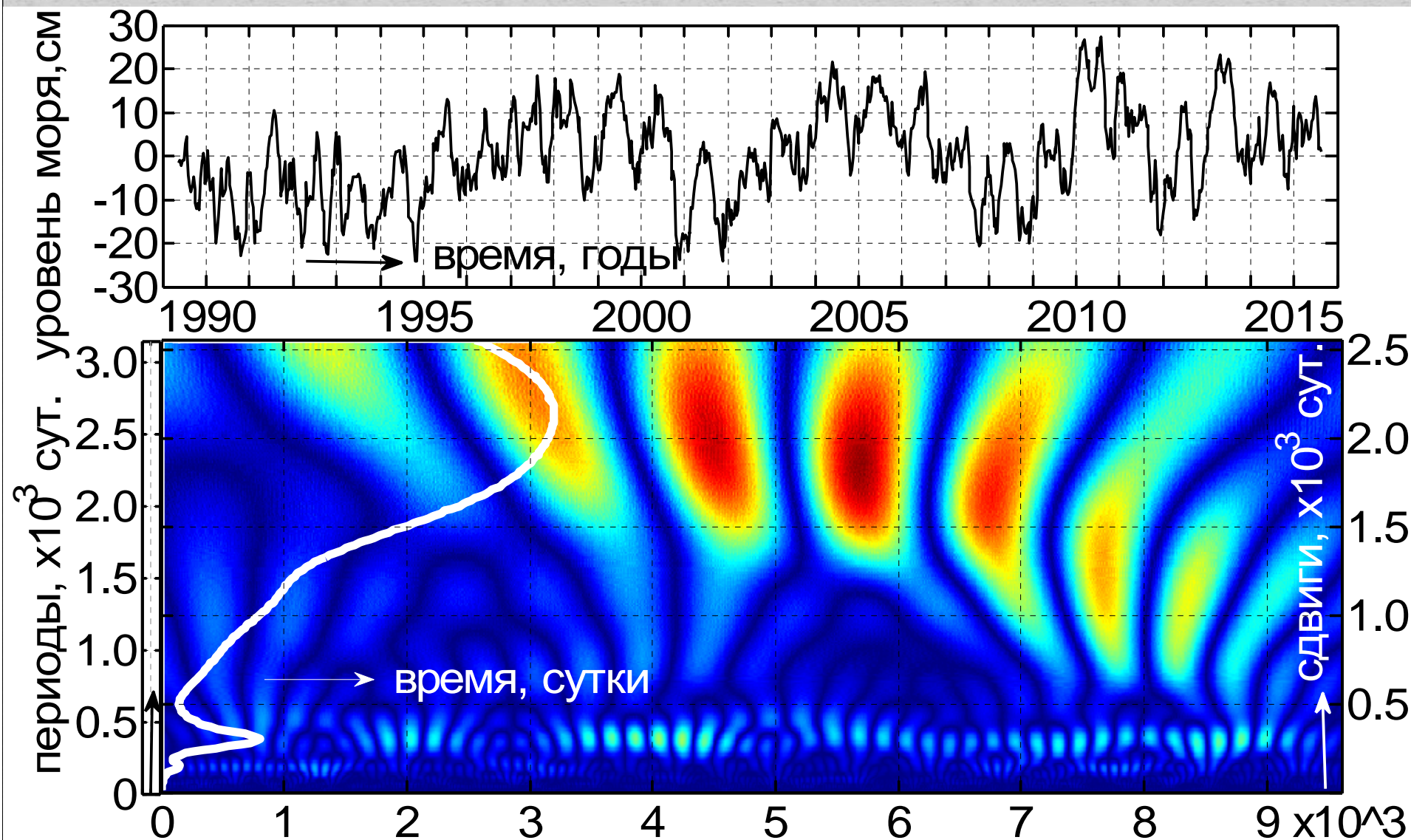
Обобщённый спектр колебаний уровня моря,
 IOC Manual on Sea Level Measurement and Interpretation.

Изменчивость уровня моря:

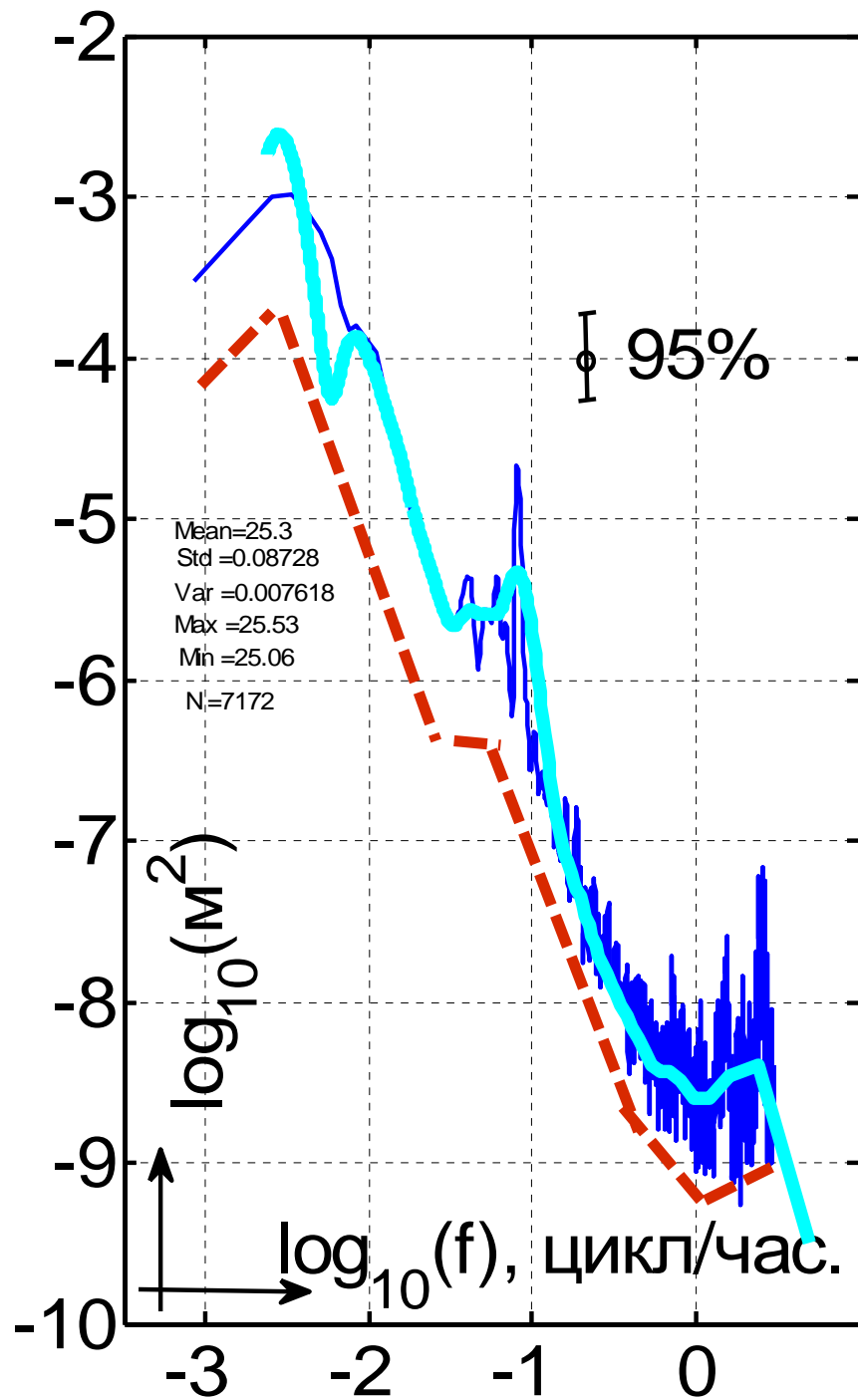
- поверхностные волны, периоды 0.1 – 20 сек., амплитуды - до 10 м;
- сейши, периоды от нескольких минут до нескольких часов, амплитуды - до 1 метра;
- главные приливы полусуточные и суточные; амплитуды 1 см - 1 м в открытом море; до 10 м в узкостях, вблизи берегов;
- обертоны приливов, с периодами от нескольких часов и менее; амплитуды 1 см – 10 см;
- инерционные волны, с периодами $12/\sin(\varphi)$ час. (φ - широта в град.), амплитуды до 1 см в открытом море; и до 10 см вблизи берегов;
- метеорологические воздействия (барические, ветровые, температурные, осадки, испарение) с характерными временами от 1 час до 1 года; амплитуды 1 см-5 м;
- сезонные, годовые с обертонами, стерические изменения, амплитуды - до 1 м;
- долговременные (климатические) изменения, тренды ~ 1-2 мм/год;
- долговременные (палео) колебания, с временами более тысячи лет, амплитуды-десятки метров.



Спектральная плотность (синяя линия) колебаний уровня моря, на метеостанции г. Геленджика, в период 0ч., 20 мая, 1989 г. по 15 ч., 30 сентября, 2015 г., дискр. – 6 час., сглаживание 20 степеней свободы, средний уровень 479.6 см; дисперсия 129.9 см²; с.к.о. 11.36 см; минимум 442 см; максимум 520 см; количество отсчётов N=38399.



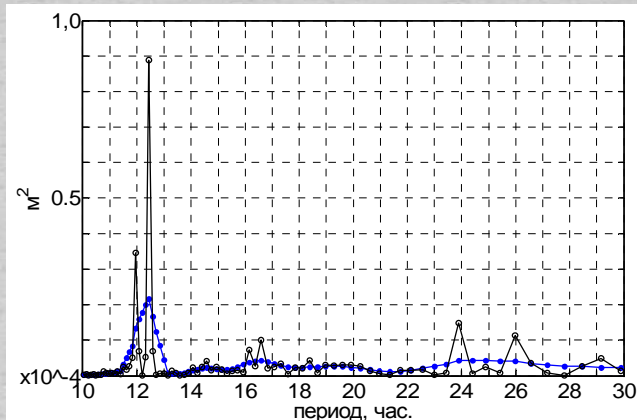
Вэйвлет-диаграмма колебаний уровня моря, по данным метеостанции, в период 0ч., 20 мая, 1989 г. по 15 ч., 30 июня, 2015 г.



Спектр колебаний придонного давления на станции AWAC в период 01.10, 12ч00м по 20.11, 07ч10м 2013 г. Дискретность измерений -10 мин. Сглаженный спектр с 20-ю степенями свободы – синяя линия. Проинтегрированная по времени вэйвлет-амплитуда – зелёная линия. Структура спектра по наклонам - красный пунктир.

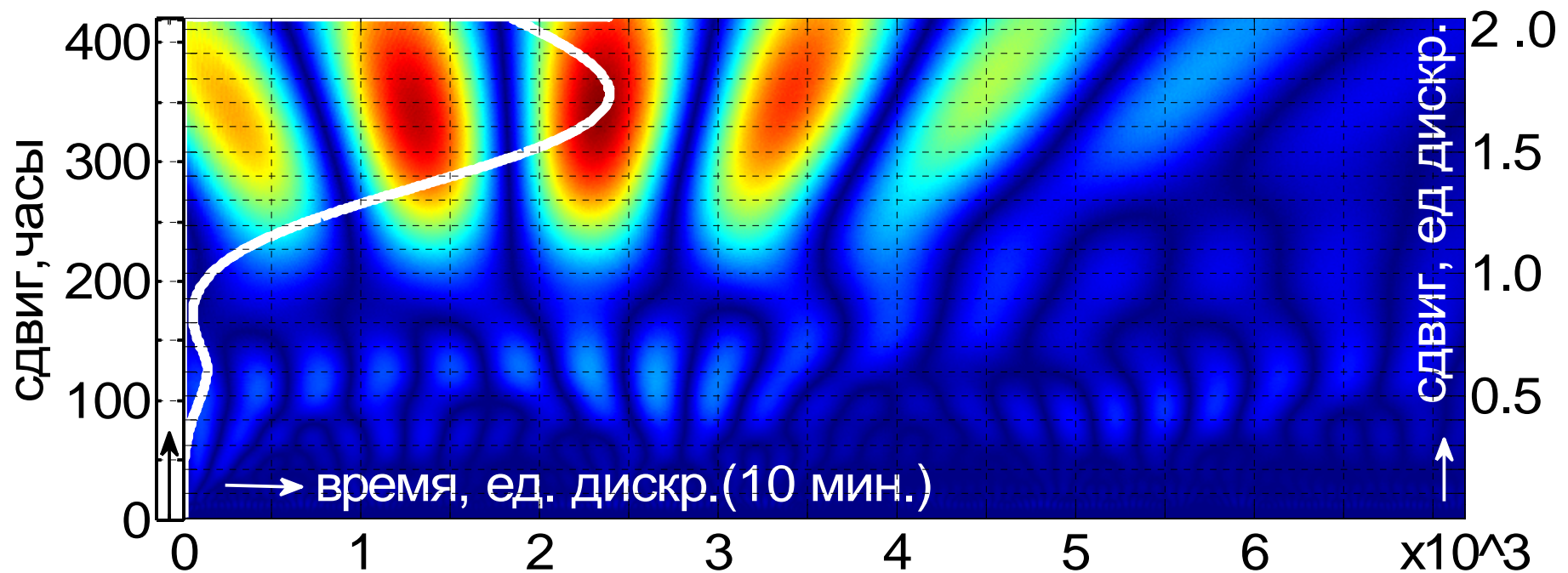
Составляющие изменчивости уровня моря на станции AWAC в период 01.10, 12ч00м по 20.11, 07ч10м 2013 г. Дискретность измерений -10 мин.

Диапазон, периодов, час.	Дисперсия, см ²	СКО, см	Диапазон отклонений от среднего, ± см
Суммарная, 1195 - 1/3 (49.79 сут. – 20 мин.)	76.0	8.7	26.2
Низкочастотная 398+199, 398-159 (16.6. сут.)	56.0	7.5	22.5
Около 26. час 25,99± 0.57	0.16	0.40	1.2
Суточная, 23.91± 0.48	0.16	0.40	1.2
Инерционная, 16.60± 0.23	0.15	0.39	1.2
Полусуточная, лунная 12.45± 0.13	1.01	1.01	3.0
Полусуточная, солнечная 11.95± 0.12	0.47	0.68	2.1
Фон 10-1	0.27	0.52	1.6

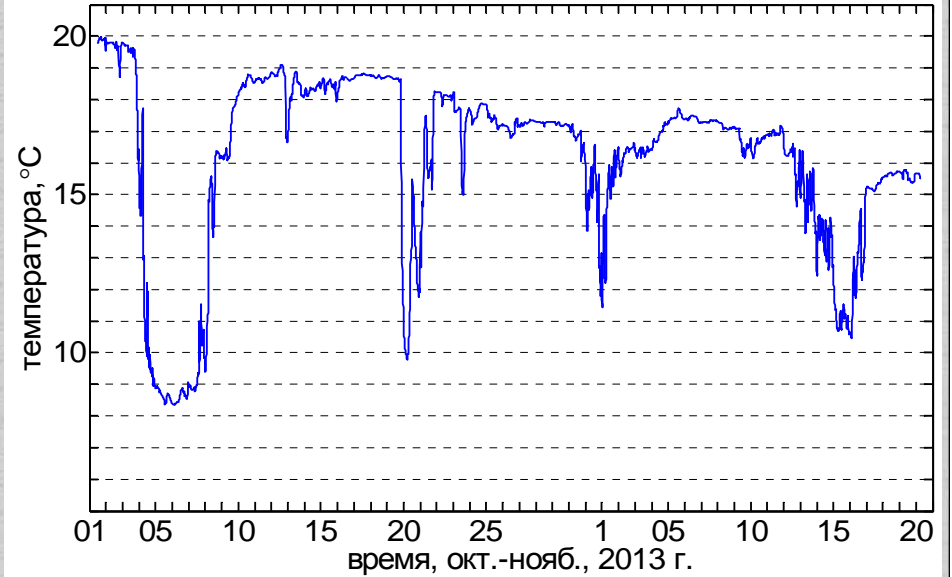
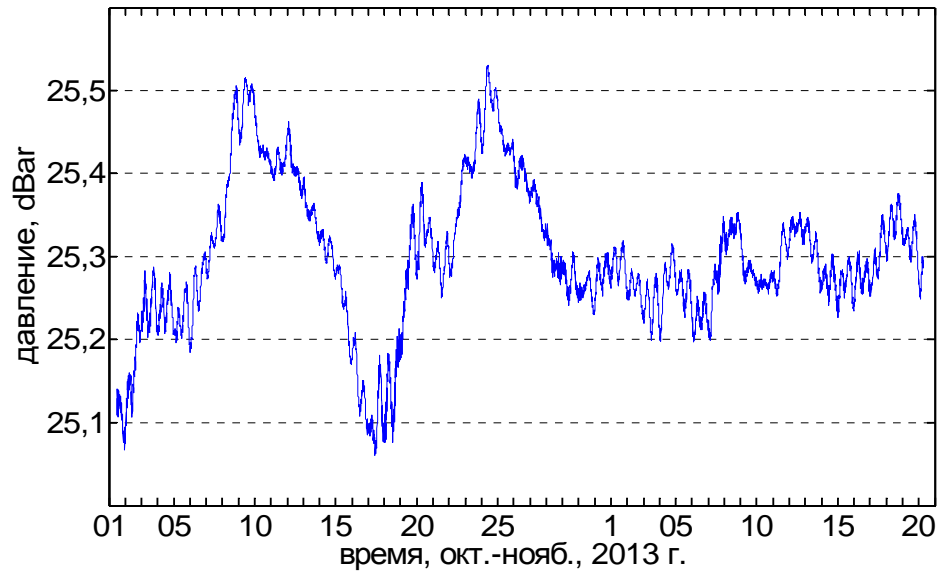


Фрагмент амплитудного спектра Фурье (периодограмма) – чёрная линия,
сглаженный амплитудный спектр (окно фильтра -10 отсчётов спектра) – синяя линия.

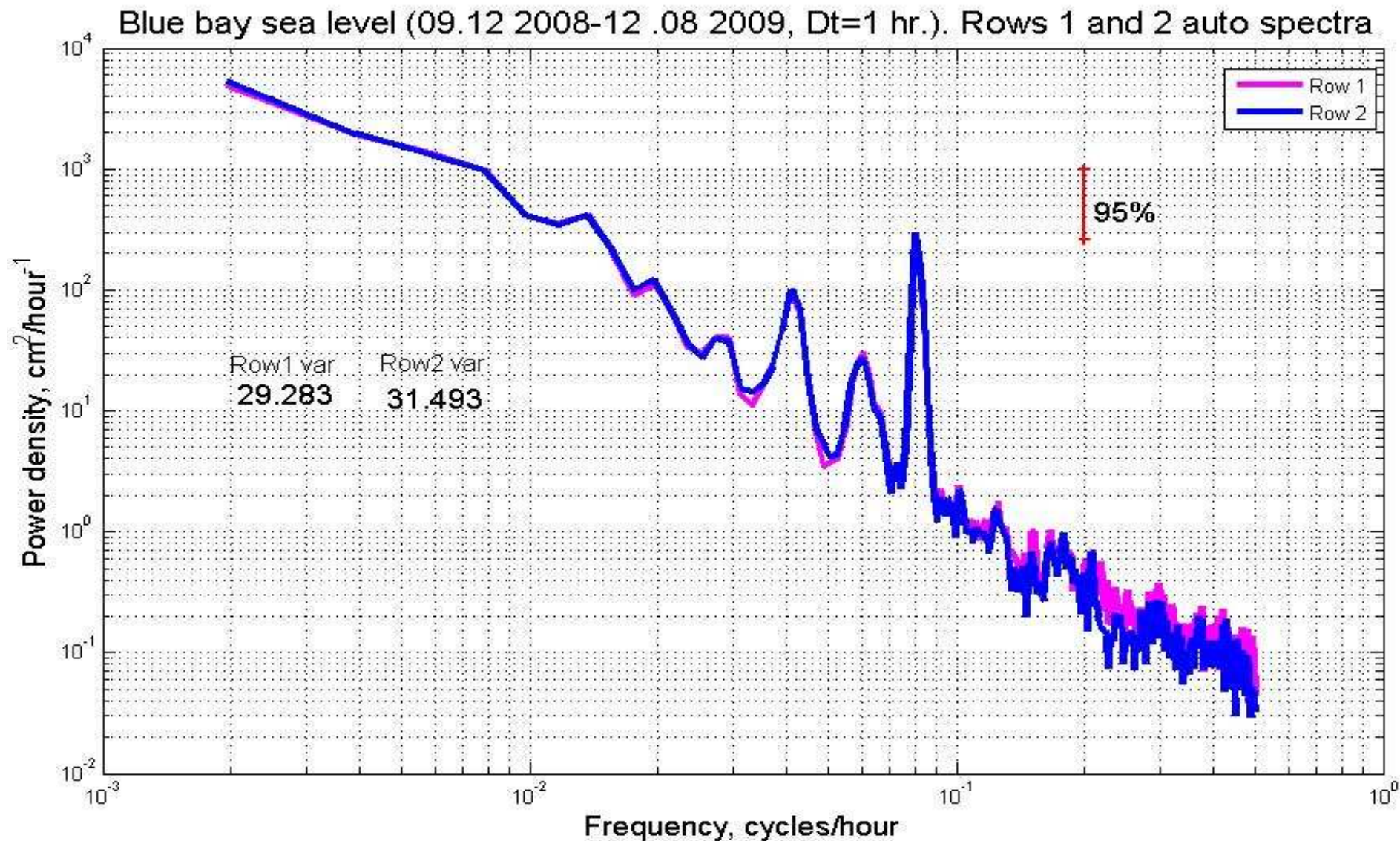
Прим.: диапазоны периодов с учётом разрешения спектра



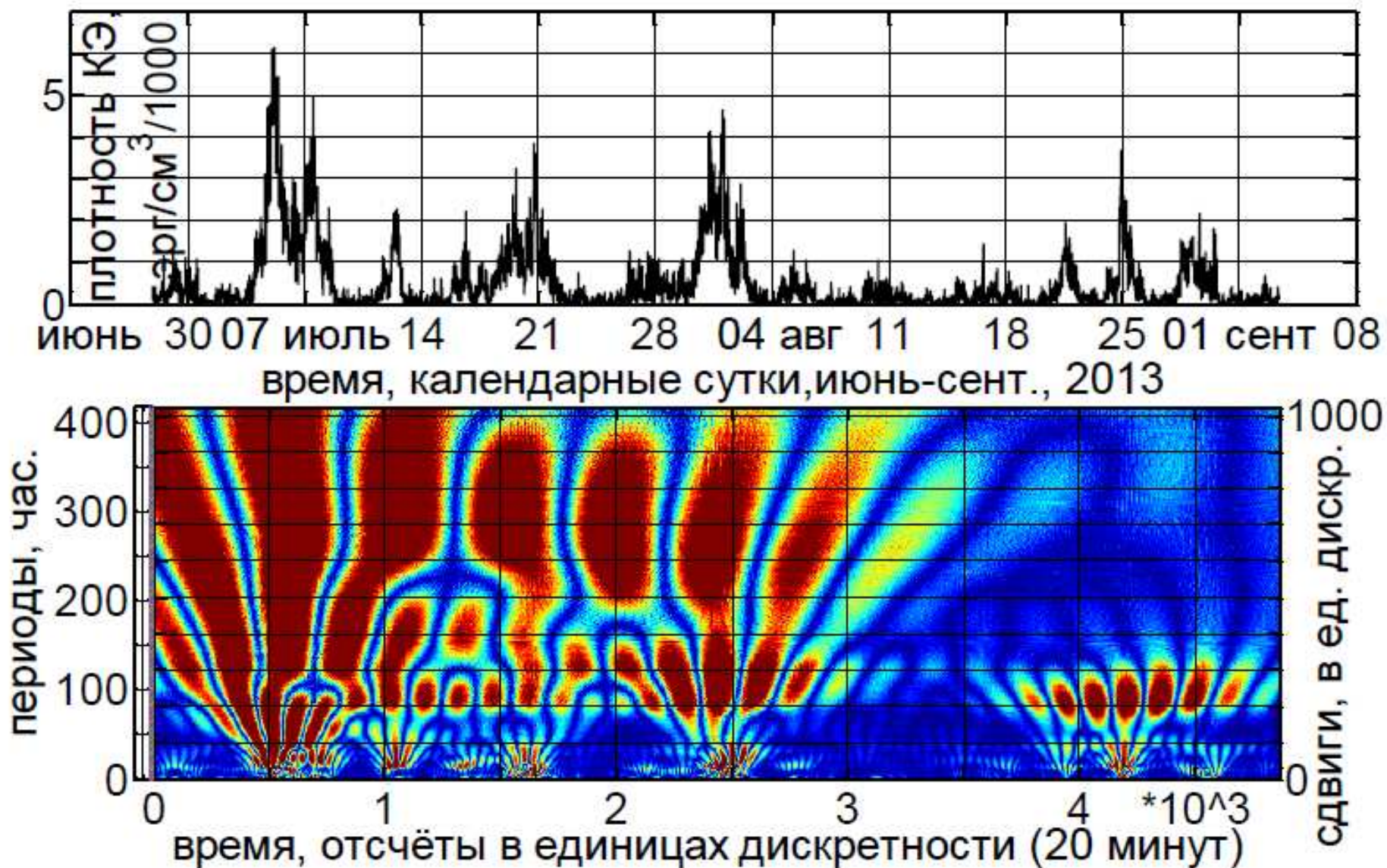
Вэйвлет-диаграмма колебаний давления около дна моря на станции AWAC в период 01.10, 12ч00м по 20.11, 07ч10м 2013 г. Дискретность измерений -10 мин. Принтегрированная по времени вэйвлет-амплитуда – белая линия. Диапазон сдвигов 1-2000 ед. дискретности.



