

Восемнадцатая Всероссийская открытая конференция
"Современные проблемы дистанционного зондирования
Земли из космоса", 16–20 ноября 2020 г.

Пульсирующие течения в океане
по спутниковым и контактным измерениям

*Мельников В.А., Амбросимов А.К., Дианский Н.А.,
Клювиткин А.А.*

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова*

18 ноября 2020 г.
Москва, ИКИ РАН

Цель работы

При исследовании временных рядов долговременных измерений привлекает внимание повсеместная перемежаемость и пространственная неоднородность наблюдаемых океанографических параметров. Такие же свойства характерны и для изменений метеопараметров. При этом плотность кинетической энергии течений изменяется в широких пределах.

Общая изменчивость обусловлена циклическими вариациями, средним фоном и перемежаемостью («вспышками») колебаний. «Вспышки» кинетической энергии названы пульсирующими течениями.

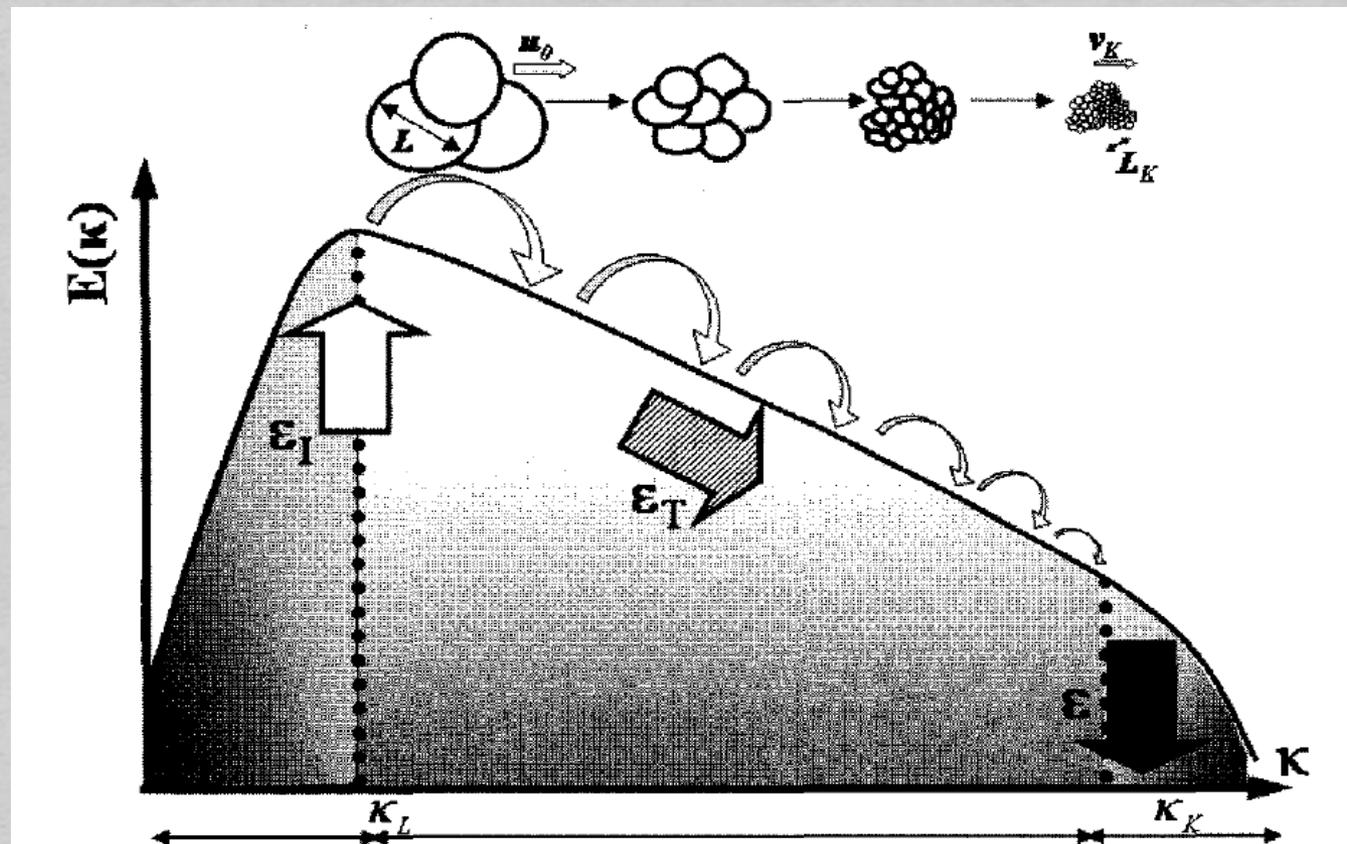
Конечной целью работы является исследование общих фундаментальных свойств многомасштабных динамических процессов, переноса энергии по спектру на основе обобщения региональных проявлений.