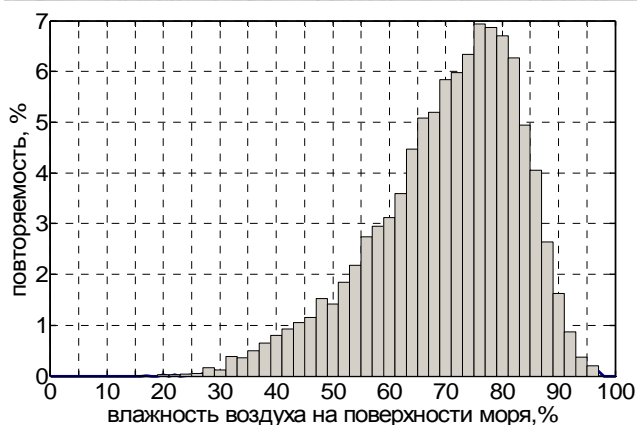
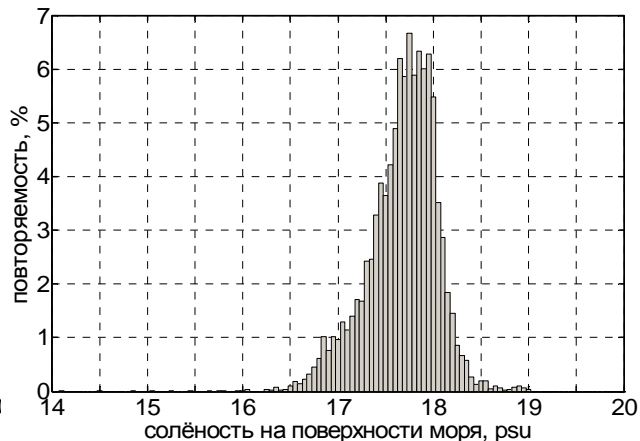
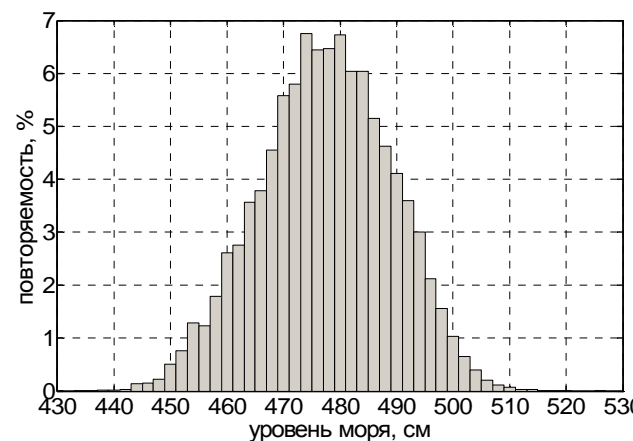
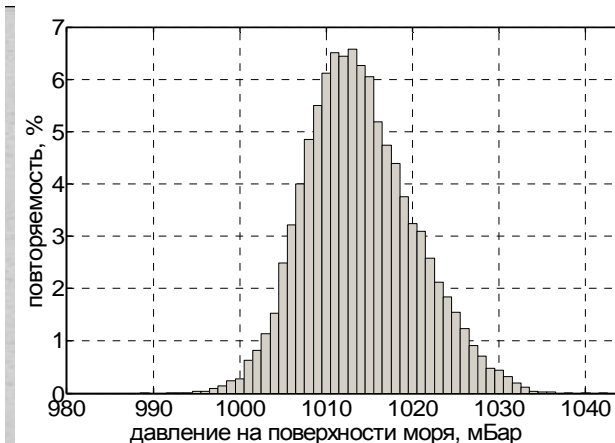
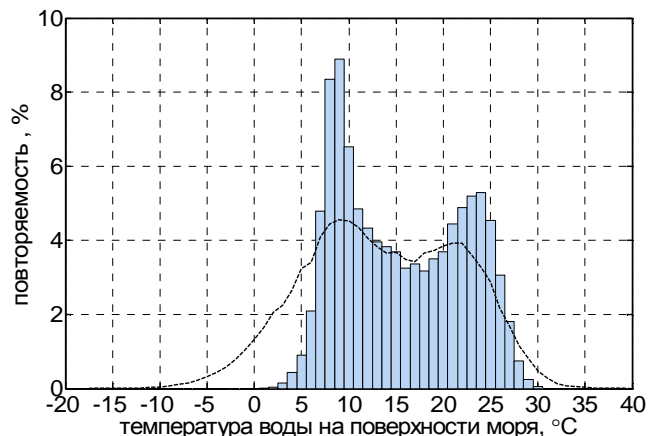
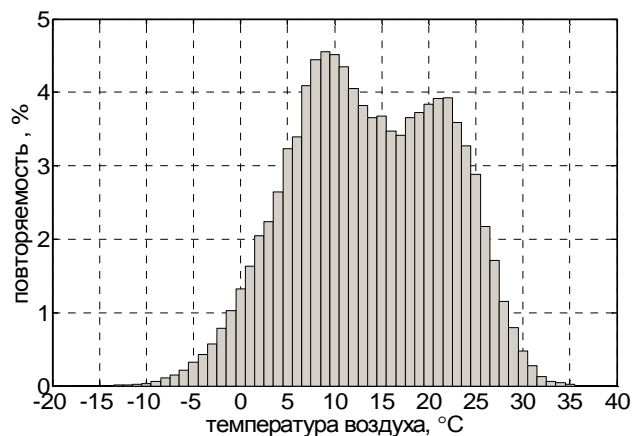
Изменчивости придонного давления и температуры на станции ADCP (AWAC) в период 01.10, 12ч00м по 20.11, 07ч10м 2013 г.. Дискретность измерений -10 мин.



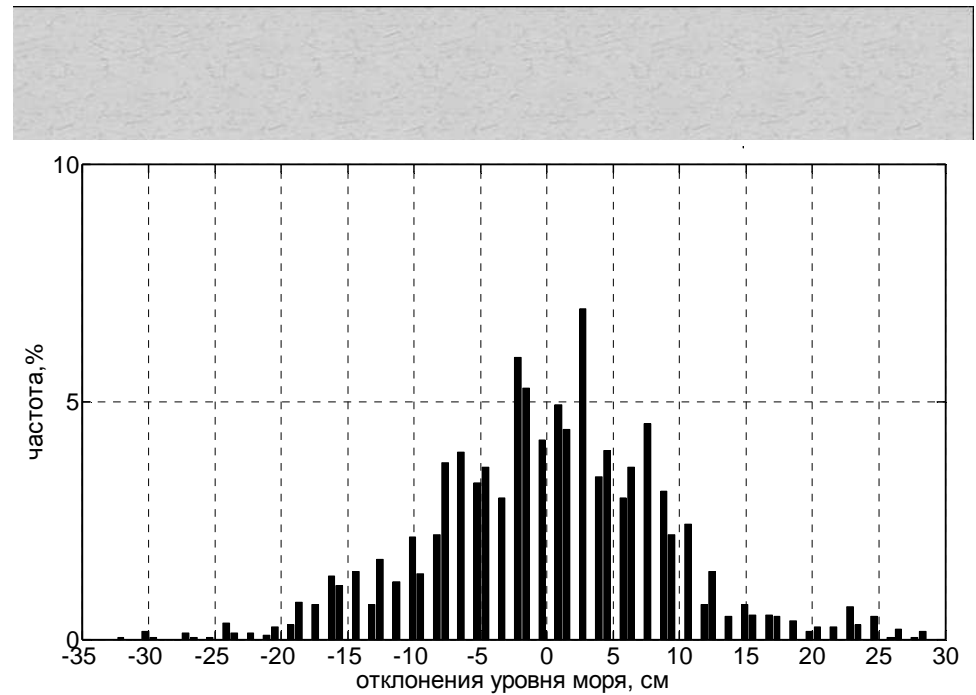
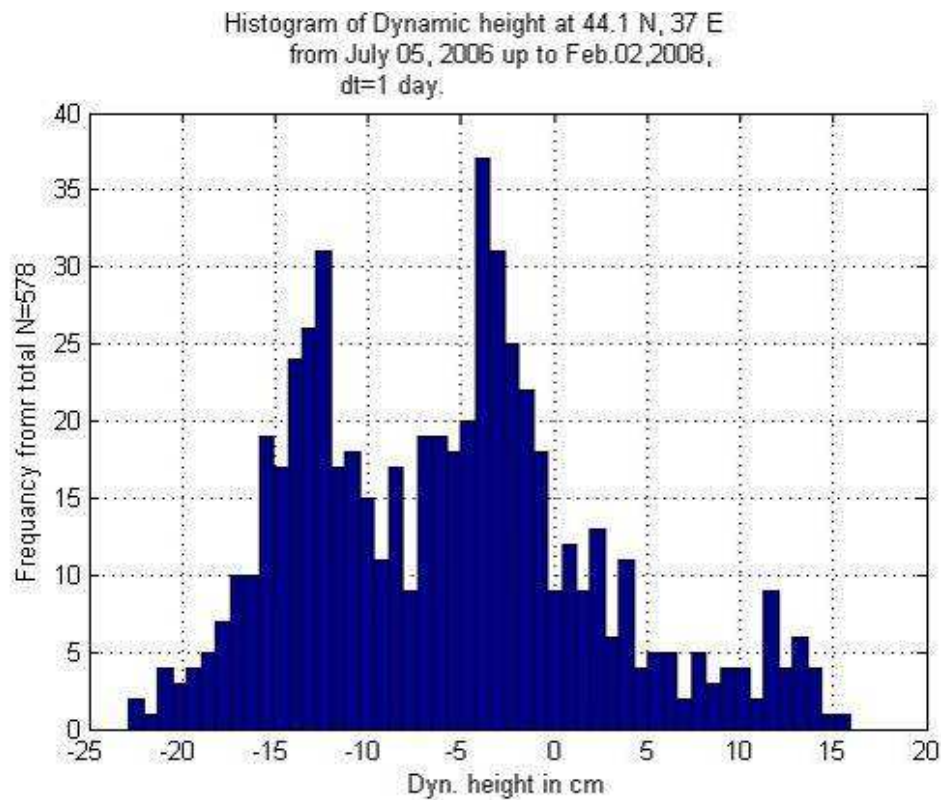
Спектральная плотность колебаний уровня моря в Голубой бухте (44.58°N , 37.98°E) в период с декабря 2008 по август 2009 г. по измерениям датчиком давления через 1 час, дисперсия- 31.5cm^2 .



.Вэйвлет-диаграмма плотности горизонтальной кинетической энергии течений в верхнем слое (горизонт 19,5 м, глубина 100 м) на акватории вблизи Голубой бухты. Дискретность измерений – 20 мин.

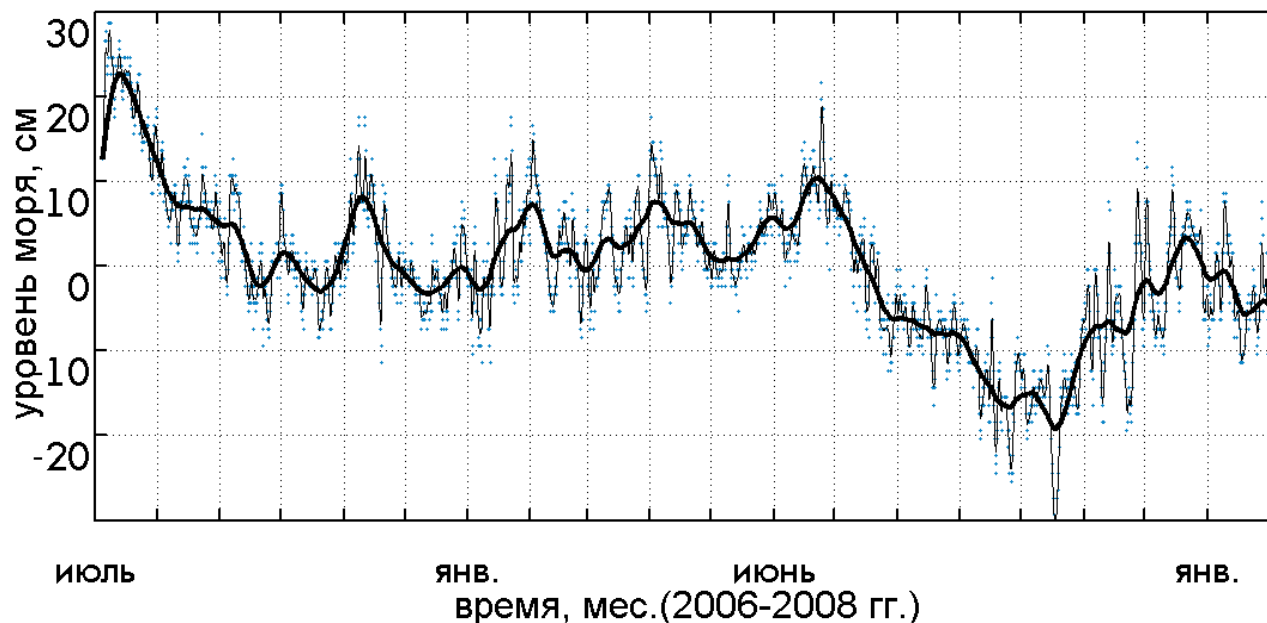
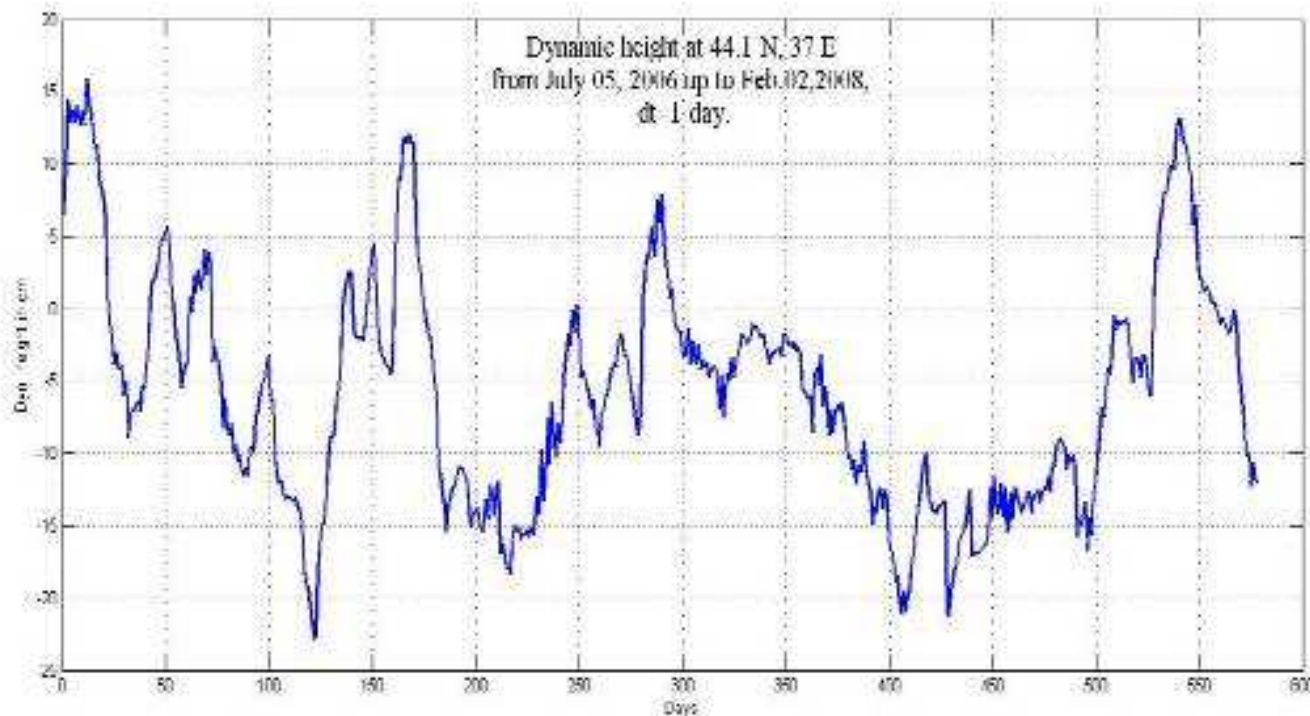


Гистограммы метеопараметров по измерениям на метеостанции г. Геленджика,
 Твоздуха, N = 127352, период 1968-2011 г., через 3 час.; Тводы, N = 56249, период 1968-2011 г., через 6 час.; Давление P N = 15294 период 1968-2011 г., через 24 час.; Влажность N = 9072 период 1968-2011 г., через 24 час., с перерывом 1990-2009 г.; Уровень моря N = 56079 период 1968-2011 г., через 6 час.; Осадки N = 15979 период 1968-2011 г., через 24 час.; Солёность N = 7943 период 1990-2011 г., через 24 час.



Гистограмма высот спутникового динамического уровня моря; в период 05.07.2006-02.02.2008.

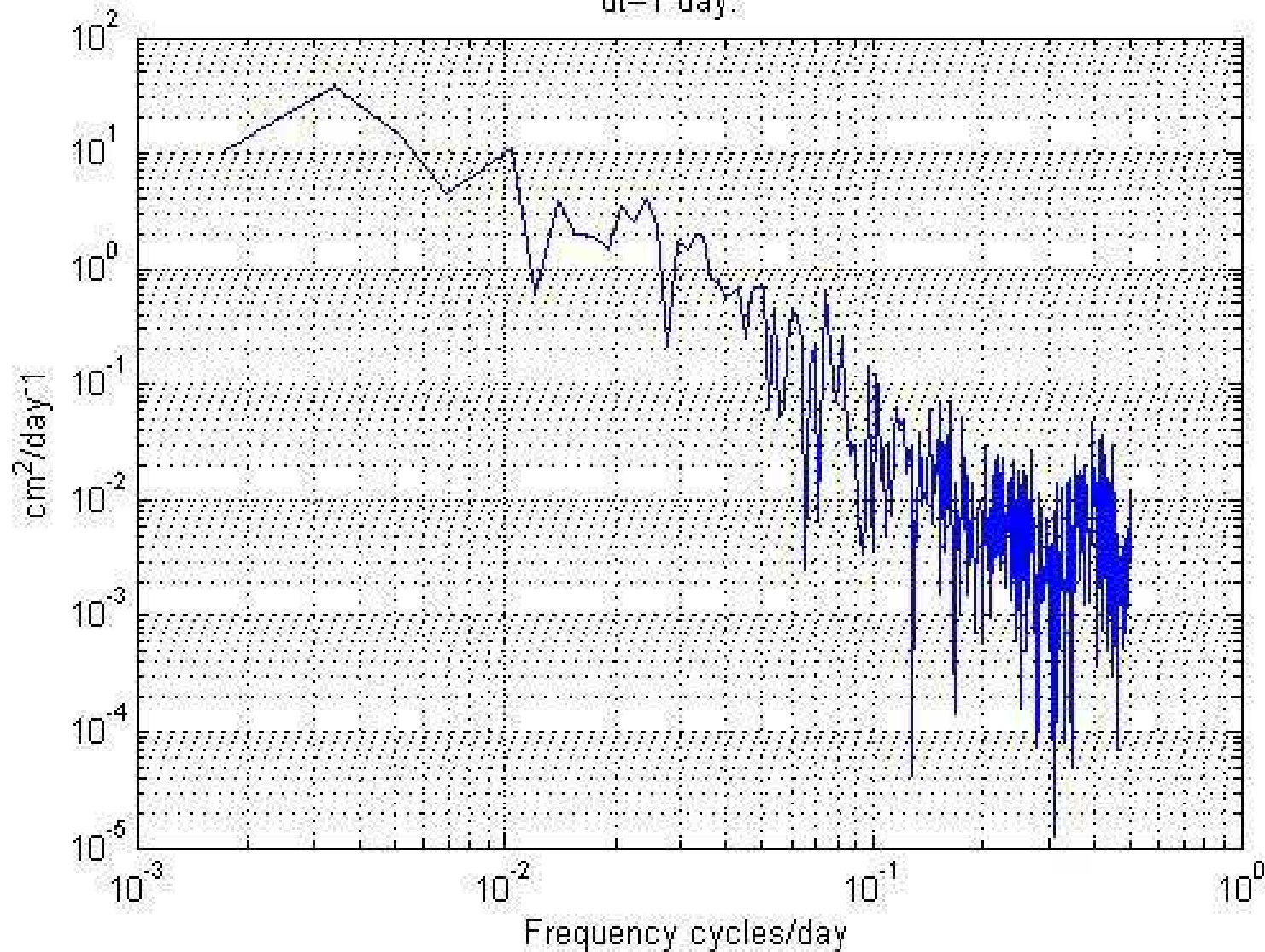
Гистограмма уровня моря на метеостанции в тот же период.



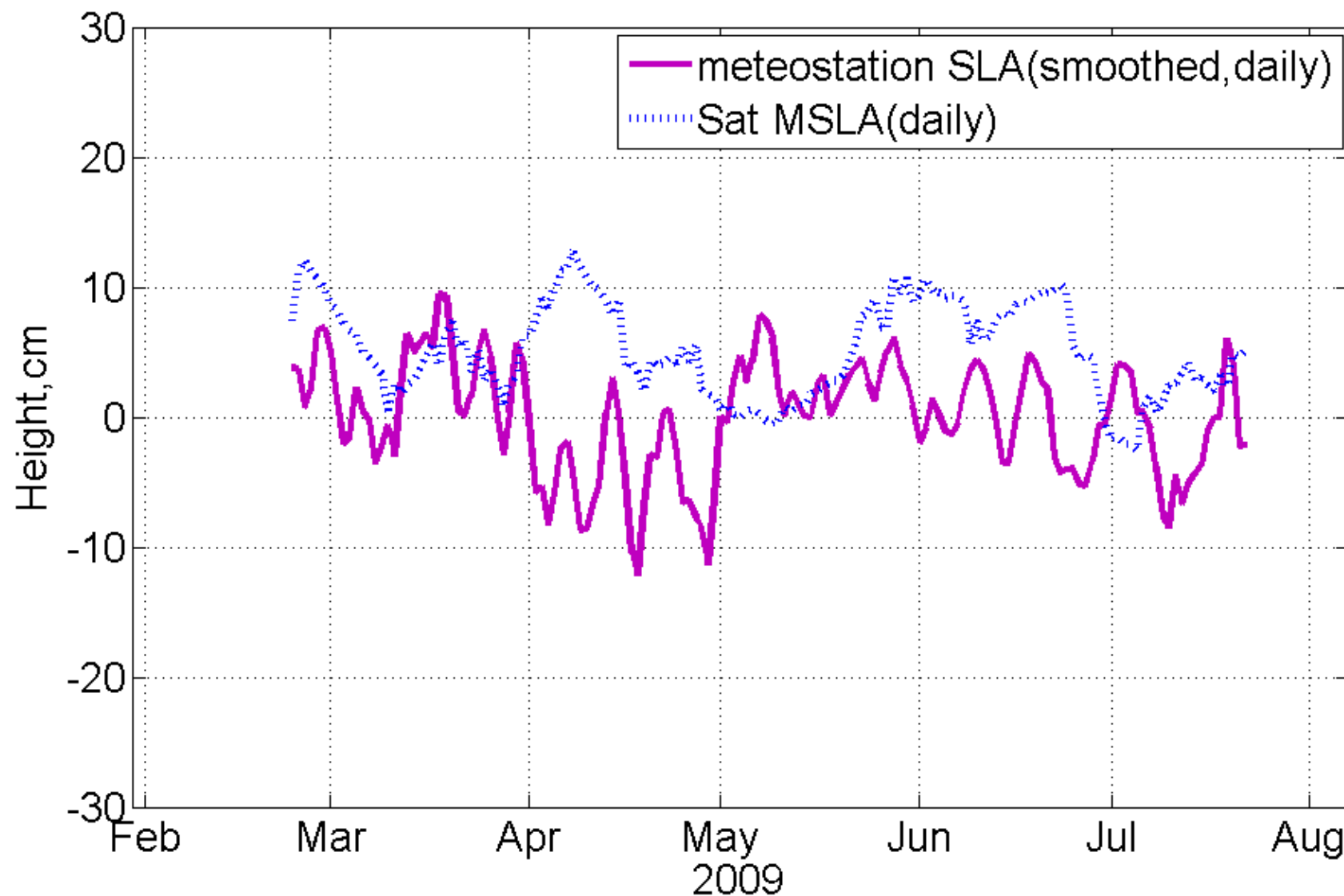
а) Ход динамической составляющей уровня моря в точке вблизи Полигона (41.1N,37.0E), на протяжении около полутора лет, 05.07.2006-02.02.2008. Дискр. измерений 1 сутки. Данные AVISO.

б) Аномалии уровня моря на метеостанции в тот же период 05.07.2006-02.02.2008.. Точки-измерения уровня с дискретностью 6 час. Тонкие сплошные линии - сглаженные суточные значения, сплошная линия— фильтр с окном 10 сут.

Spectrum of Dynamic height at 44.1 N, 37 E
from July 05, 2006 up to Feb.02,2008,
dt=1 day.



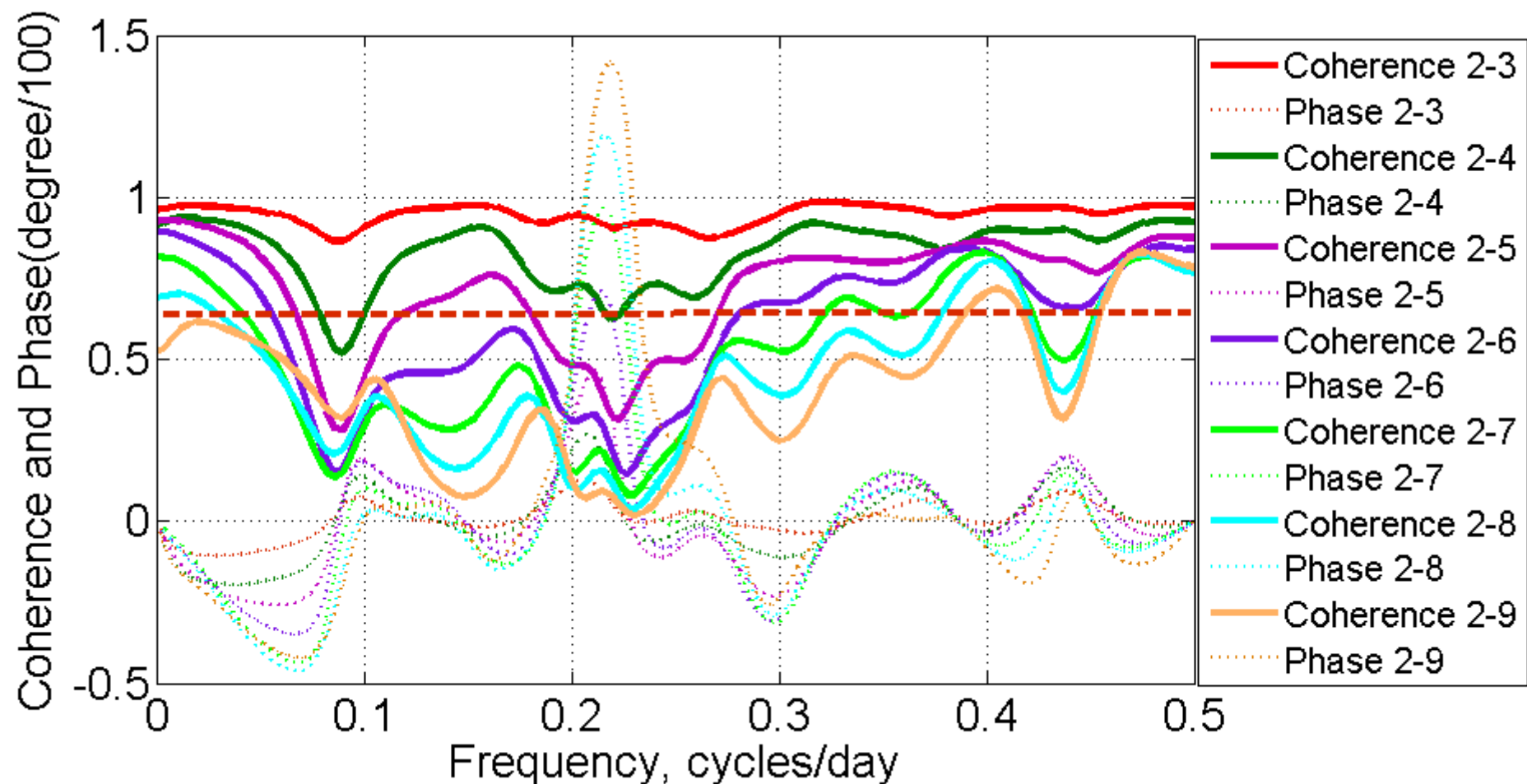
Несглаженный спектр (периодограмма) временного ряда спутникового динамического уровня моря.



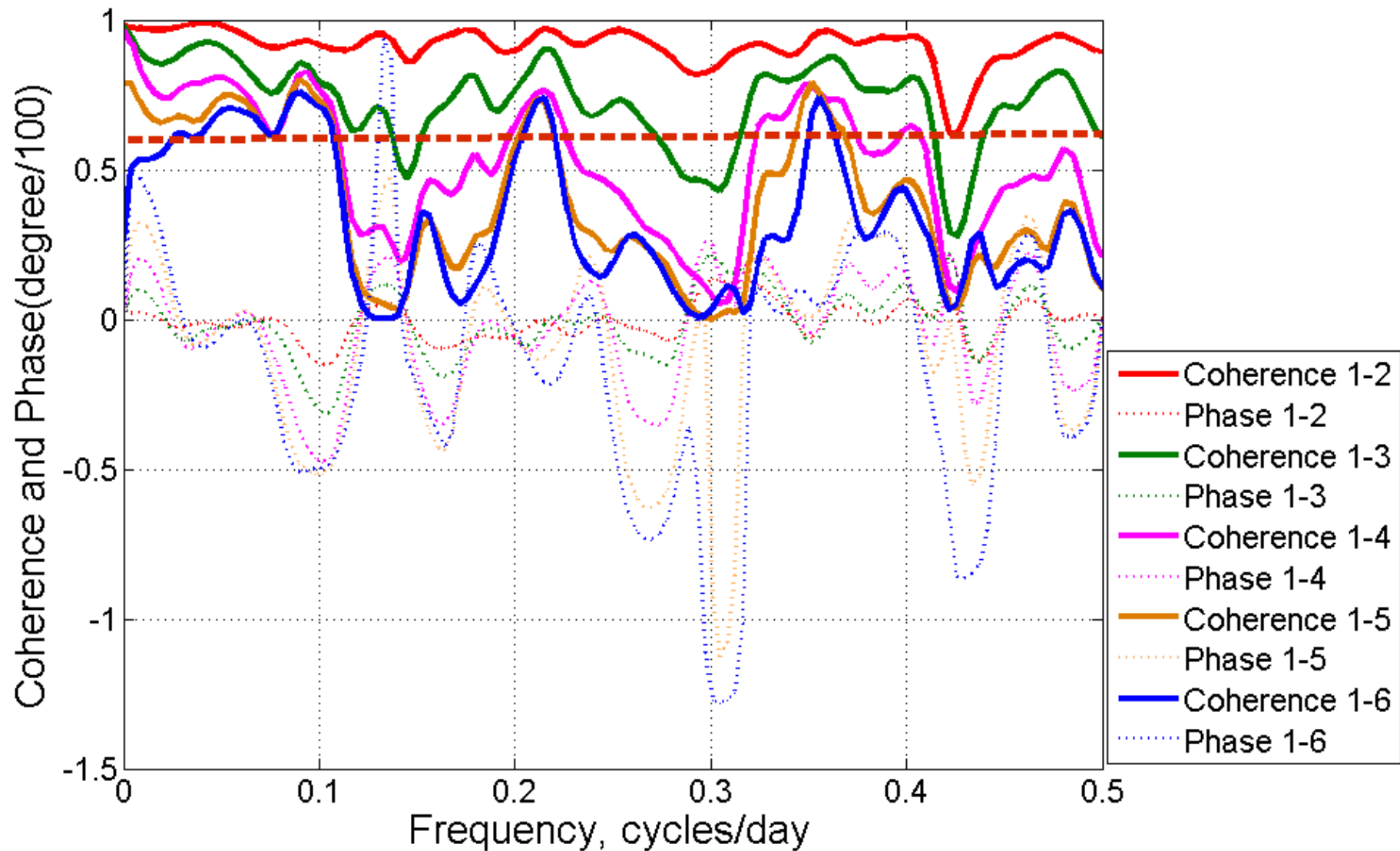
Изменения уровня моря на метеостанции ($44.55^{\circ}\text{N}, 38.05^{\circ}\text{E}$, г. Геленджик) - фиолетовая линия, и спутниковые аномалии уровня моря в точке с координатами $44.5\text{N}, 38.0\text{E}$, на расстоянии 3.7 морских миль от метеостанции - голубые точки.

N п/п	Широта, N	Долгота, E	Средняя дин. высота, см	Дисперсия дин. высоты, см²	С.К.О. дин. высоты, см	Максимум отрицательного отклонения дин. высоты, см	Максимум положительного отклонения дин. высоты, см	Прим.
1	44.6	38.0	-2.97	50	7.0	-21.6	15.2	Тонкий мыс, шельф
2.	44.6	37.6	-2.90	52	7.2	-20.4	12.6	
3.	44.6	37.0	-2.53	60	7.7	-20.9	18.1	
4.	44.6	36.3	-2.32	55	7.4	-21.0	18.1	
5.	44.6	36.0	-2.53	52	7.2	-20.8	18.0	
6.	44.6	35.7	-2.72	50	7.1	-22.1	19.9	
7.	44.3	35.7	-2.84	55	7.4	-23.2	19.8	
8.	44.1	37.0	-3.03	74	8.6	-24.2	18.8	Мористее, к юго-западу от Полигона

Оценка интенсивности динамических колебаний уровня моря вблизи Голубой бухты (Черное море) по данным альтиметрических измерений AVISO в период с декабря 2001 г. по февраль 2008 г.

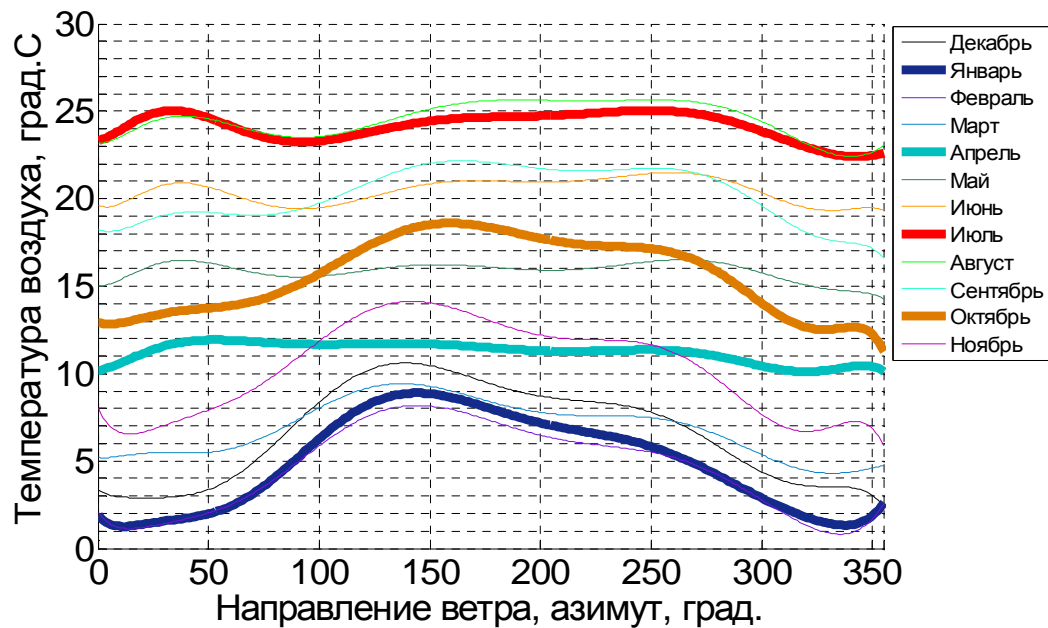


Когерентности и фазы между рядом АУМ в точке № 2 и рядами АУМ в точках №3,4,5,6,7,8,9.. Красная пунктирная линия отмечает 95% уровень нулевой когерентности.

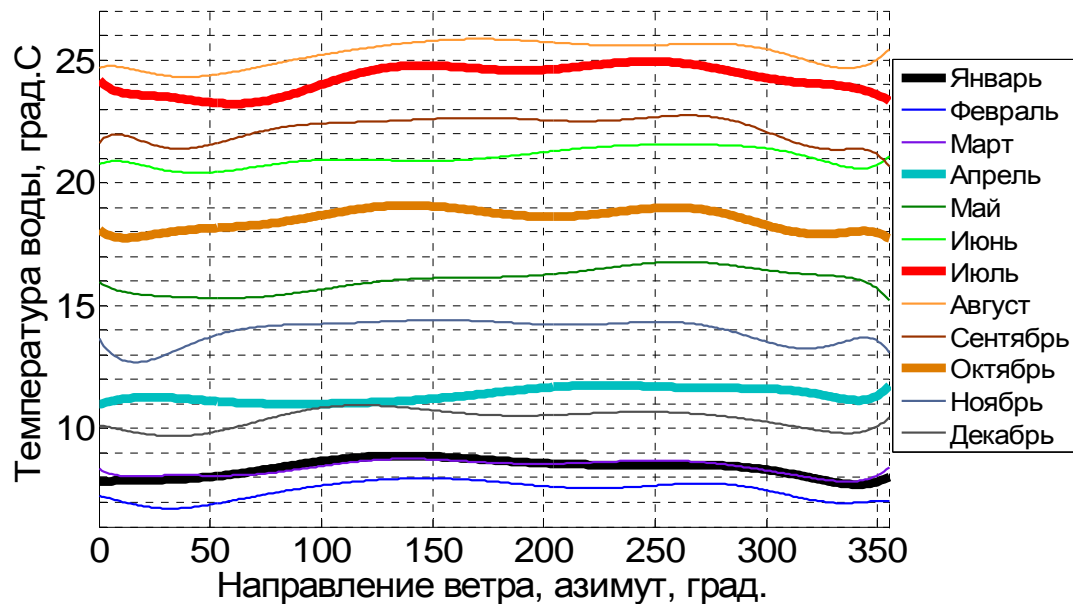


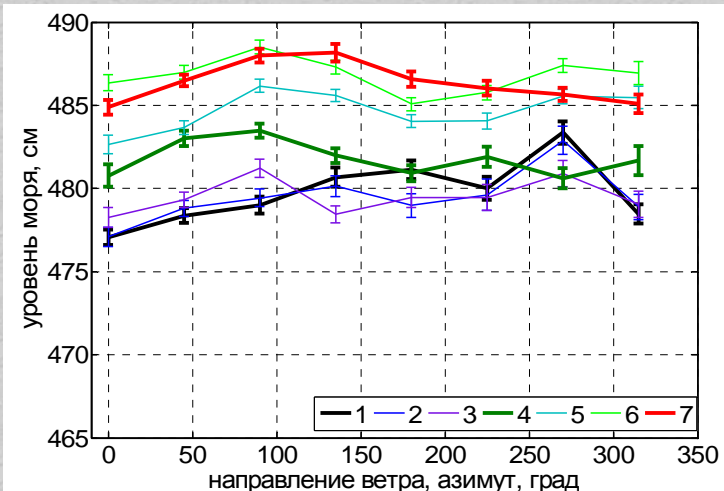
Когерентности и фазы между рядом ТПО в точке №1 и рядами ТПО в точках №2, 3,4,5,6. В Таблице 3 указаны координаты точек. Красная пунктирная линия отмечает 95% уровень нулевой когерентности.

**Влияние сезонных ветров на уровень моря,
температуру воздуха и температуру поверхности моря.**

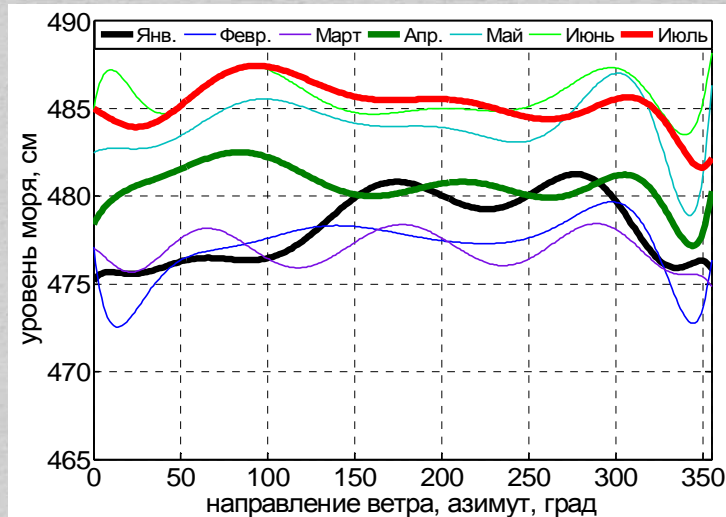


Летом, в отличие от воздуха, ТПМ понижается при СВ ветрах до 23.2°C, при средней ТПМ ~25°C для южных ветров

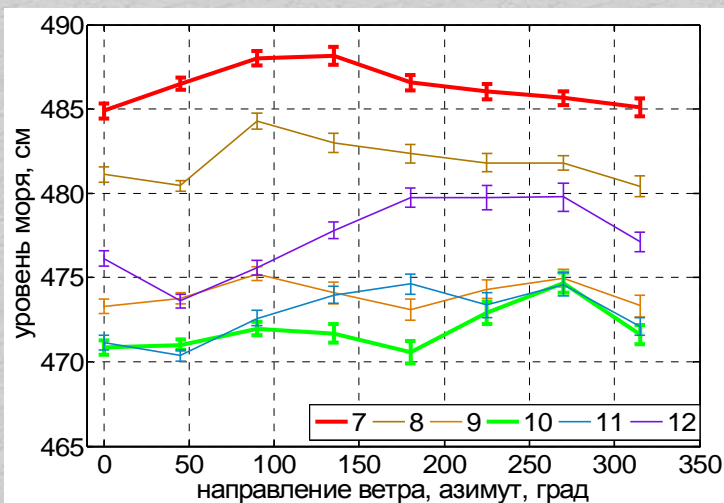




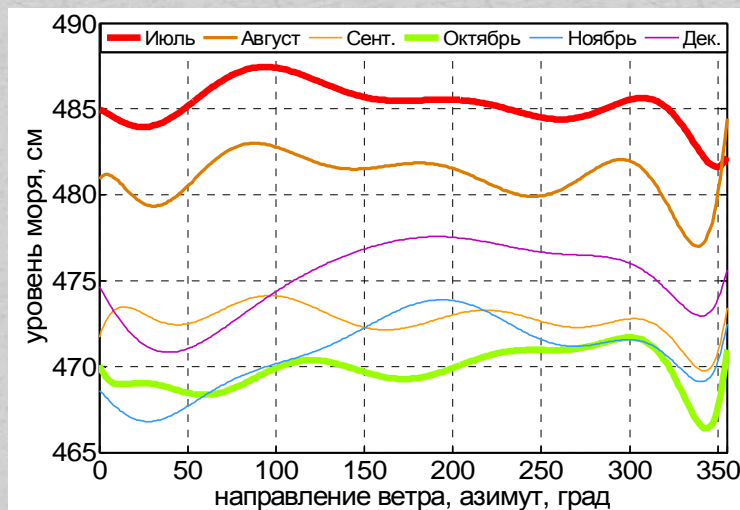
а)



б)