Мотивация

Построение обобщённого пространственно-временного спектра колебаний океанографических и метеорологических параметров.

Изучение динамических механизмов формирования изменчивости.

Общепринятая схема спадающего спектра



Поступление энергии Инерционный Диссипация

Масштаб: L $K_L \leq k \leq K_K$ K

Общепринятая схема формирования спадающего спектра турбулентности в результате каскадного переноса энергии за счёт дробления вихрей в инерционном диапазоне начиная с масштаба L привноса энергии в систему до масштаба диссипации Колмогорова K .

From: Sagaut P., Deck S., Terracol M. Multiscale and Multiresolution Approaches in Turbulence. Imperial College Press, 2006 г.

Существует **альтернативная гипотеза о формировании «красного» спектра** флуктуаций океанографических и метеорологических параметров.
Об этом поговорим ниже.

Данные

В работе приводятся несколько “case-studies” гидродинамических процессов: над хребтом Рейкьянес, на акватории Субарктического фронта (Амбросимов и др., 2019); над Срединно-Атлантическим хребтом, в области Азорского течения (Мельников, 2016; Мельников, 2017); в регионе цепи подводных гор хребта Подкова (Horse Shoe), в области восточной ветви Азорского течения в Иберийской котловине Северной Атлантики (Мельников, Голенко, 2019); на "Черноморском гидрофизическом полигоне Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН", расположенном вблизи Основного черноморского течения, на траверзе г. Геленджик (Зацепин и др. 2014; Мельников и др., 2017); в Карском море (Архипов и др., 2013). Во всех случаях, для интерпретации процессов использовалась разнообразная информация контактных и спутниковых измерений на автономных буйковых станциях, дрейфтерах АРГО(С) (Мельников, Никитин, 2020), гидрологических зондирований и разрезов, измерений уровня моря и ветров. Составлены продолжительные ряды метеоэлементов по данным береговых (и на островах) метеостанций в Северной Атлантике, а также вокруг берегов Черного моря, включая многолетний (1935-2020 гг.) ряд наблюдений на метеостанции Геленджика (Мельников и др., 2018).

Методы обработки

Рутинная обработка данных измерений включала в себя подготовку массивов данных, расчёт статистических характеристик временных рядов измеренных и производных параметров с использованием гистограмм, прогрессивно-векторных диаграмм, традиционного спектрального анализа Фурье - авто- и взаимных спектров, авто- и взаимных вэйвлет-диаграмм, скользящих спектрограмм. Применялись методы обработки векторной информации с расчётами спектральных инвариантов, вращательных компонент, ЭОФ, годографов, а также оценка частотных составляющих спектров на основе динамико-стохастических моделей (Calman, 1978).

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: $\hat{V}_m = [2/(N\delta t)] \sum \delta t V_k(t) \exp(-i2\pi mk/(N\delta t))$ - коэф. 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; угловые 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 $\psi_0(\eta)$:

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

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

$$\psi(f) = \pi^{-1/4} H(f) e^{-\pi(f-f_0)^2},$$

с преобразованием Фурье $\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i2\pi f_0 \eta} e^{-\eta^2/2}$, где $H(f)$ - функция Хэвисайда.