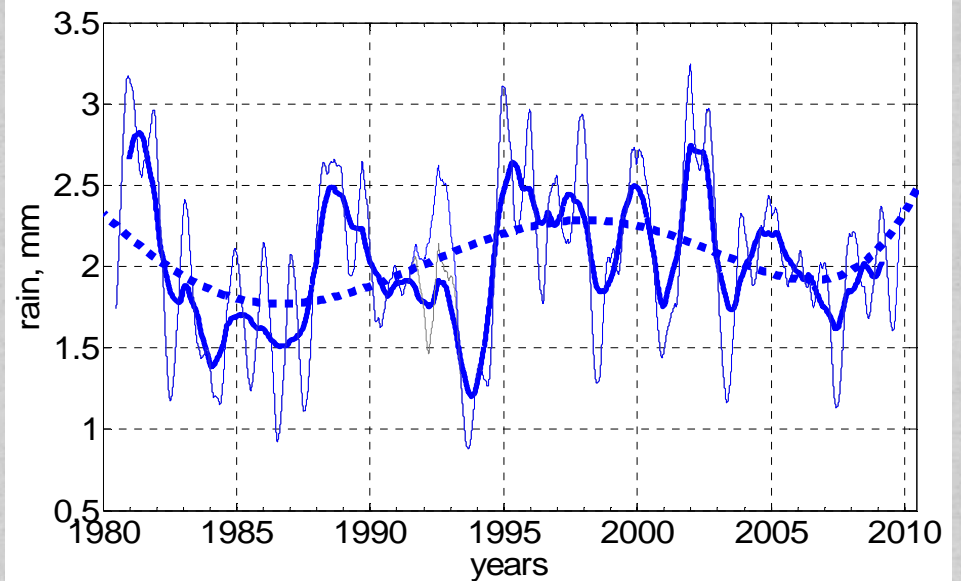
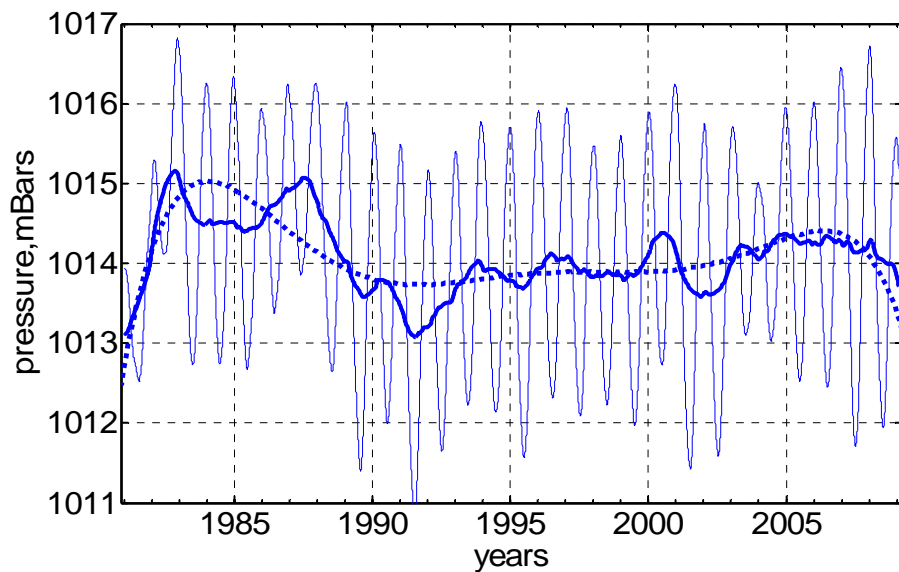
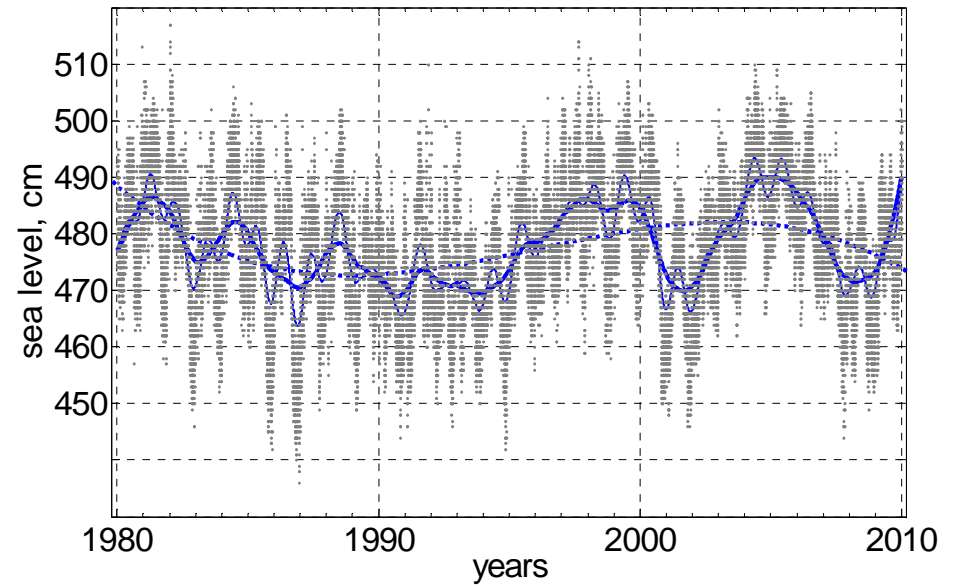
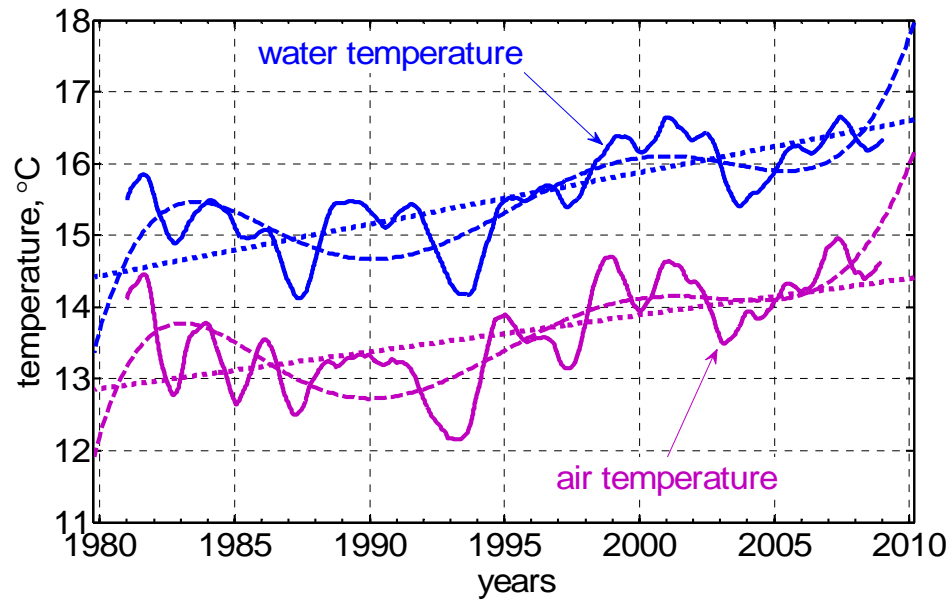
в)



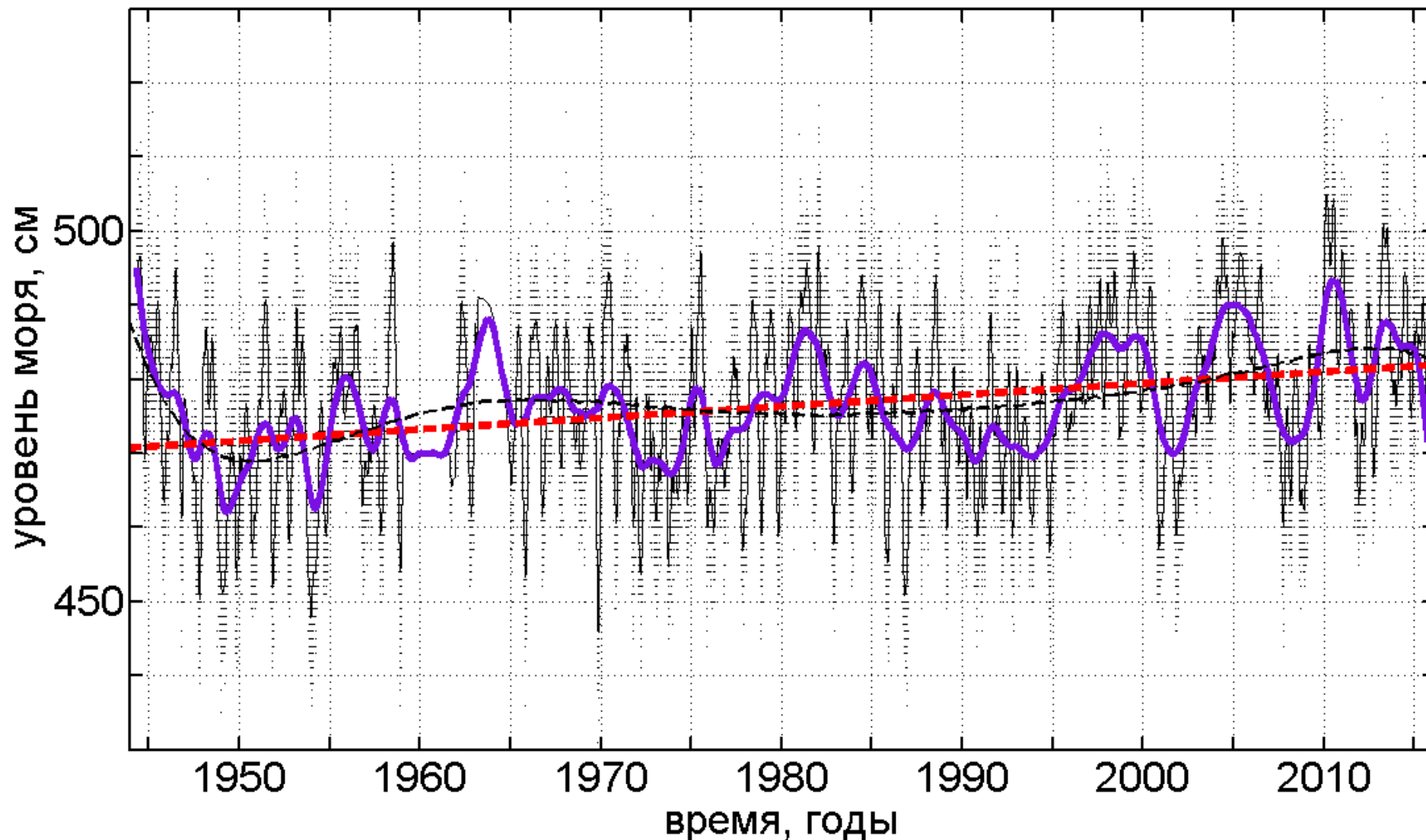
г)

Зависимости среднего уровня моря от направления среднего по румбам а), в) и по 10-град. секторам б), г) ветра, по месяцам первой половины года а), б) и второй половины года в), г), 1-январь, 2-февраль, 3-март, 4-апрель, 5-май, 6-июнь, 7-июль - для первой половины года; 7-июль, 8-август, 9-сентябрь, 10-октябрь, 11-ноябрь, 12-декабрь.- для второй половины года.

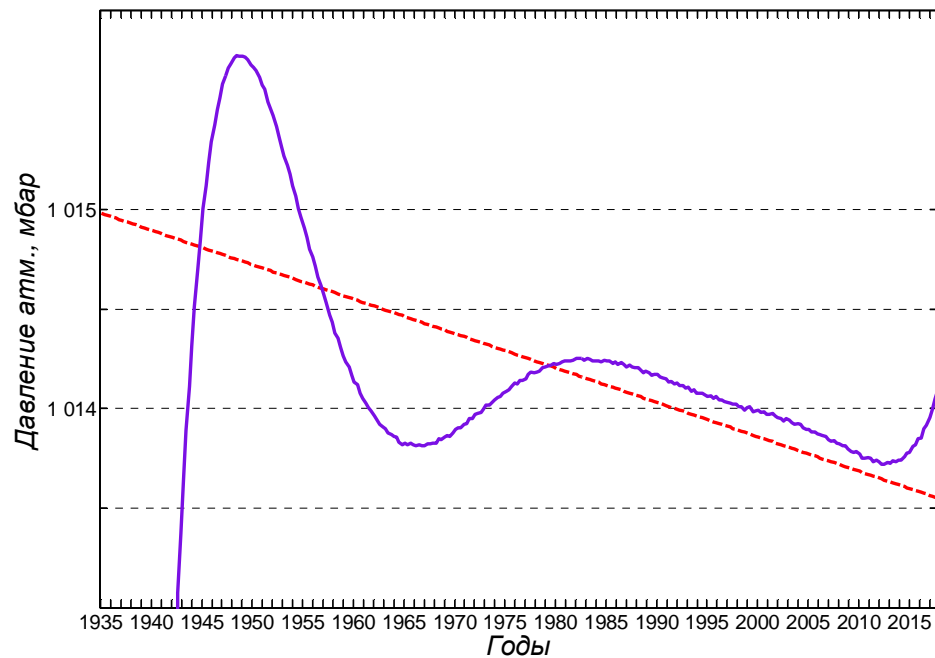
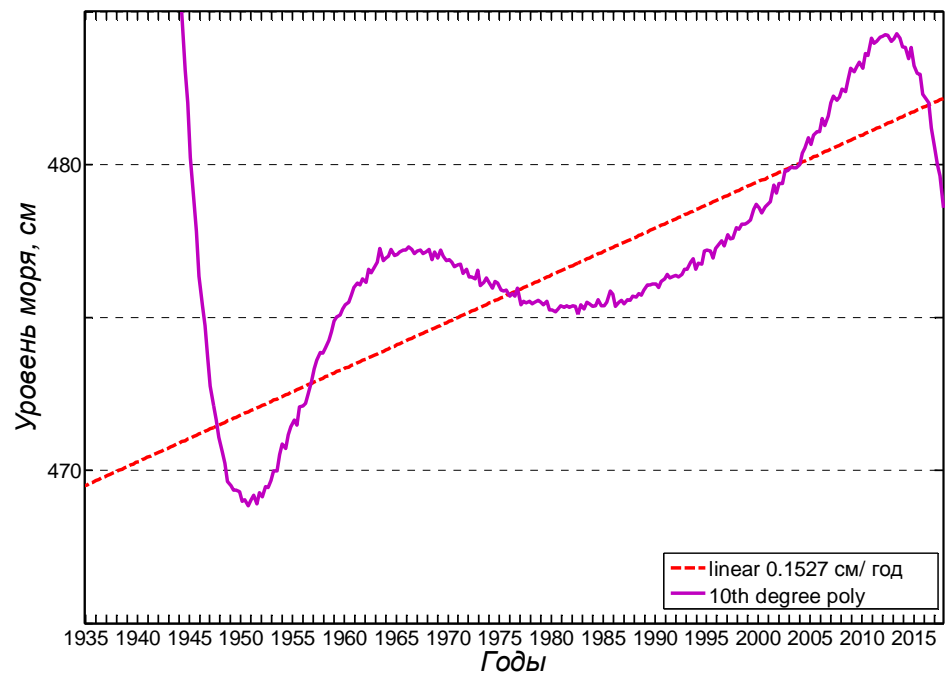
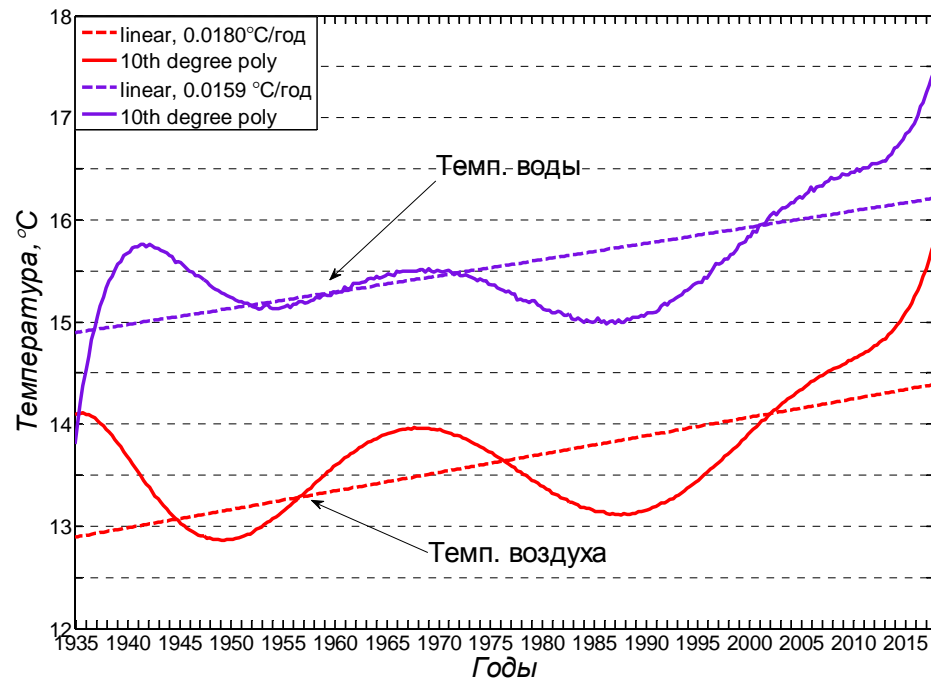
**Долговременные вариации
гидрометеорологических параметров.**



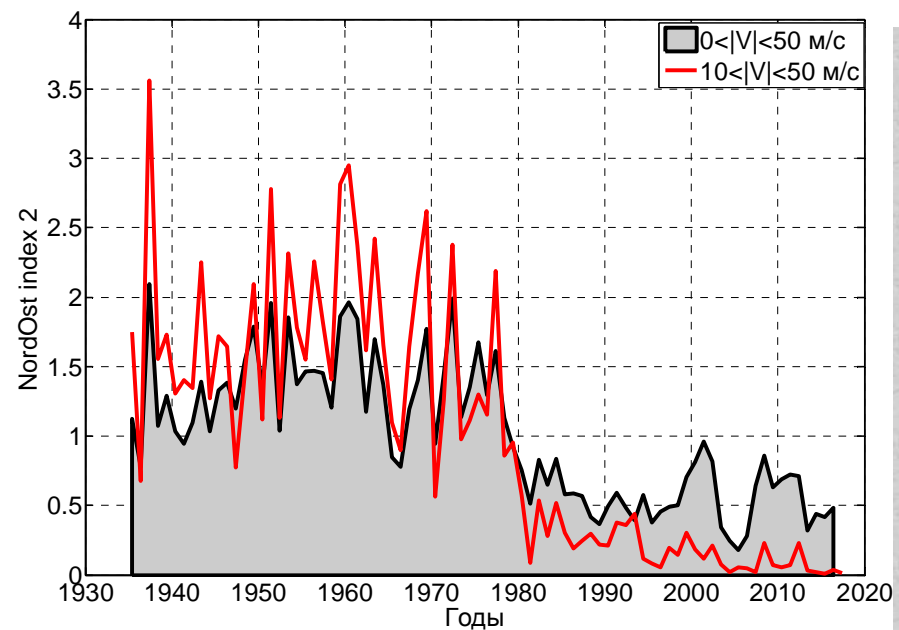
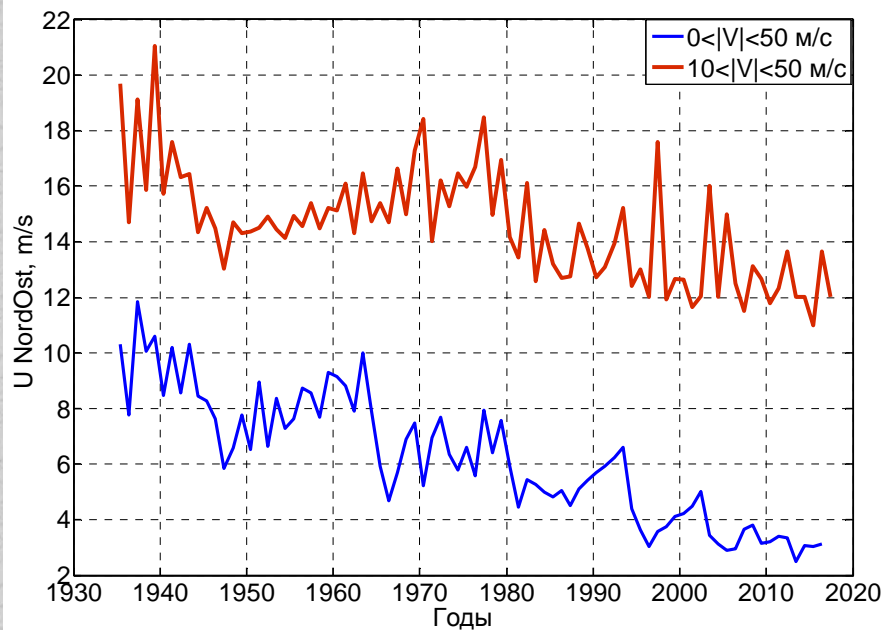
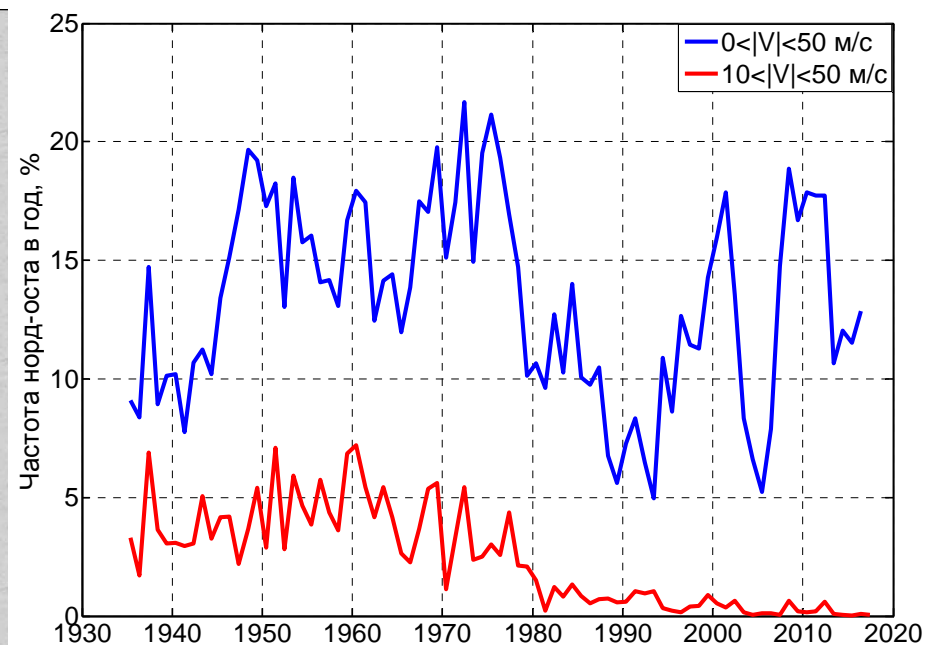
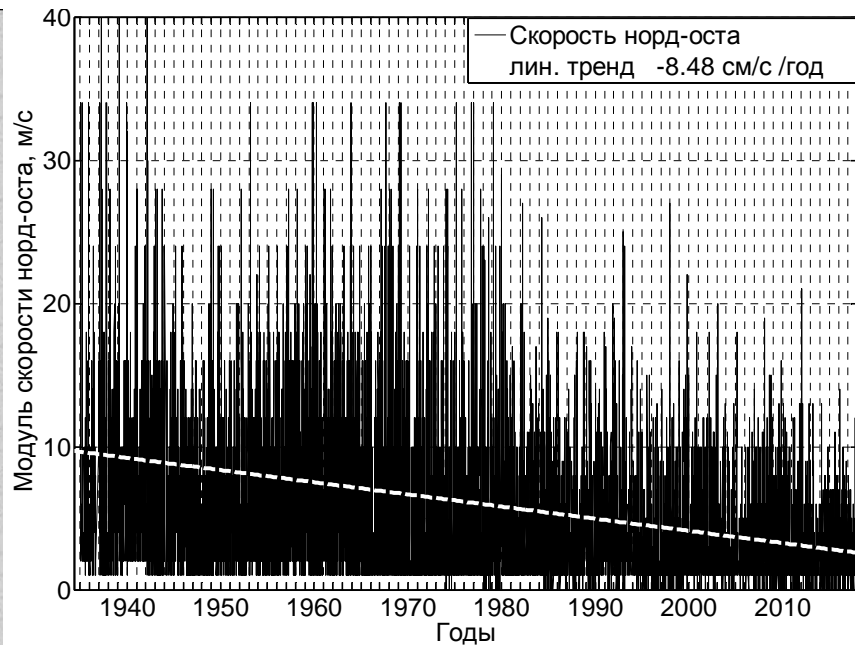
Долговременные вариации параметров на метео-станции Геленджика в период 1980-2009 гг. А- температуры воды на поверхности моря и приземного воздуха; Б- уровень моря; В- атмосферное давление; Г-осадки. Тонкие сплошные линии - сглаженные значения, фильтр $\frac{1}{2}$ года; сплошные линии – фильтр 1 год,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



Долговременные вариации уровня моря по измерениям на метеостанции Геленджика в период 19 апреля 1944 - 30 сентября 2015 гг. Точки- измерения с дискретностью 6 час. Тонкие сплошные линии - сглаженные суточные значения, сплошная фиолетовая линия – фильтр с окном 1 год, пунктирные линии – красная - линейный тренд (1.552 см/10 лет) и чёрная - аппроксимация полиномом 10 степени



Долговременные вариации температур воды на поверхности моря и воздуха, уровня моря и приземного давления на метеостанции Геленджика в период 1935-2017 гг.;



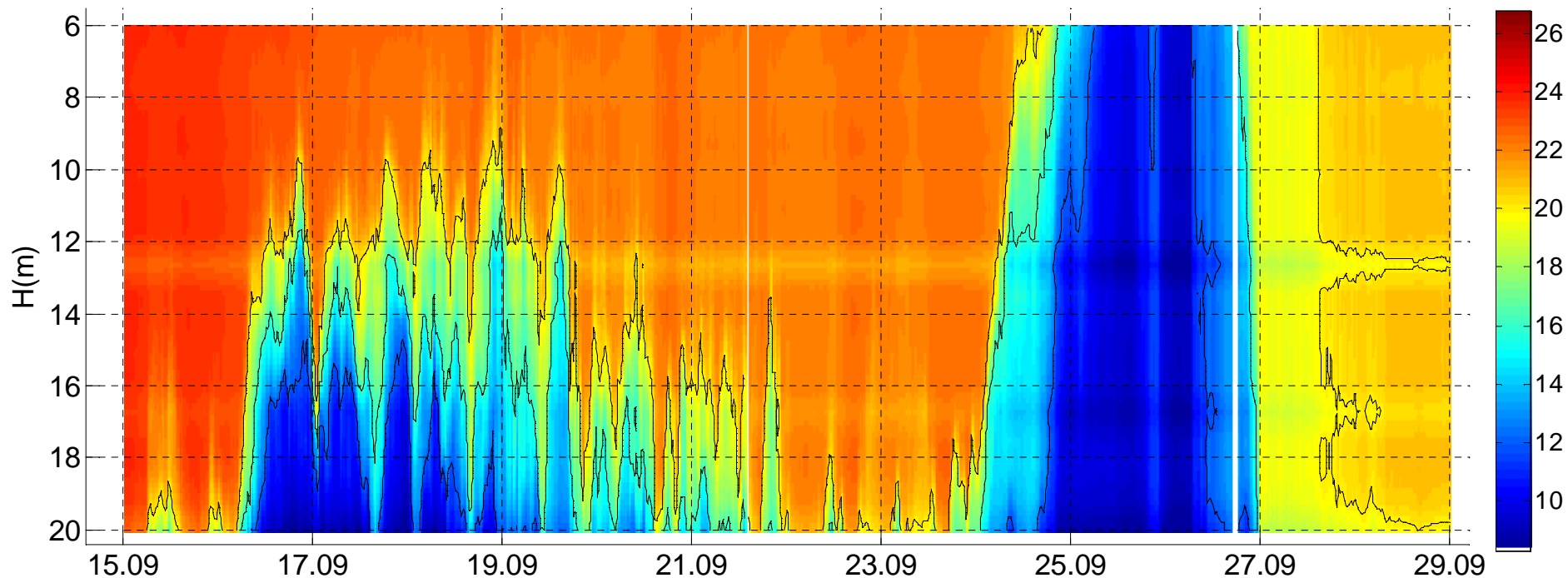
Ветер «Норд-ост». Выборка модуля скорости ветра, повторяемость, средняя скорость и нормированные индексы повторяемости "норд-оста", 1935-2017 гг.

Апвеллинги

**Наблюдения температурных событий (понижение температуры) в сент. 2013 г.
(«неполных апвеллингов и полного апвеллинга»).**

ADCP RDI и термокоса на станции на траверзе Голубой бухты в ~ 1 км от берега, глубина H=22 м ;

15.09.2013 00:06 - 28.09.2013 23:58

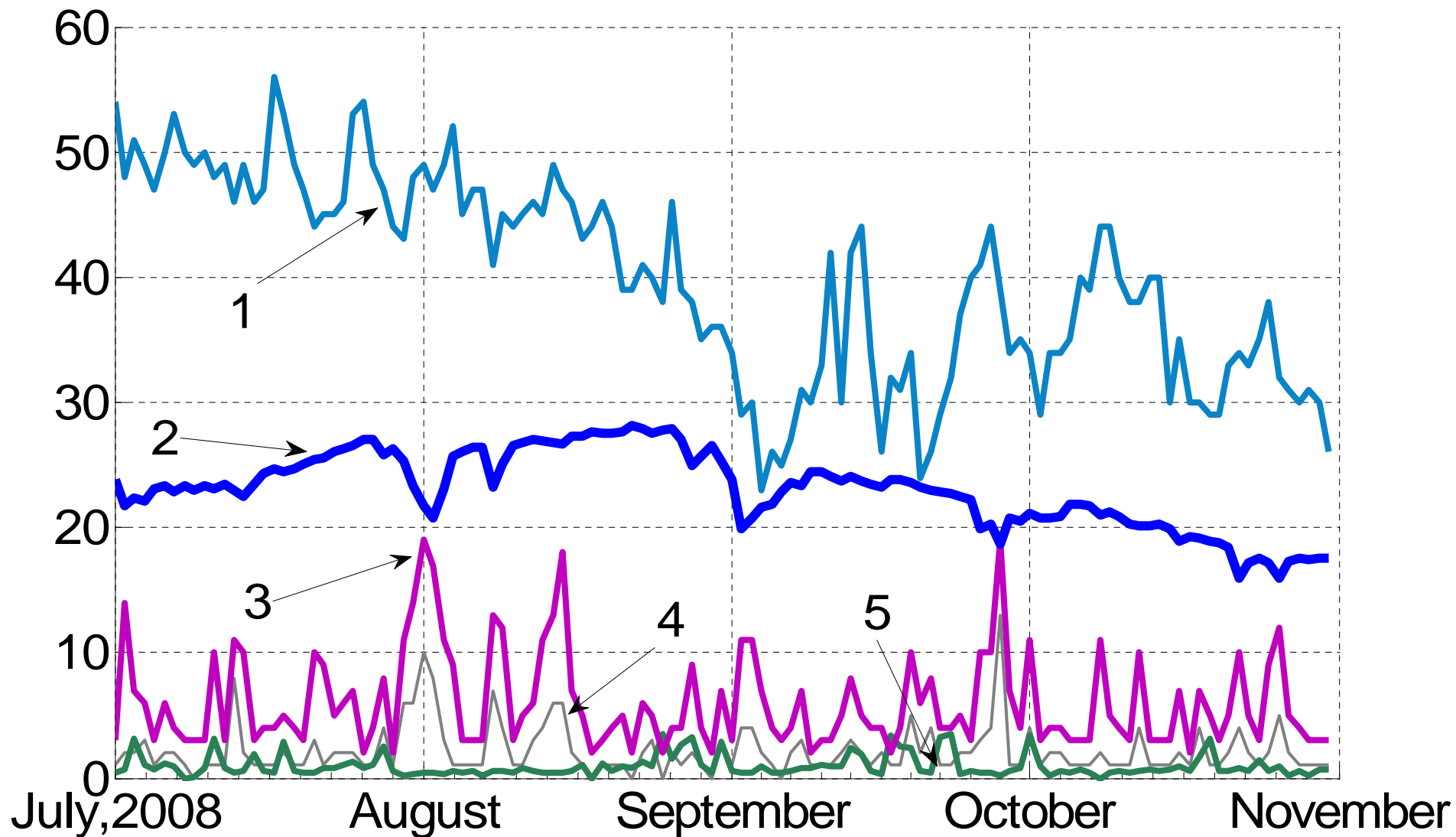


Изотермы по измерениям на донной станции RDI WH 600 кГц .

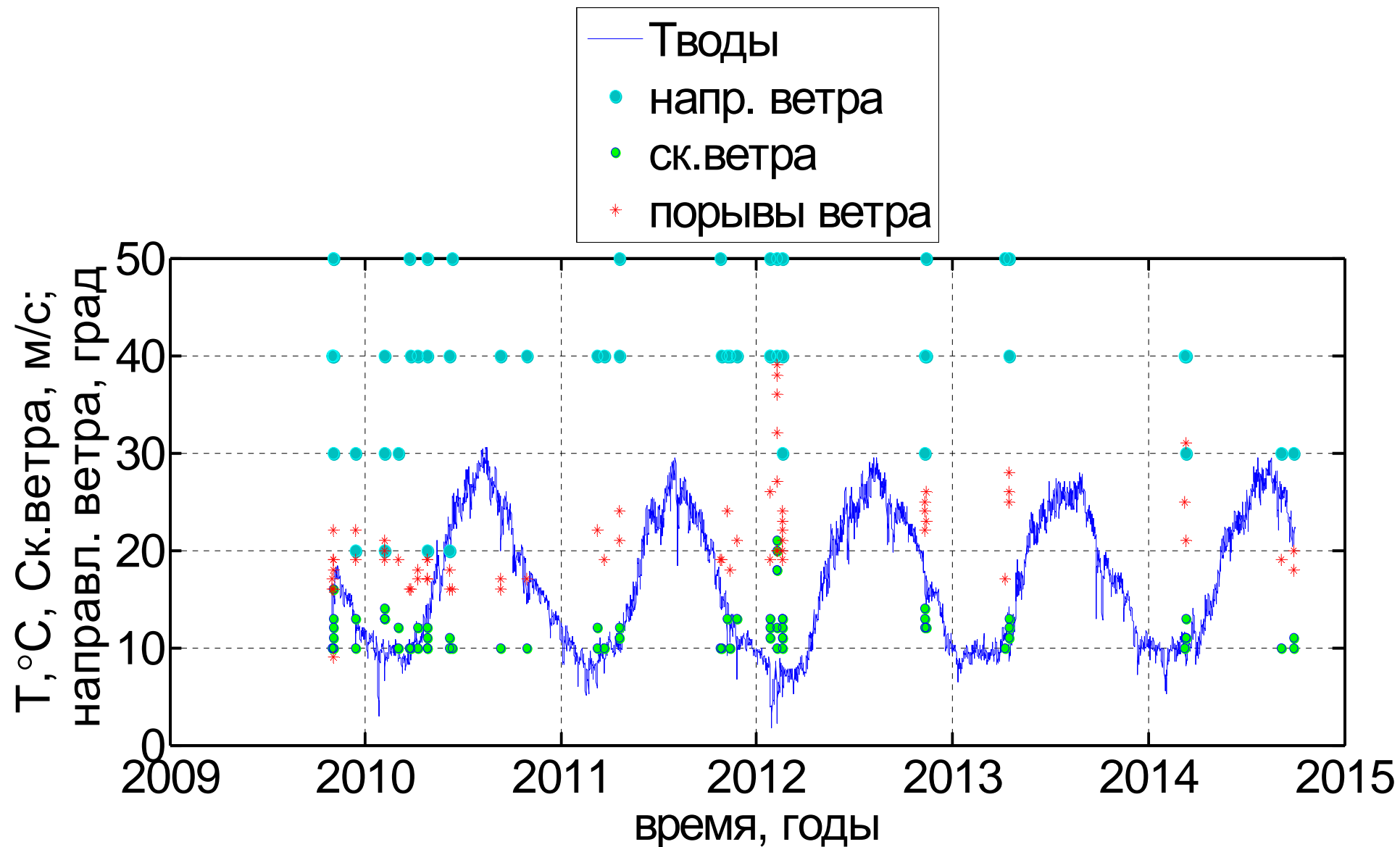
Неполные апвеллинги, имеющие вид пакета с инерционной частотой предшествуют полному апвеллингу. Время измерений- 15.09-29.09 2013 г.



Среднесуточная температура воды на поверхности моря на метеостанции Геленджика в период 2007-2010гг.

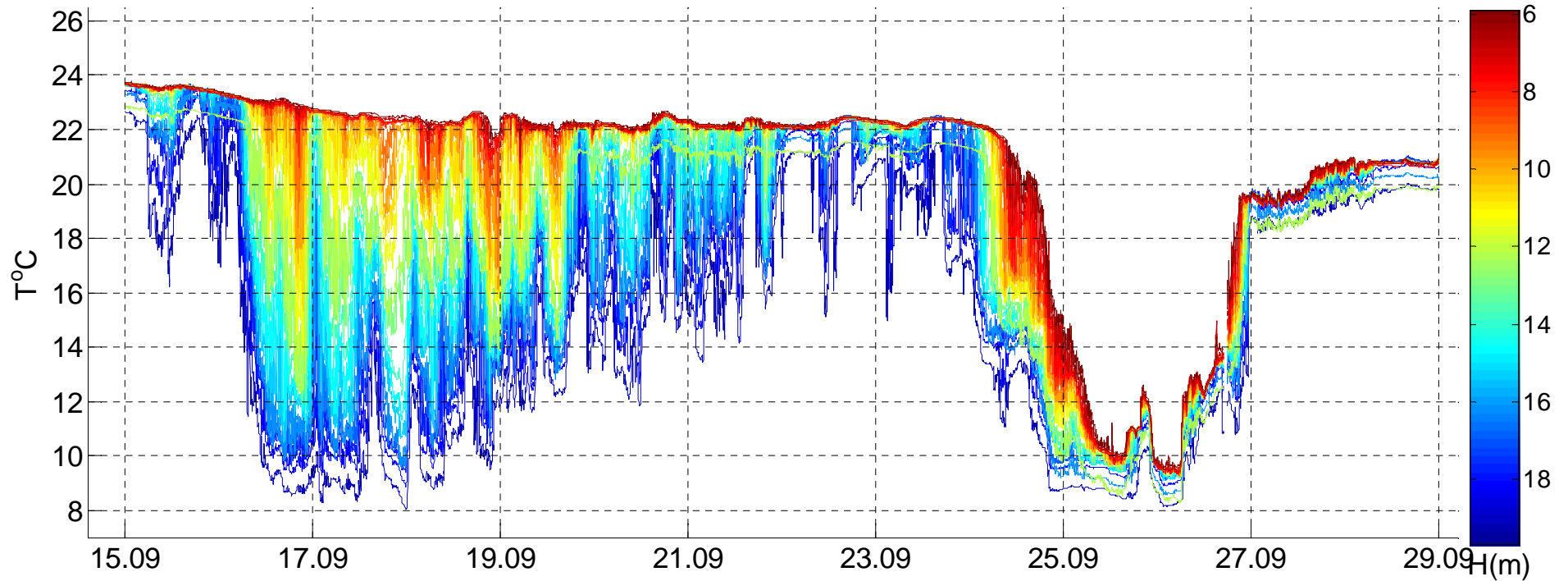


Временной ход уровня моря(Н-430, см) – 1; ТПМ(°С) – 2; скорости порывов ветра(м/с) – 3; скорости ветра(м/с) – 4; направления ветра по азимуту(град./100) – 5; во время развития сильных апвеллингов 1 августа, 1 сентября и 28 сентября 2008г.

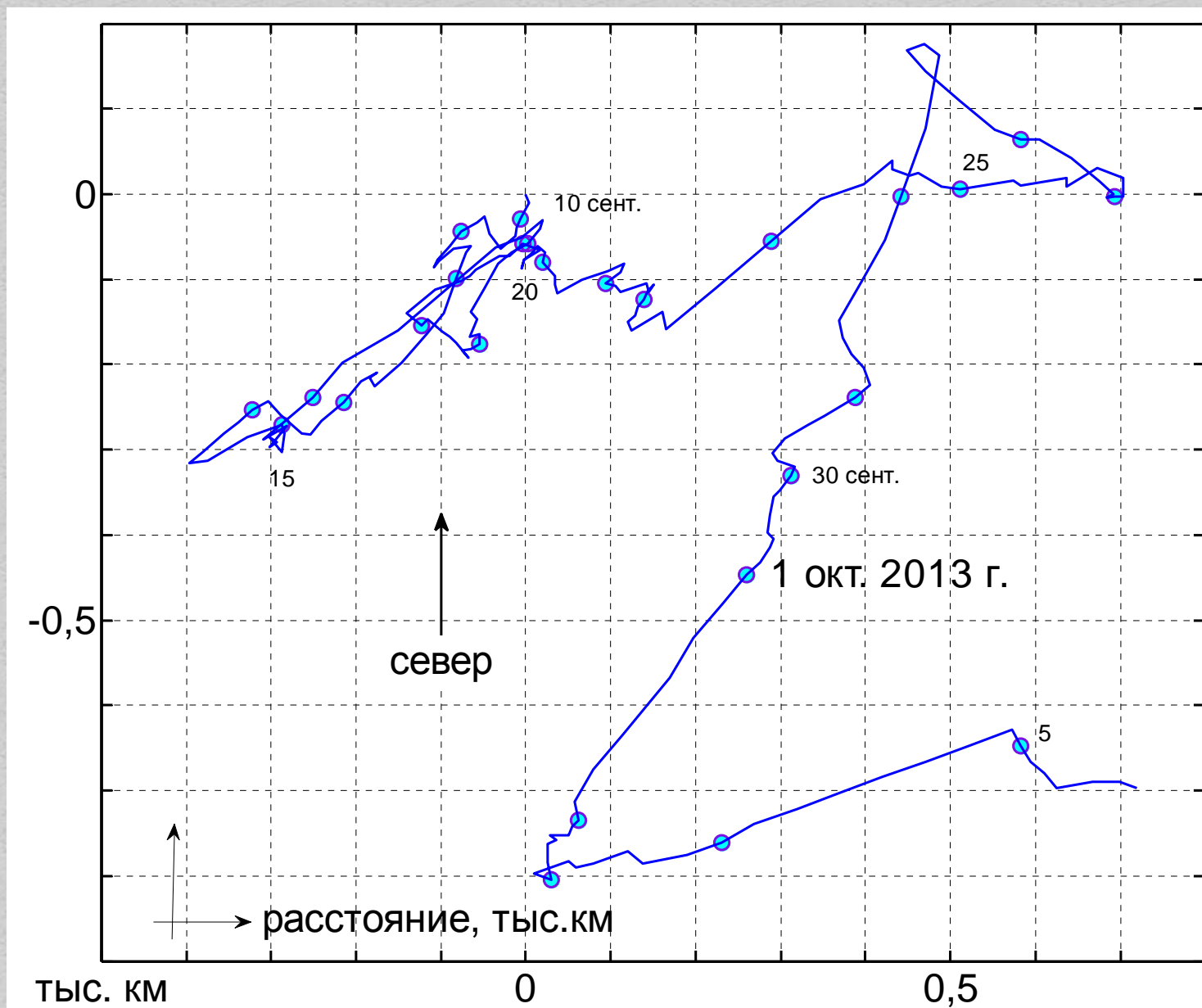


Квази-циклические понижения температуры на поверхности моря и выборка норд-остов. Среднесуточная температура воды на поверхности моря, скорости и порывы ветра, и направление норд –остов в секторе 10-50 град по азимуту. (метеостанция Геленджика в период 2009-2014 гг.) .

15.09.2013 00:06 - 28.09.2013 23:58

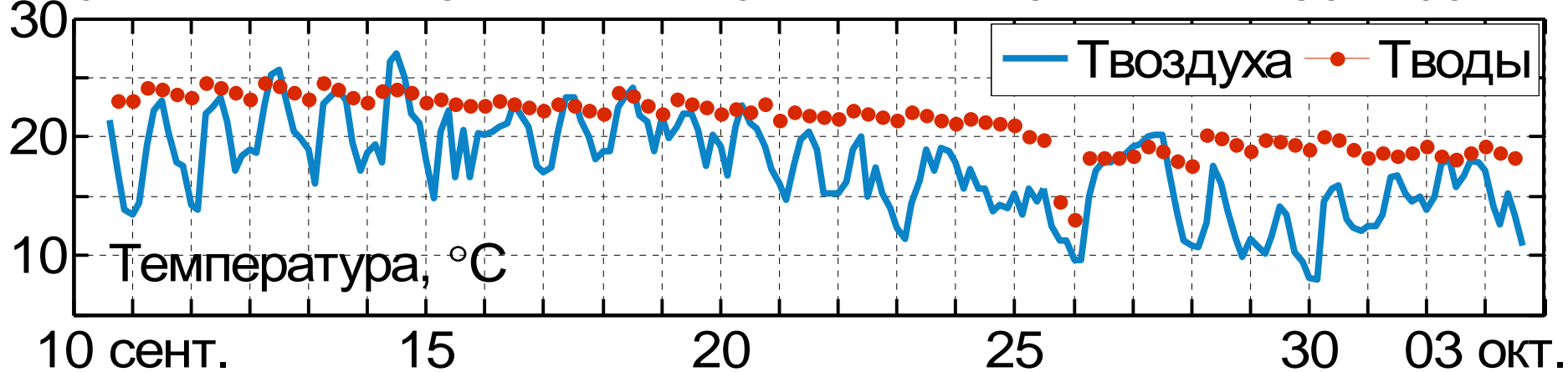
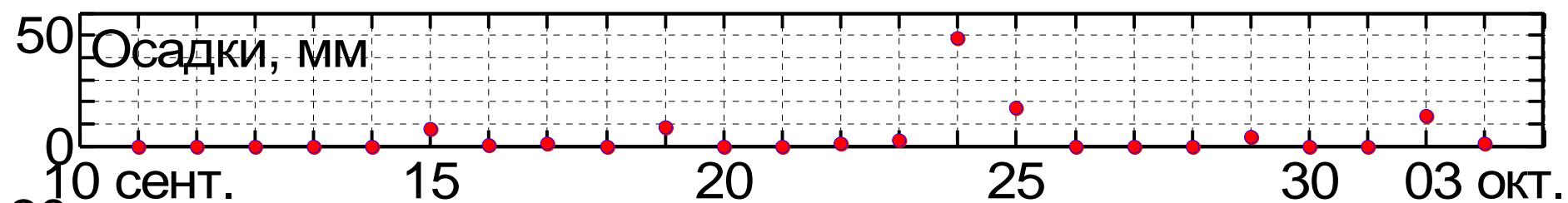
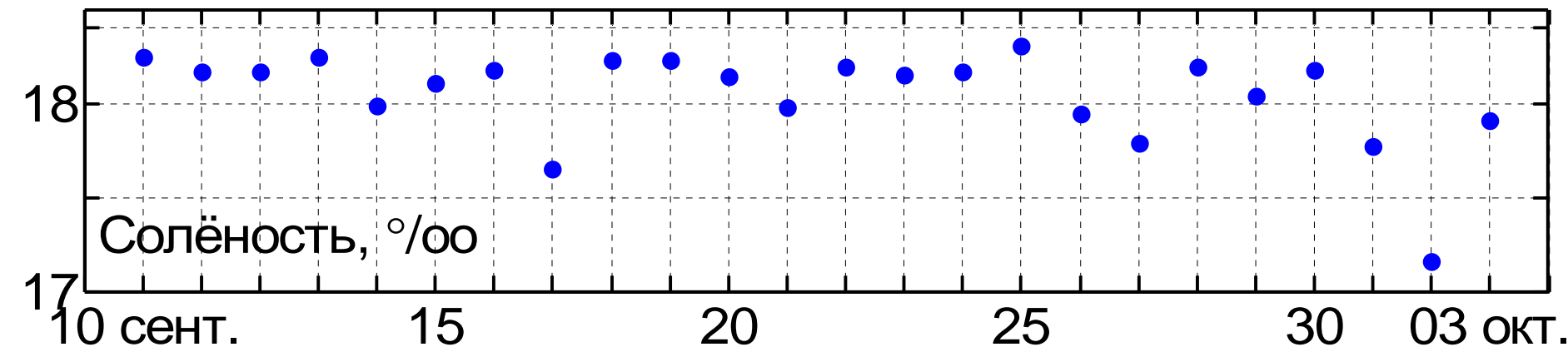


Изменения температуры воды по измерениям термокосы на донной станции.
Время измерений-15.09-29.09 2013 г.