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

Измерительные полигоны ИО РАН по исследованию мезомасштабных гидрофизических процессов.

Атлантический Полигон-70, 1970 г.

ПолиМоде, 1974-1979 гг.

Мезополигон , 1985 г.

Мегаполигон, 1987 г.

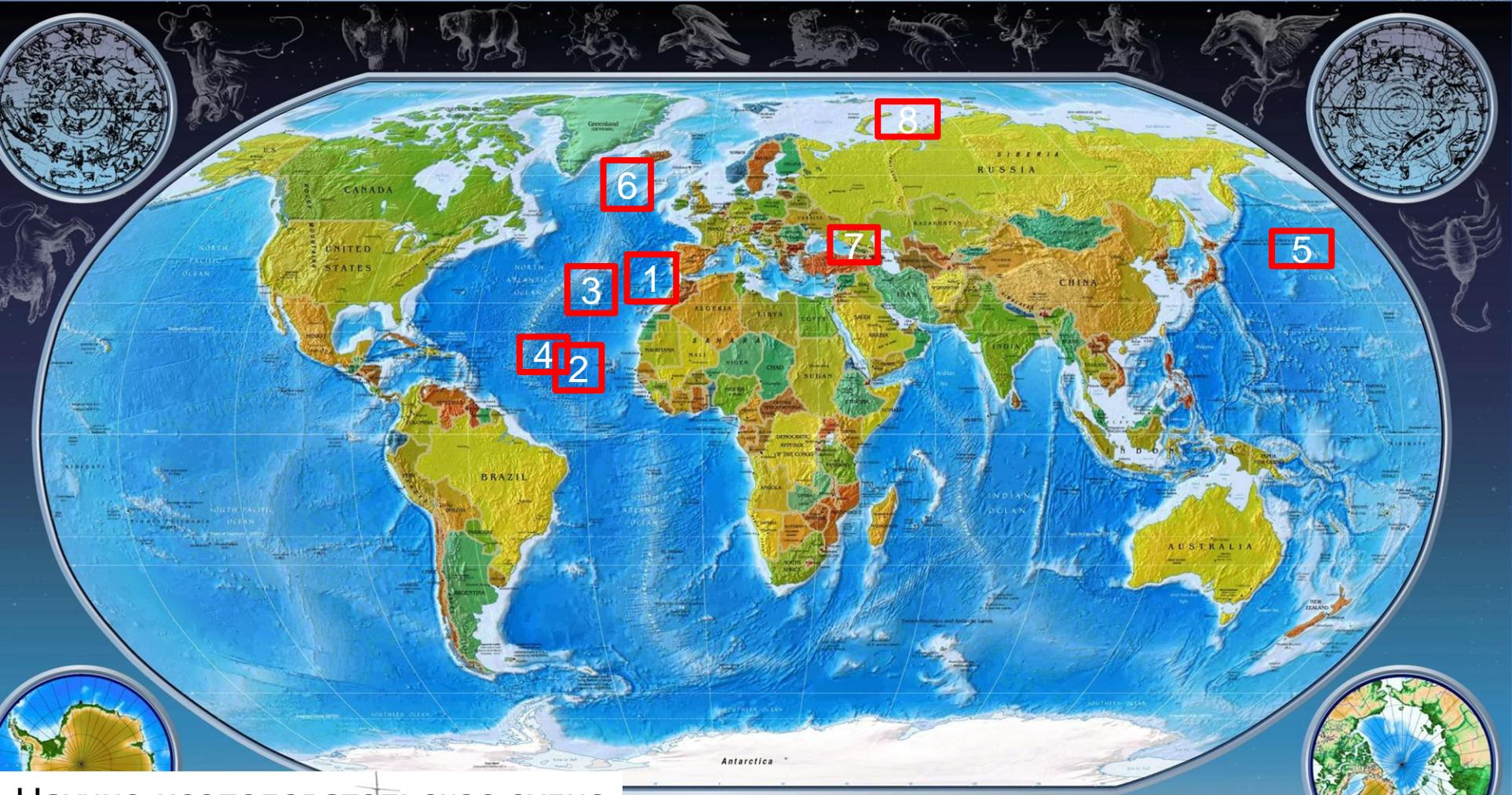
Полигон АБС, 31р. нис «Академик Курчатов», 1980 г.