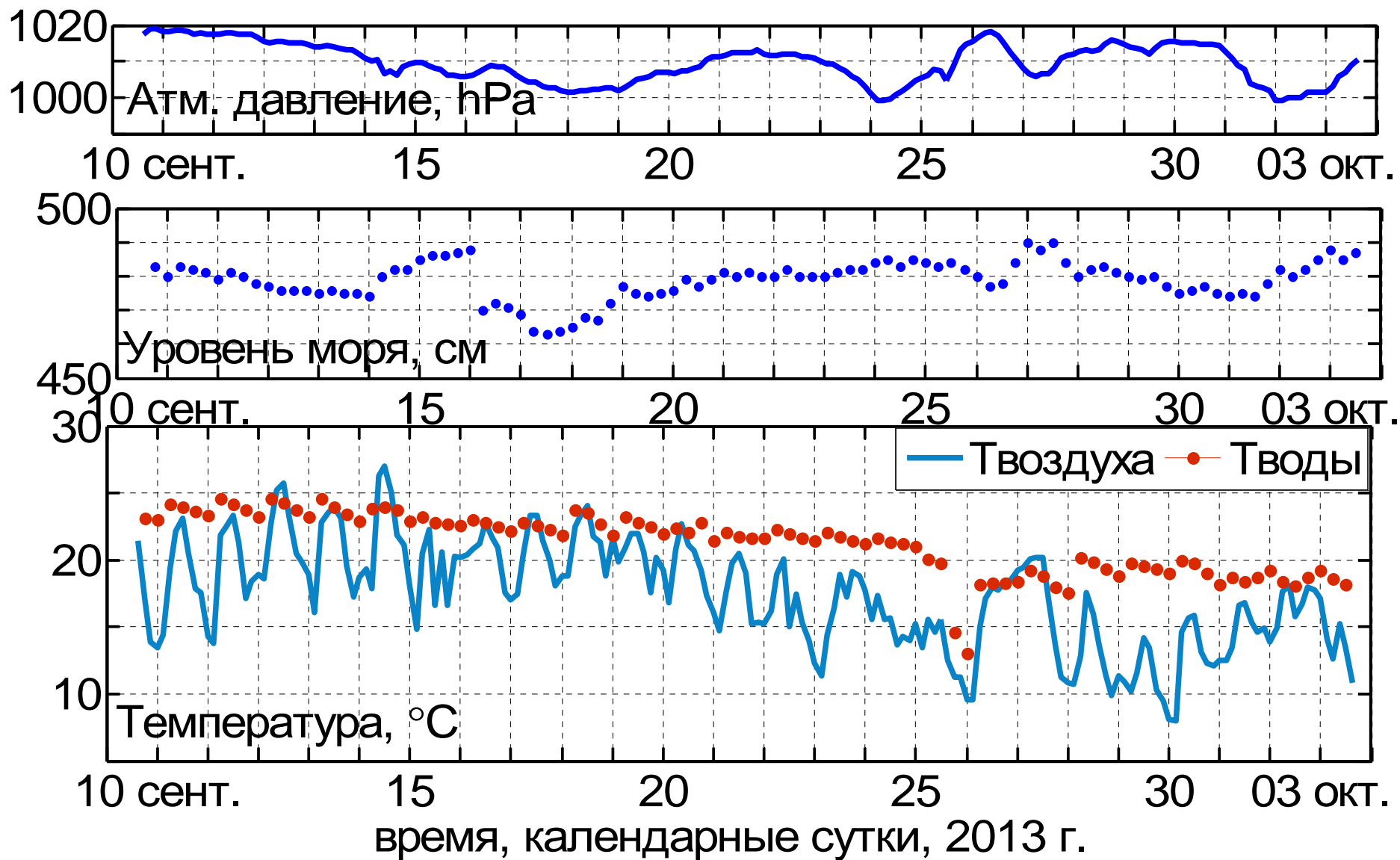


Прогрессивно-векторная диаграмма ветра (метеостанция г. Геленджика) в период работы акустического профилографа течений RDI WH 600 кГц, 10 сент.-03 окт. 2013г.

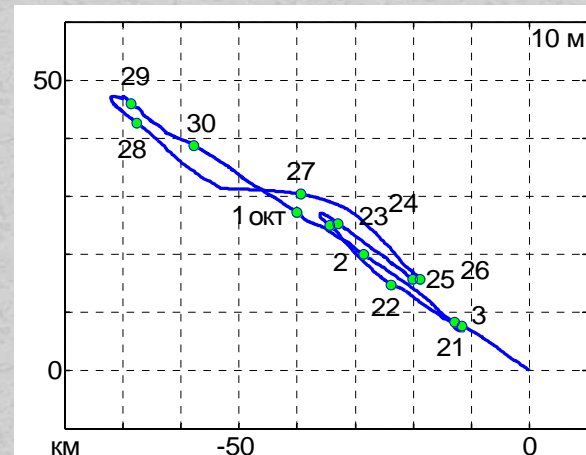
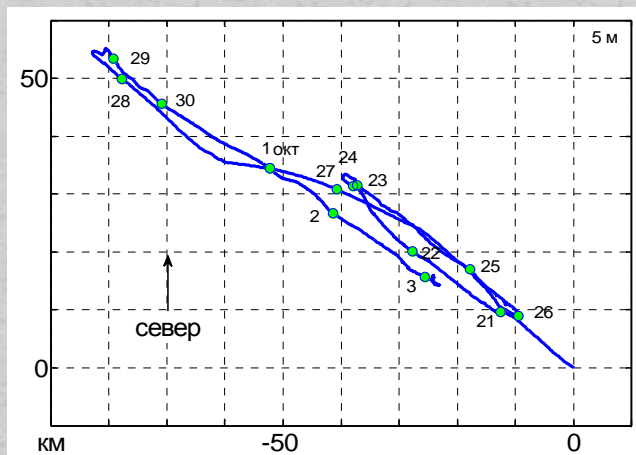
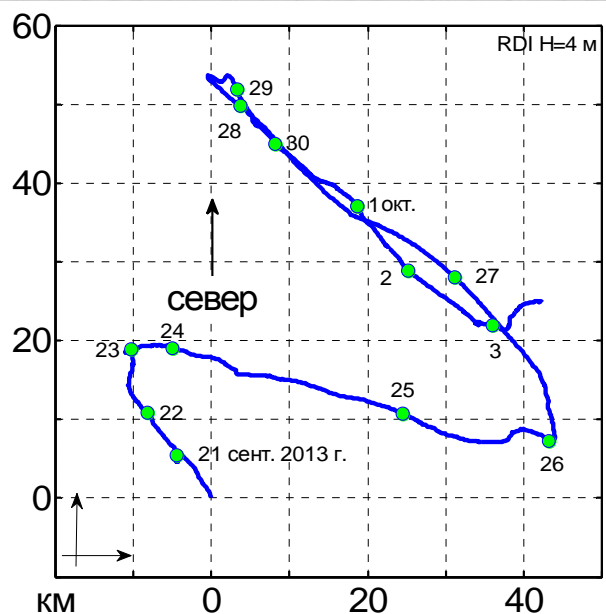
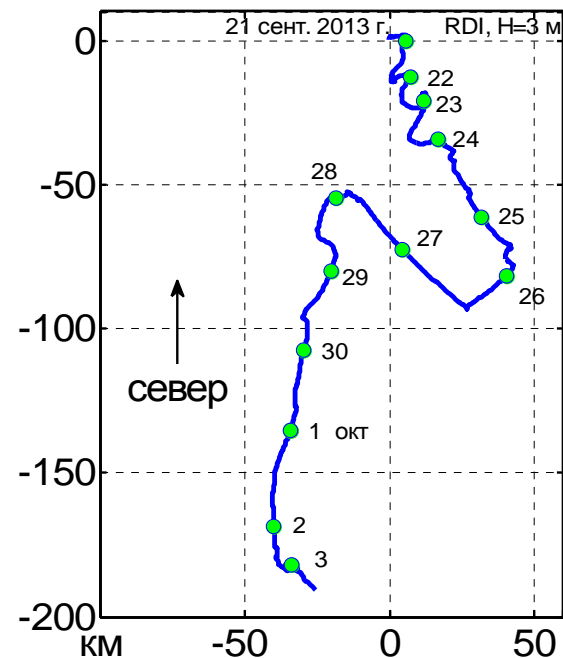
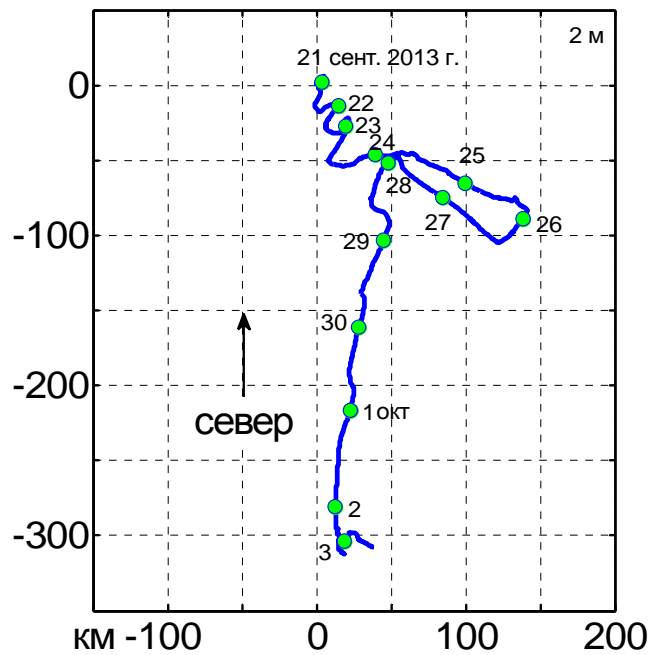
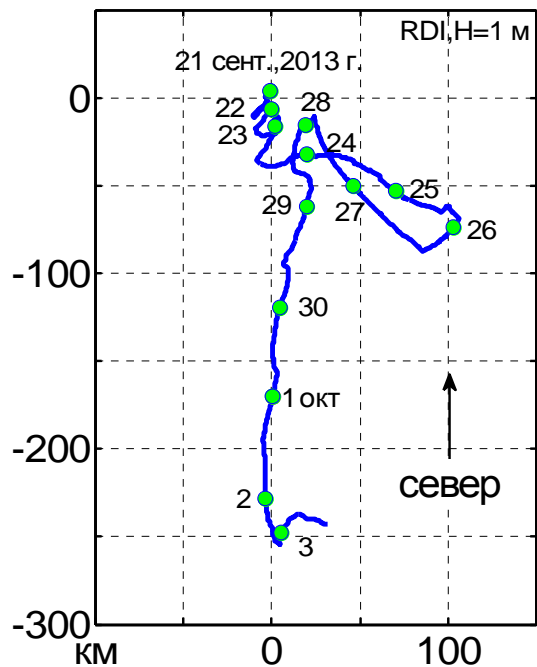




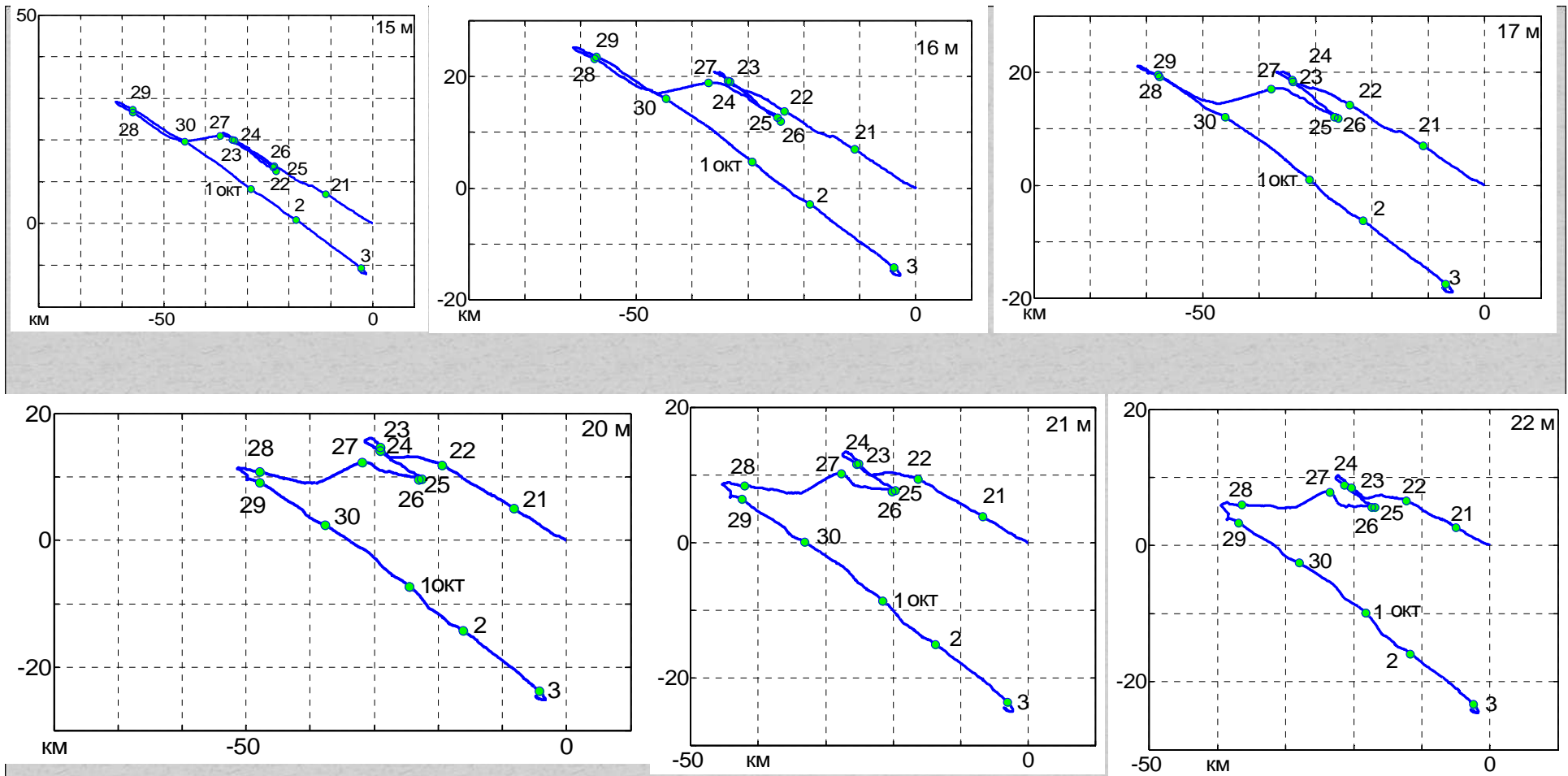
время, календарные сутки, 2013 г.



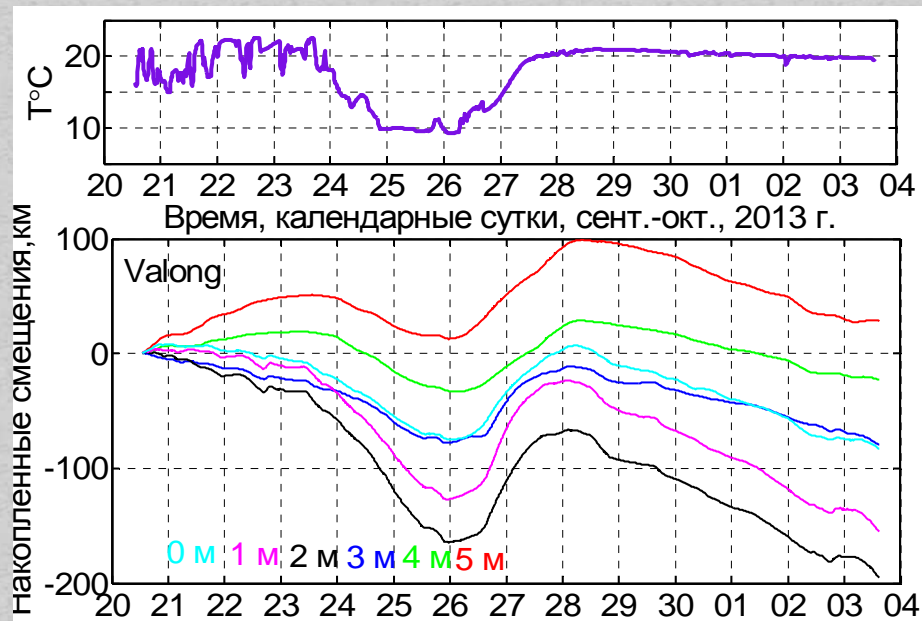
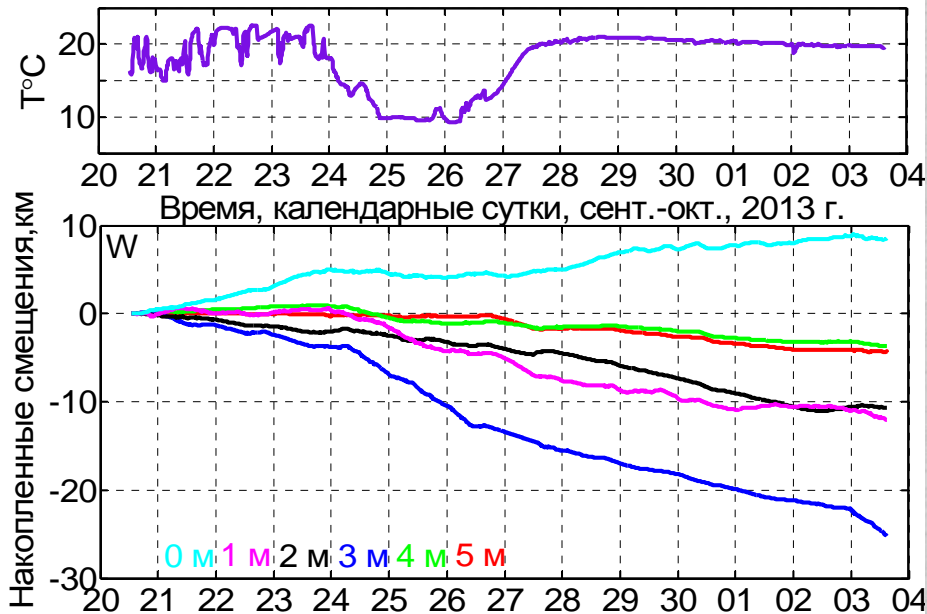
Ход метеопараметров (метеостанция г. Геленджик) перед, во время и после выраженного понижения темп. воды 25-27 сент. 2013 г.



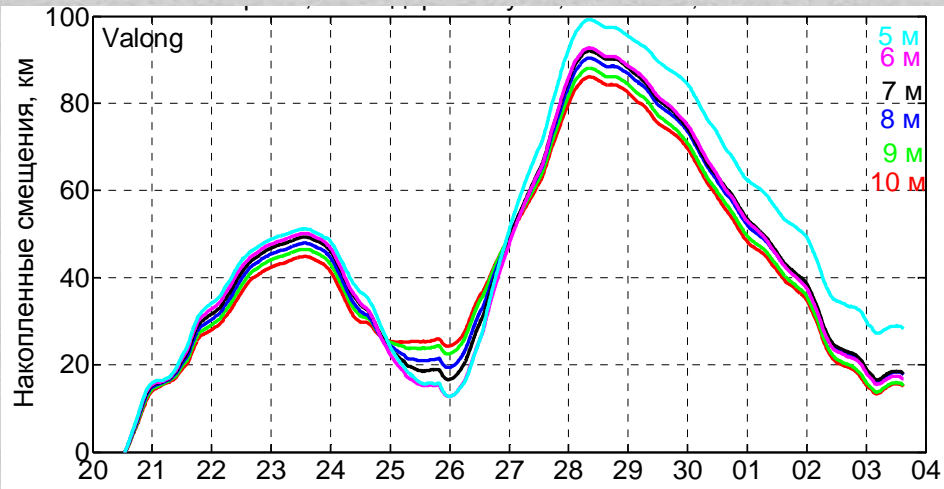
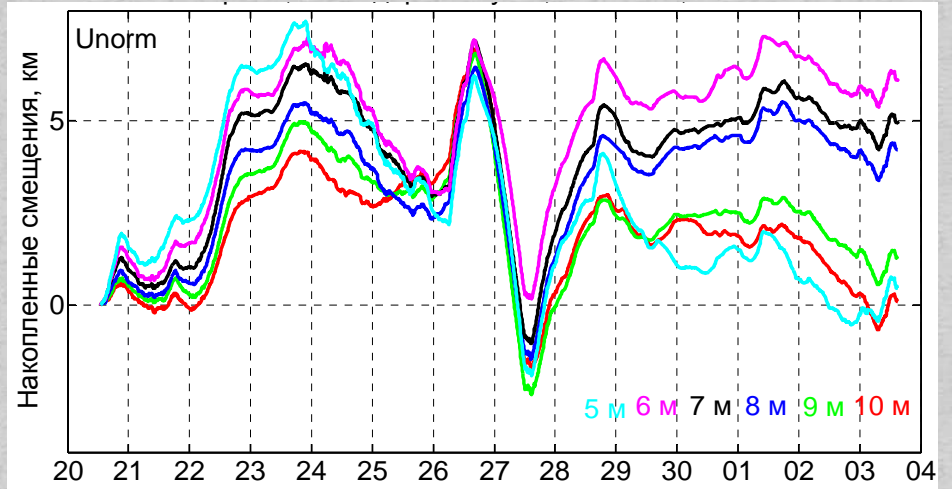
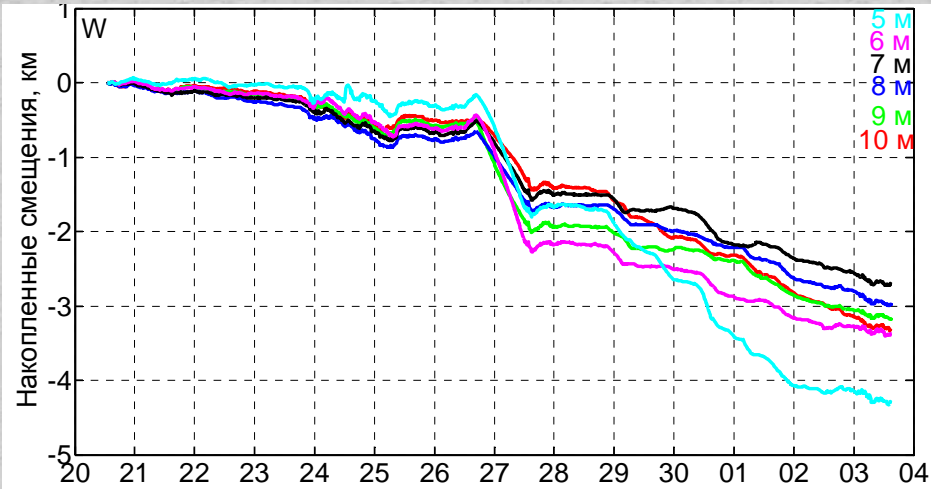
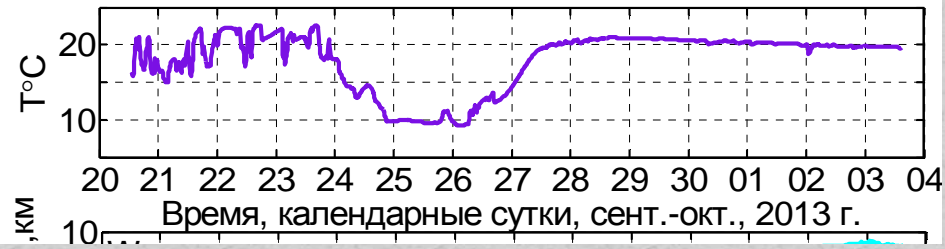
Прогрессивно-векторная диаграмма течений в верхнем слое моря (H=1,2,3,4,5,10 м) по измерениям RDI WH 600 кГц. 21-24 сент., в слое 0-3 м развиваются инерционные волны.



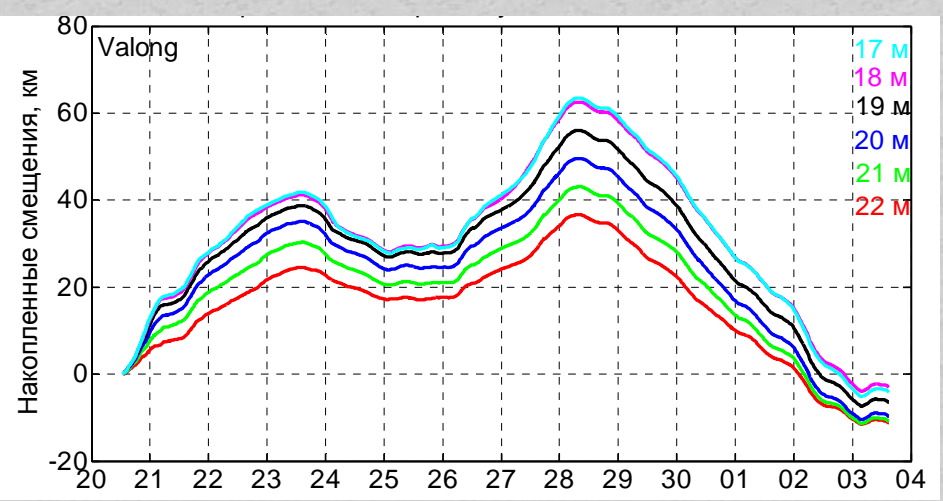
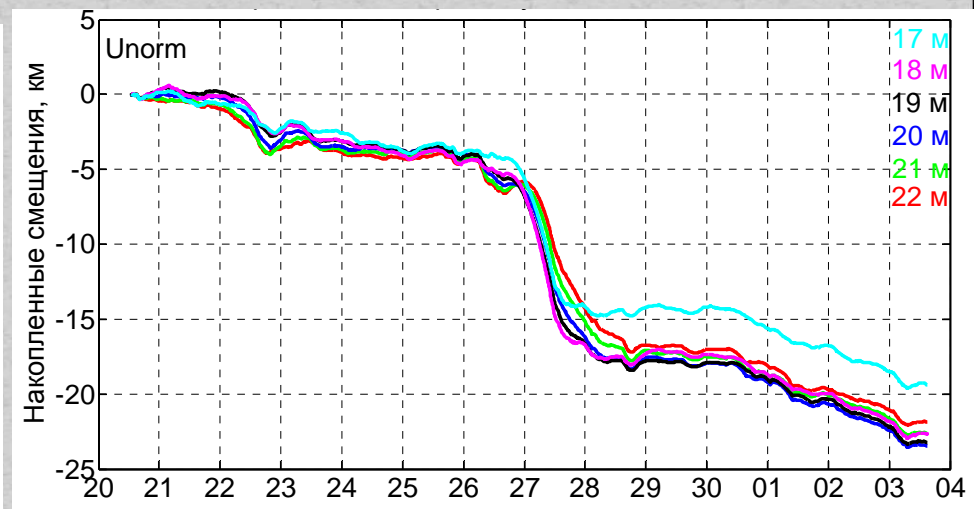
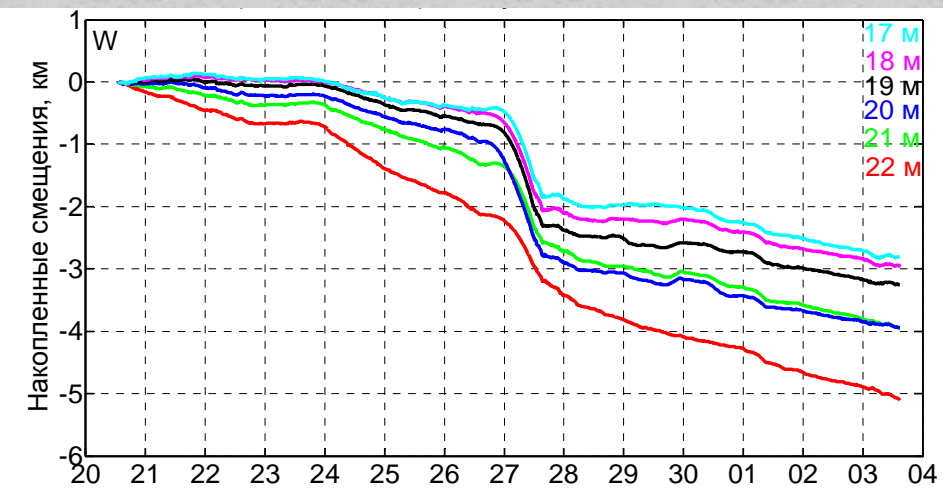
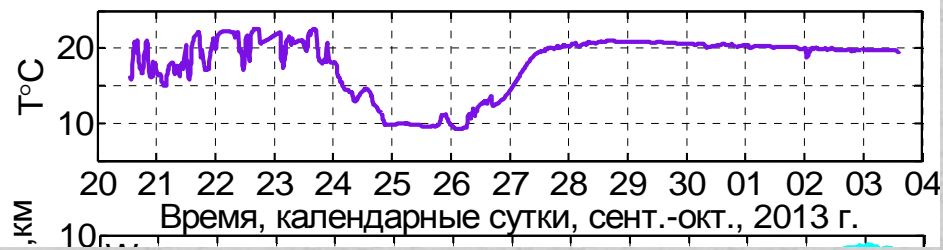
Прогрессивно-векторная диаграмма течений в нижнем слое моря (H=15,16,17,20,21,22 м) по измерениям RDI WH 600 кГц. 21-24 сентября.



Температура воды на глубине 22 м (фиолетовая кривая) и накопленные смещения за счёт вертикальной, вдольбереговой и нормальной к берегу компонент скорости течений на горизонтах 0,1,2,3,4,5 м по измерениям RDI .

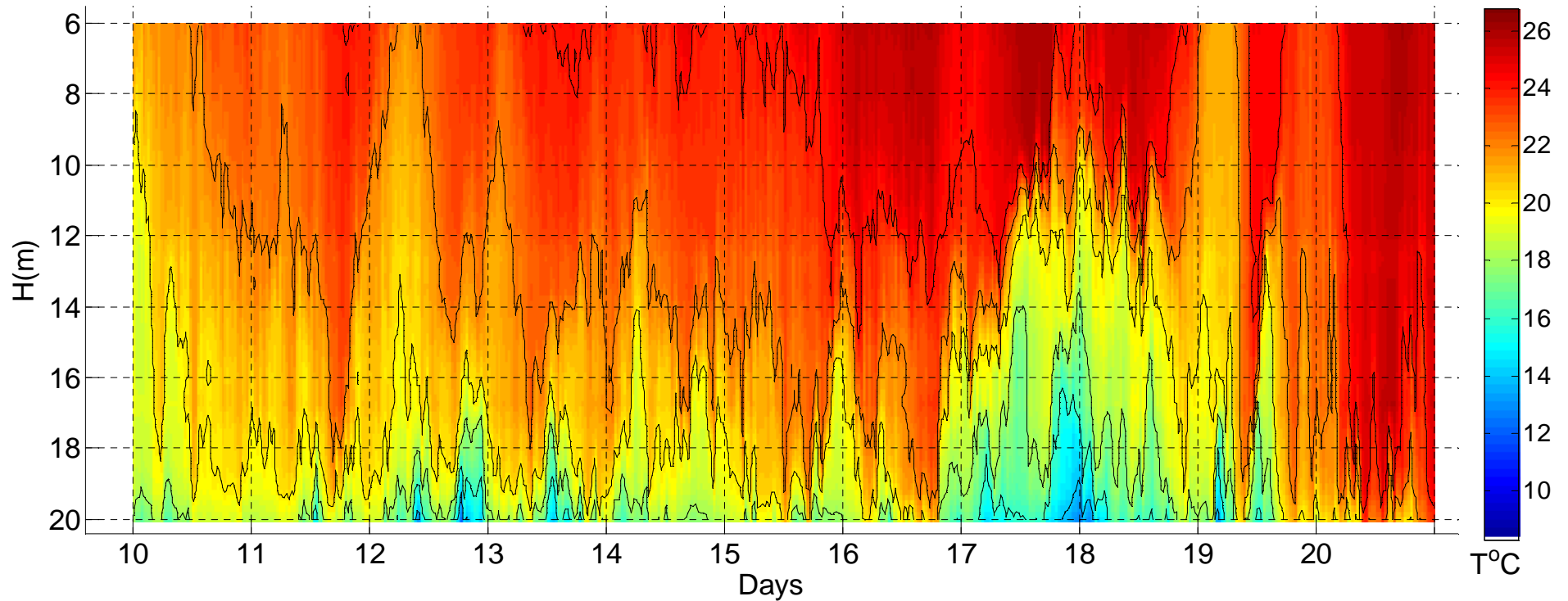


То же, для горизонтов 5,6,7,8,9,10 м.

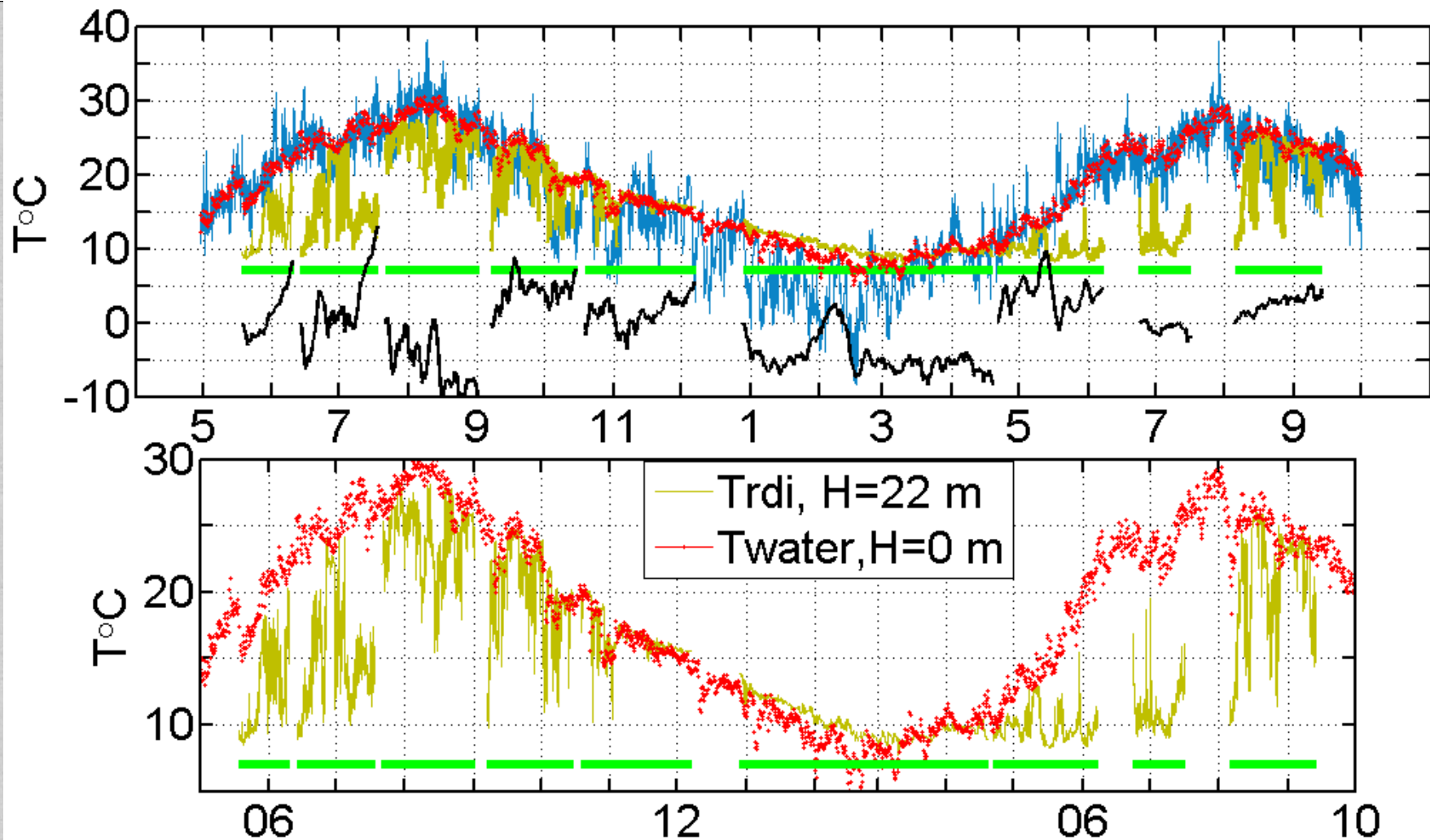


То же, для горизонтов
17,18,19,20,21,22 м.

10.07.2013 00:02 - 20.07.2013 23:59



Изотермы по данным термокосы №1, на траверзе Голубой бухты, 10.07-20.07 2013 г.



Временной ход метеорологических и гидрофизических параметров в период измерений при помощи акустического профилографа течений RDI WH 600 кГц:

Временной ход метеорологических (метеостанция г. Тельдиджа) и гидрофизических параметров в период измерений при помощи акустического профилографа течений RDI WH 600 кГц:

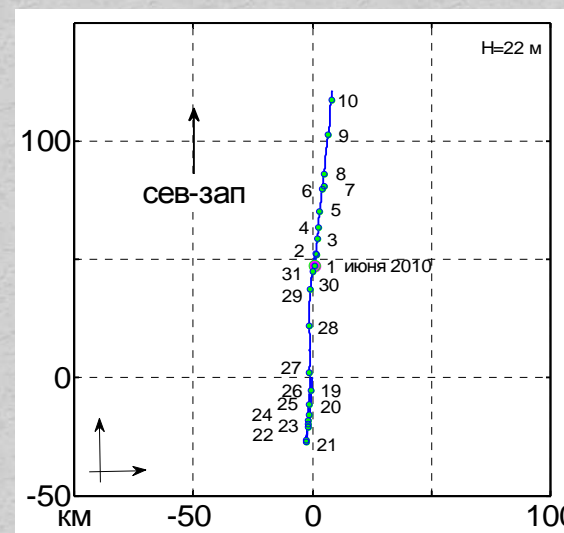
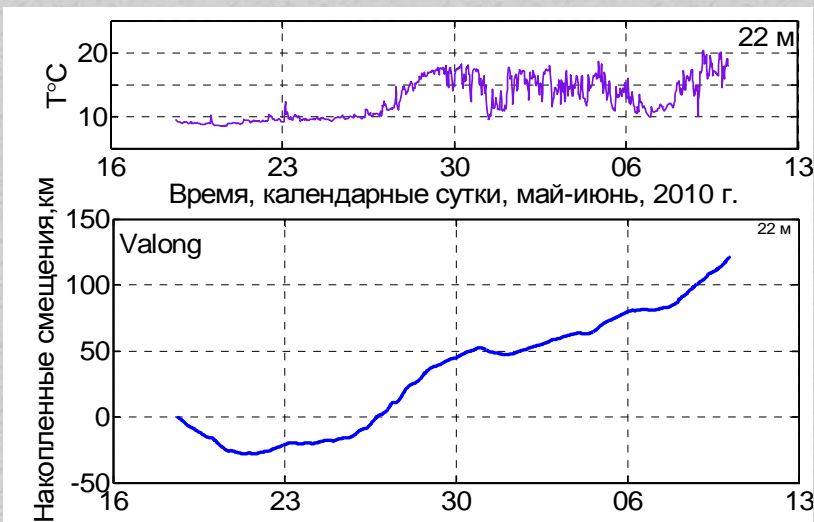
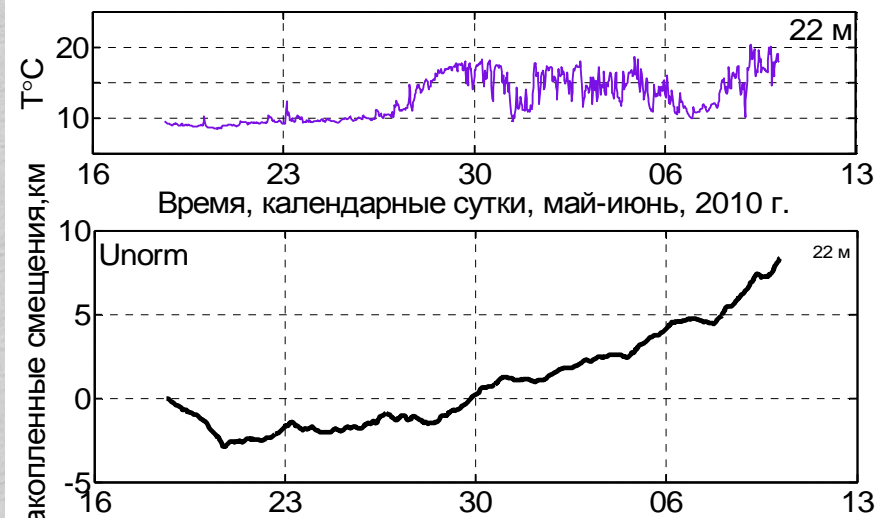
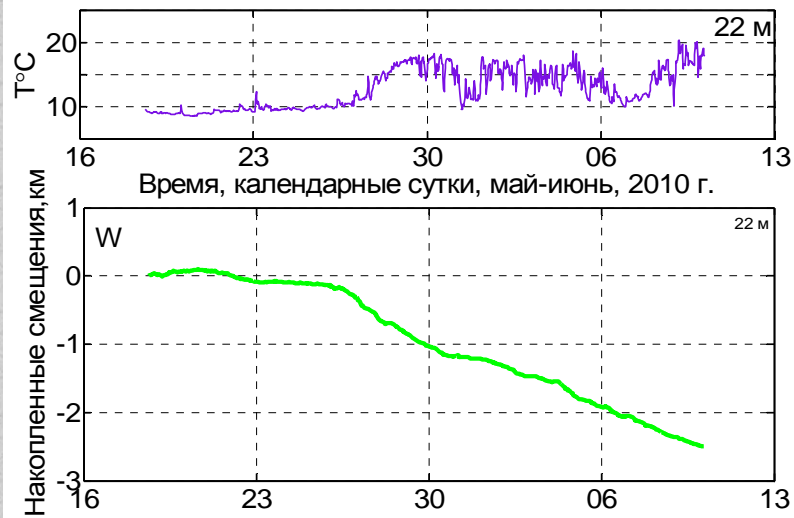
Верхняя панель: – температура воздуха, °C (на высоте 10 м от поверхности моря) – синий цвет кривой;

- температура воды на поверхности моря, °C- красные точки;

-температура воды около дна, на глубине 22 м- желто-зелёная кривая;

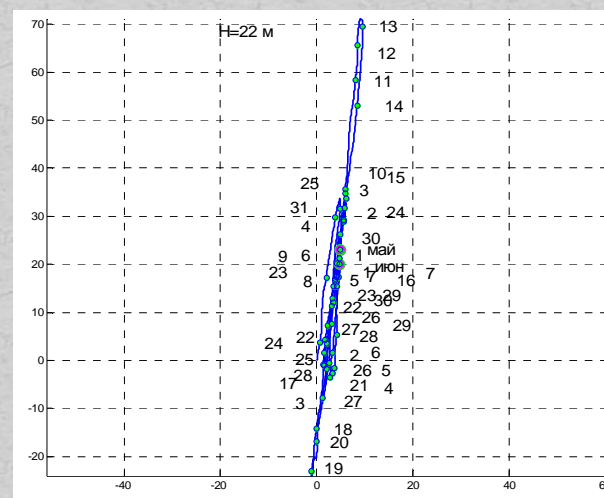
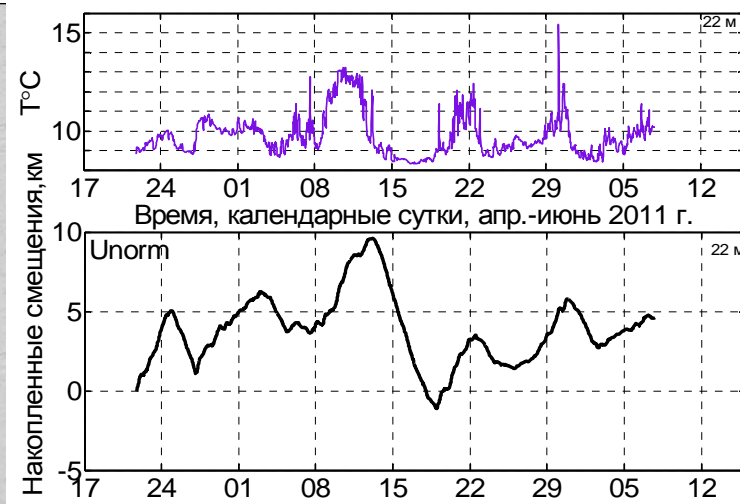
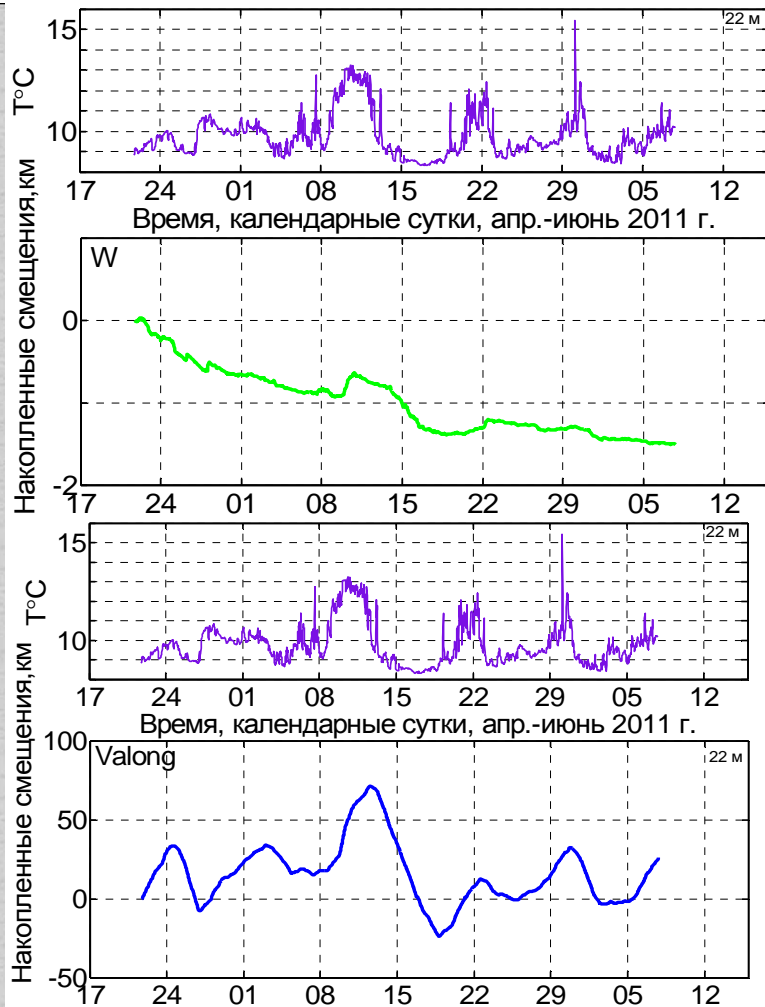
-накопленные смещения за счёт нормальной к берегу скорости, H=22 м- черная кривая;

Нижняя панель – Сравнение температур воды на поверхности моря и на глубине 22 м



Температура воды на глубине 22 м (фиолетовая кривая) и накопленные смещения за счёт вертикальной, вдольбереговой и нормальной к берегу компонент скорости течений на горизонт 22 м по измерениям RDI (18 мая-10 июня 2010 г.)

Прогрессивно-векторная диаграмма течений в период первого интервала работы RDI WH 600 кГц.



Температура воды на глубине 22 м (фиолетовая кривая) и накопленные смещения за счёт вертикальной, вдольбереговой и нормальной к берегу компонент скорости течений на горизонт 22 м по измерениям RDI (22 апр. - 07 июня 2011 г. – 7 интервал);

Прогрессивно-векторная диаграмма течений в период 7 интервала работы RDI WH 600 кГц.

Выводы

1. Гидрофизический Полигон создаёт уникальные возможности для оценки разномасштабных гидрофизических процессов в северо-восточной части Чёрного моря, и уровня моря как индикатора этих процессов.
2. Спутниковые данные уровня моря имеют бимодальную структуру гистограмм, что, по-видимому, связано со стерическим сезонным ходом уровня.
3. По спектрам выделяются три группы временных масштабов: -долговременные, многолетние, с периодами более трёх лет; -годовые (сезонные), а также первый и второй обертоны годовых -полугодовые и третьегодовые; - мезомасштабные (от нескольких часов до нескольких суток), с максимумами на суточном периоде и первом, втором, третьем обертонах.
4. Имеется пример, по измерениям вблизи берега, где помимо суточных и полусуточных пиков прослеживается чётко выраженный максимум инерционных колебаний.
5. В силу существенной перемежаемости наблюдаемых на Полигоне процессов, необходимо применять вэйвлет-анализ.
6. Продолжительность циклов низкочастотных колебаний уровня моря в период с 1995 г. по 2010 г. возросла до ~7 лет по сравнению с 3 годами в течение 1980-1995 гг., а амплитуда увеличилась с 5 до 10 см. Причины смены этих колебательных режимов и их связи с индексами атмосферной циркуляции, пока не выяснены.
7. Сезонные доминирующие ветры вызывают существенные вариации (~5 см) уровня моря и других гидрометеорологических индикаторов системы атмосфера-море.
8. В общем случае, воздействие разномасштабных региональных ветров на уровень моря в Черном море представляется очень сложным. Апвеллинги в уровне моря не всегда видны.
9. По данным динамической топографии прослеживаются некоторые крупномасштабные структуры, такие как: Основное черноморское течение; циклонические меандры; прибрежные антициклонические вихри; циклонические вихри; Батумский антициклонический вихрь.
10. Отмечается отсутствие связи между спутниковыми измерениями и контактными измерениями. Высокие когерентности между измерениями по сетке спутниковых измерений показывают масштаб сглаживания спутниковых данных более ~ 60 миль, что препятствует возможности применения спутниковых данных для исследования мезомасштабных процессов.



Спасибо за внимание

*Мельников Василий Андреевич,
Институт океанологии
им. П.П.Ширшова РАН,
Тел. 916 241 87 16
vmelnikov@ocean.ru*

Аннотация

Цель исследования

На основе измерительной информации "Черноморского гидрофизического полигона Института океанологии РАН" (Зацепин и др., 2014), полученной в 2008-20016 гг., с использованием данных спутниковых дистанционных зондирований и различных реанализов, рассматриваются гидрометеорологические условия в шельфовой зоне северо-восточной части Черного моря. Целью измерений на Полигоне является исследование механизмов развития сложных разномасштабных гидродинамических процессов во взаимодействии с атмосферой.

Одним из индикаторов региональной системы атмосфера-море является уровень моря. Представляет интерес изучение изменений уровня моря, связанных с рядом регулярно наблюдающихся вдоль побережий в северо-восточной части Чёрного моря, явлений, таких как значительные и резкие похолодания морских прибрежных вод, сгоны и нагоны, апвеллинги и даунвеллинги, разномасштабные вихревые и волновые течения и их проявления на поверхности моря.

В общем случае временной ход уровня моря очень сложен, т.к. в колебания уровня моря вносятся вклады за счёт региональной гидродинамики (крупномасштабные течения, вихри, приливы и волны), воздействий атмосферы (атмосферное давление, ветровые и волновые сгоны/нагоны, солнечный прогрев, испарение и осадки), а также вклады за счёт речного стока и движений земной коры (IOC Manual ..., 2006). В связи с этим, для однозначной интерпретации событий в колебаниях уровня моря требуется тщательный анализ и других гидрометеорологических параметров.

Региональные исследования уровня моря важны для ряда прикладных задач, таких как, например, проект «Полигона калибровки высокоточного радиовысотомера» (Мельников, 2009), который входит в состав наземного специального комплекса космической геодезической системы.

Данные

В настоящее время на Полигоне установлены три долговременные измерительные станции (ADCP и термокоса на каждой), а также сканирующий зонд-профилограф «Аквалог». Анализ основан на данных измерений уровня моря при помощи опции измерений поверхностного волнения и придонных датчиков давления ADCP, начиная с 2005 г., с перерывами на перестановки. В период с 09.12.2008 по 12.08.2009 гг. была получена запись измерений с дискретностью 1 час температуры и уровня моря на пирсе в Голубой бухте. На метеостанции г. Геленджика (44.55°N, 38.05°E) уровень моря измеряется с 1935 г. по н.вр., с дискретностью 6 часов. Составлены продолжительные ряды наблюдений (1998-2011 гг.) по данным 134 прибрежных метеостанций вокруг берегов Черного моря, включая измерения температуры поверхности моря (ТПМ) и метеоэлементов на метеостанции г. Геленджика в период 1935-2017 гг., (Golenko et al., 2009).

Для интерпретации процессов и интеркалибрации рассматривались базы данных спутниковых зондирований: динамические аномалии уровня моря (AVISO altimetry data); ТПМ PathFinder, v.5, (1985г. - н.в.); ветер на поверхности моря QuickSCAT SeaWinds; реанализы NCEP-NCAR, SCIRON; массив высот рельефа земной поверхности и дна моря "ETOPO-2" с пространственным разрешением 2 дуговые минуты, (Smith and Sandwell, 1997).

Особенности вариаций уровня в северо-восточной части Чёрного моря

Накопленные к настоящему времени данные контактных и дистанционных измерений позволяют оценить масштабы временной и пространственной изменчивости уровня моря в интервалах от минут до десятков лет и от 15 км до сотни км.

По спектрам уровня моря (и других параметров гидрометеорологической системы: температуры воздуха и воды, ветер, и др.), выделяются три группы временных масштабов: 1) многолетние, с периодами более трёх лет; 2) годовые (сезонные), а также первый и второй обертоны годовых

-полугодовые и третьгодовые; 3) мезомасштабные (от нескольких часов до нескольких суток), с максимумами на суточном и полусуточном периодах и на первом, втором, третьем их обертонах.

Спектр колебаний уровня моря в высокочастотной части, в полосе периодов от года до 20 мин. имеет «красный» вид, т.е. спадающий по частоте, что характерно для колебаний параметров во многих геофизических системах, (Мельников, 2015). Хорошо заметны доминирующие годовые колебания (25-30 см по амплитуде, из которых ~ 15 см – стерические изменения), и низкочастотные многолетние вариации на фоне линейного повышения уровня моря со скоростью 1.55 ± 0.05 см в 10 лет. Продолжительность циклов низкочастотных колебаний уровня моря в период с 1990 г. по н.вр. уменьшилась с 20 лет до 3 лет, причём амплитуда колебаний увеличилась с 5 до 10 см. За последние 30 лет фоновое потепление составляет $0.072 \pm 0.005^\circ\text{C}/\text{год}$ по температуре воды и $0.051 \pm 0.05^\circ\text{C}/\text{год}$ по температуре воздуха. 43-летний цикл по температурам (1947-1990 гг.) сменился полуциклом (незавершённым) 1990-2005 гг. с более коротким периодом, причём амплитуды колебаний температур с 1990 г. явно возросли. Смена режимов низкочастотных колебаний, выражающаяся в изменениях амплитуд и частот долговременных цикличностей наблюдается во временном ходе и других параметров. В долговременных изменениях атмосферного давления и осадков видна обратная закономерность: амплитуды и периоды цикличностей во второй половине наблюдений на метеостанции достоверно уменьшились. Причины смены этих колебательных режимов и их связи с ветровым режимом и индексами атмосферной циркуляции, выясняются.

Синоптические (вихревые) процессы в интервале 100-8 суток вызывают низкочастотные колебания уровня по амплитуде порядка 23 ± 0.1 см. Обращает на себя внимание изменение наклона спектра в области периодов 10-30 суток. Спектральный фон на периодах менее 10 суток формируется за счёт нерегулярных синоптических процессов. Предполагается, что наклон логарифмического спектра - 2 в высокочастотной части спектра является следствием процесса экспоненциальной релаксации

возмущений уровня моря для масштабов 10-1/2 сут. (за исключением суточных с обертонами и приливных колебаний). Мезомасштабные процессы вызывают возмущения в уровне моря на порядок меньшие, чем вихревые. Характерные амплитуды колебаний уровня моря в мезомасштабном диапазоне изменчивости следующие: суточные (23.91 ± 0.48 час.) – 1.2 ± 0.1 см; полусуточные лунные (12.45 ± 0.13 час.) – 3.0 ± 0.1 см; полусуточные солнечные (11.95 ± 0.12 час.) – 2.1 ± 0.1 см; спектральный фон (10-1 час.) – 1.6 ± 0.1 см.

Инерционные колебания уровня моря ($T_i \sim 16.60 \pm 0.23$ час.) невелики и составляют в среднем 1.2 ± 0.1 см. Инерционные движения проявляются в виде сильных горизонтальных течений, с вращением вектора скорости течений по часовой стрелке в северном полушарии и хорошо выражены на спектрах компонент скорости. Однако, на примере временного ряда измерений уровня моря на оконечности пирса в Голубой бухте, на спектре которого обнаруживается хорошо выраженный инерционный пик, наряду с полусуточным и суточными пиками. Проф. Сабинин К. Д. предложил гипотезу о появлении выраженного пика инерционных колебаний вблизи берега, на мелководье, где инерционные течения вызывают нагоны/сгоны с инерционной частотой.

Для оценки пространственного распределения низкочастотных составляющих колебаний уровня моря вблизи Полигона, по ежесуточным данным AVISO рассчитаны дисперсии динамических высот уровня моря. Амплитуды низкочастотных колебаний находится в пределах от 21.0 до 26 см, причём мористее, интенсивность колебаний нарастает. Когерентности колебаний уровня моря и температуры поверхности воды в точках вдоль нормали к берегу на траверзе Голубой бухты, от Тонкого мыса до глубокой воды, мористее материкового склона, показывают горизонтальный масштаб значимой когерентности порядка 60 миль. Предполагается, что указанный масштаб не отражает размеры характерных горизонтальных структур, а является следствием интерполяции спутниковых данных по пространству и времени, (Golenko et al., 2009; Москаленко и др., 2011).

Уровень моря имеет ярко выраженные свойства нестационарности реализаций по среднему значению, дисперсии и перемежаемости частотных составляющих. Коль скоро, Фурье- спектры дают средние по временному ряду амплитуды частотных компонент, для нестационарного ряда необходим вэйвлет-анализ. Приводится пример вэйвлет-диаграммы перемежающихся колебаний уровня моря в интервале периодов 0-3000 суток.

"Отклик" уровня моря на ветровые циклы

В общем случае, воздействие разномасштабных региональных ветров на уровень моря представляется очень сложным. Однако, выделение сигнала отклика морской гидрофизической системы на сравнительно простые ветровые циклы может улучшить понимание процессов.

Ранее было показано (Москаленко и др., 2016), что в регионе имеют место разномасштабные самоподобные ветровые циклы, каждый из которых состоит из комбинации северо-восточного и юго-восточного ветров, последовательно сменяющих друг друга. Такие смены соответствуют попеременному влиянию отрогов Азорского и Сибирского антициклонов. Черное море расположено в цепи внутренних бассейнов между Северной Атлантикой и пустынями Центральной Азии, в промежуточной зоне влияния Азорского антициклона, с запада и Сибирского антициклона, с востока, а также подвержено влиянию прорывов арктических холодных воздушных масс с севера и горячего воздуха, с юга, со стороны субтропического глобального пояса пустынь. Ветровые циклы имеют различную продолжительность и бывают внутрисезонными, сезонными и многолетними (климатическими), что соответствует попеременному влиянию отрогов Азорского и Сибирского антициклонов. Разномасштабные ветры порождают ряд гидрофизических явлений, такие как Основное Черноморское течение (ОЧТ), вихреобразование, апвеллинги, холодный промежуточный слой (ХПС), [Кривошея и др., 2012]. Климатические ветровые циклы создают циклоническую завихренность и способствуют в среднем циклонической циркуляции Черного моря. Внутри-сезонные ветровые циклы вызывают апвеллинги с регулярностью примерно 20-25 дней.

Связанная с апвеллингом радикальная перестройка гидрологической структуры вод сопровождается интенсивной адвекцией вод с большими скоростями (до 1 м/с), (Melnikov et al., 2015).

Представляет интерес оценить в среднем статистическом смысле характерные масштабы колебаний уровня моря, температуры воздуха и температуры поверхности моря, в зависимости от доминирующих ветров. С этой целью, по временному ряду метеозаписей проводилась выборка по календарным месяцам пар значений уровня моря и направления ветра. Затем, по 10-градусным секторам направлений ветра, для каждого месяца, были рассчитаны плотности вероятности и соответствующие средние значения уровня моря. Для увеличения статистической значимости, средние значения уровня моря были рассчитаны также для более широких (45-градусных) секторов по румбам ветра: (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315) \pm 22.5 град., по азимуту. Аналогичные расчёты были проведены для пар температура воздуха - направление ветра, и температура поверхности воды - направление ветра. Использованы данные измерений на метеостанции г.Геленджика, в период 0ч., 20 мая, 1989 по 15 ч., 30 июня, 2015. Дискретности измерений направления ветра и температуры воздуха – 3 час.; температуры поверхности воды и уровня моря – 6 час.

Выявлены следующие закономерности в соотношениях средних значений уровня моря, температуры поверхности воды и температуры воздуха с доминирующими ветрами в исследуемом районе:

1. В зимние месяцы (самый холодный месяц - февраль), при СВ и С ветрах происходит максимальное понижение температуры воздуха (среднее значение \sim 2°C). ЮВ ветер, наоборот, вызывает максимальные потепления воздуха (в среднем до \sim 9°C). Такая же зависимость прослеживается и для ТПМ при средних значениях \sim 7°C и \sim 8°C, соответственно для СВ и ЮВ ветров. Уровень моря составляет \sim 476 \pm 0.5 см для С ветра и \sim 480 \pm 1 см при Ю ветре. Влажность понижена при СВ ветре (\sim 70%) и повышена при Ю и З ветрах (\sim 80%). Зимой, минимальное количество осадков (3-5 см) приносится СВ ветром и немного больше (7-8 см) почти

равномерно ветрами с южных направлений.

2. Летом(самый теплый месяц- август) СВ ветер вызывает потепление воздуха на $\sim 2^{\circ}\text{C}$ по сравнению с В и С ветрами (до $\sim 25^{\circ}\text{C}$). Температура воздуха максимальна при Ю и З ветрах ($\sim 25.6^{\circ}\text{C}$). В отличие от воздуха, ТПМ понижается при СВ ветрах до $\sim 23.2^{\circ}\text{C}$, при средней ТПМ $\sim 25^{\circ}\text{C}$ для южных ветров. Понижение ТПМ связано с апвеллингами. Уровень моря устанавливается в среднем на ~ 484 см для СВ ветра, что на 3 см меньше, максимального уровня при В ветре. Для Ю ветра уровень моря с точностью до 1 см близок к уровню моря при СВ ветре. Влажность понижается при СВ ветре до 60%, и повышается при ЮВ и З ветрах (65%). Количество осадков возрастает в летние месяцы: В июне 15 см приносится В ветром, в июле наблюдается максимум в количестве осадков(17 см) при ЮЗ ветре. В августе ливневые осадки приносит Ю ветер. Уровень моря максимален в июле и минимален в октябре. В январе и апреле уровни моря близки при Ю ветрах и значительно различаются при СВ и В ветрах.

Интеркалибрация

Интеркалибрация контактных и дистанционных измерителей является важной вспомогательной задачей. Возможность использования для анализа процессов обширных спутниковых данных и данных реанализов, а также, рассчитанных при помощи моделей параметров, зависит от их точности, которую проще всего оценить посредством прямого сравнения с данными измерений *in situ*, объём которых обычно существенно меньше.

Спутниковые данные ТПМ, уровня моря, ветра, а также рассчитанные параметры реанализов NCEP/NCAR и SCIRON сравнивались с данными контактных измерений. В частности, измерения ТПМ, выполненные с причала в Голубой бухте, были сопоставлены с синхронными измерениями ТПМ на Геленджикской метеостанции. В свою очередь, ТПМ на метеостанции и спутниковая ТПМ в ближайшей к метеостанции точке с координатами 44.6N,37.9E, также сравнивались. В результате, была получена оценка с.к. ошибки в спутниковых измерениях температуры $\sim 0.5^{\circ}\text{C}$. Спутниковые аномалии уровня моря в ближайшей к метеостанции точке (44.5N, 38.0E), на

расстоянии 3.7 морских миль, не соответствуют данным уровня моря на метеостанции. Данные о ветре на метеостанции и по реанализу также оказались рассогласованными. Сравнение по температуре с данными реанализа в ближайшем к метеостанции квадрате 44-45N,37.5-38.5E показало, что в период 1980-2009 гг. среднемесячные ТПМ на поверхности моря отличаются по с.к.о. на 0.98°C , причем имеется систематическое завышение ТПМ по реанализу на $T=0.24^{\circ}\text{C}$ по сравнению с метеостанцией. Ежесуточные значения различались даже больше: в 1990г.– с.к.о(T)= 2.52°C , $\Delta T=0.79^{\circ}\text{C}$; в 2005 г.–с.к.о(T)= 2.90°C , $\Delta T=0.27^{\circ}\text{C}$. Таким образом, только среднемесячные значения ТПМ можно считать согласованными.

Высокие когерентности между измерениями по сетке спутниковых измерений аномалий уровня моря показывают масштаб сглаживания спутниковых данных - более ~ 60 миль, что препятствует возможности применения спутниковых данных уровня моря для исследования мезомасштабных процессов. Указанные несоответствия требуют дальнейшего изучения.

В заключение необходимо отметить, что количественная оценка действующих механизмов влияния на уровень моря главных вынуждающих сил и факторов остаётся на будущее, т.к. процесс анализа совокупных индикаторов сложен и, очевидно, требует дополнительных целенаправленных измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №14-05-00159 и №.15-05-04198.

Ключевые слова:

Чёрное море, полевые измерения, спутниковые данные, аномалии уровня моря, температура поверхности моря, модель рельефа дна ETOPO2, многолетние вариации, стерические изменения, сезонный ход, мезомасштабная изменчивость, инерционные колебания, приливные волны, апвеллинги.

Литература:

1. Зацепин А.Г. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой части Черного моря// Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т.50. №1. С. 16-29.
2. IOC Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume IV: An Update to // JCOMM Technical Report. Paris: WMO/TD. No. 1339. 2006. No. 3. 80 P.
3. Мельников В.А. Калибровка высокоточного спутникового радиовысотомера по океанографическим измерениям уровня моря in-situ // XI Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ 2009). Секция: Приборы и технологии геолого - геофизических ресурсных исследований в океане. М.:ИО РАН. 2009. Материалы конференции. Часть III. С. 108-109.
4. Golenko N.N., Melnikov V.A. Moskalenko L.V. North-East Black Sea SST and SLA Variability// Proceedings of the Ninth international Conference on the Mediterranean coastal environment, Ozhan, E. (Ed.). Ankara, Turkey: Middle East Technical Univ. 2009. Vol.2. P. 981-992.
5. Smith W. H. F., Sandwell D.T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings// Science. 1997. Vol. 277. P. 1957-1962.
6. Мельников В.А. Особенности разномасштабных вариаций в геофизических сплошных средах // Процессы в геосредах. М.: ИПМех РАН. 2015. Т. 2(3). С. 49-61.
7. Москаленко Л.В., Мельников В.А., Кузеванова Н.И. Климатическая изменчивость ветрового режима в северо-восточной части Черного моря и оценки корреляции динамических и термических факторов // В Сб. "Комплексные исследования Черного моря". 2011. М.: Научный мир. С. 12-34.
8. Москаленко Л.В., Мельников В.А., Кузеванова Н.И. Разномасштабная изменчивость ветрового режима на прибрежной акватории северо-восточной части Чёрного моря// Известия РАН, серия географическая. 2016. №1. С. 74-86.
9. Кривошея В.Г., Москаленко Л.В., Мельников В.А., Скирта А.Ю. Влияние изменчивости ветрового режима и термических условий на структуру и динамику вод в северо-восточной части Черного моря// Океанология, 2012. Т. 52. №4, С. 484-498.
10. Vasiliy Melnikov, Lidija Moskalenko, Vladimir Piotoukh and Andrey Zatsepin. Multiscale wind cycles and current pulses at the Black Sea eastern boundary// Geophysical Research Abstracts. 2015. Vol. 17. EGU2015-7184-1.