Полигон вблизи подводной горы Ампер, 1985-1987 гг.

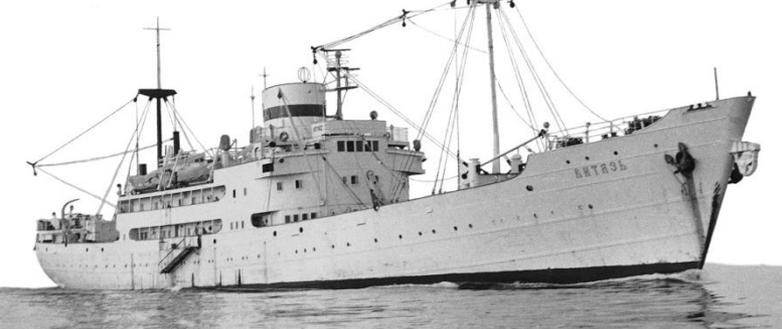
Измерительные станции в Баренцевом и Карском морях, летом 2012 г.

Гидрофизический полигон в северо-восточной части Черного моря, с 2005 г. по настоящее время.

Субарктический полигон, с 1995 г. по настоящее время.



Научно-исследовательское судно Витязь

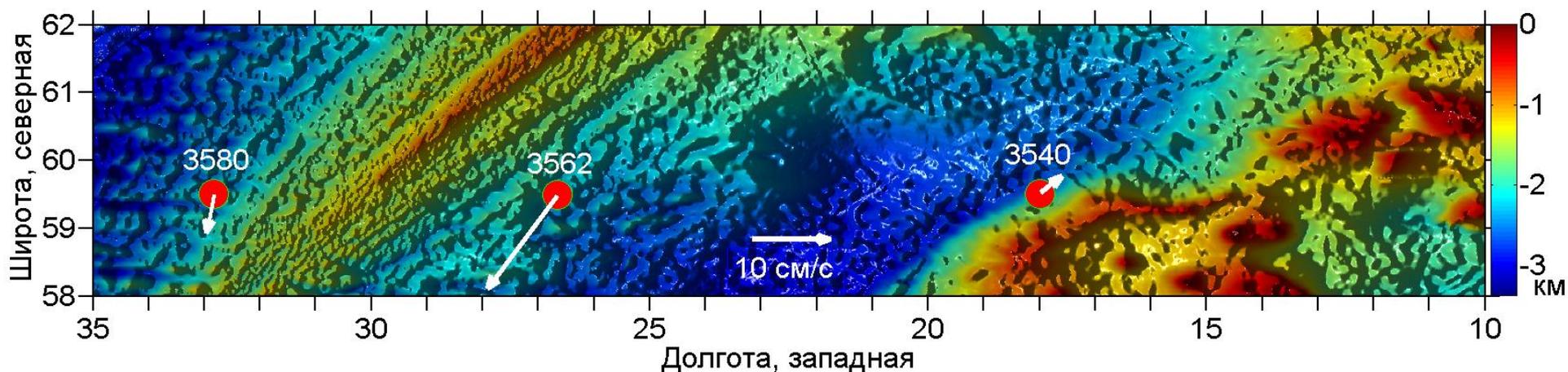


Полигоны ИО РАН по исследованию мезомасштабных гидрофизических процессов.

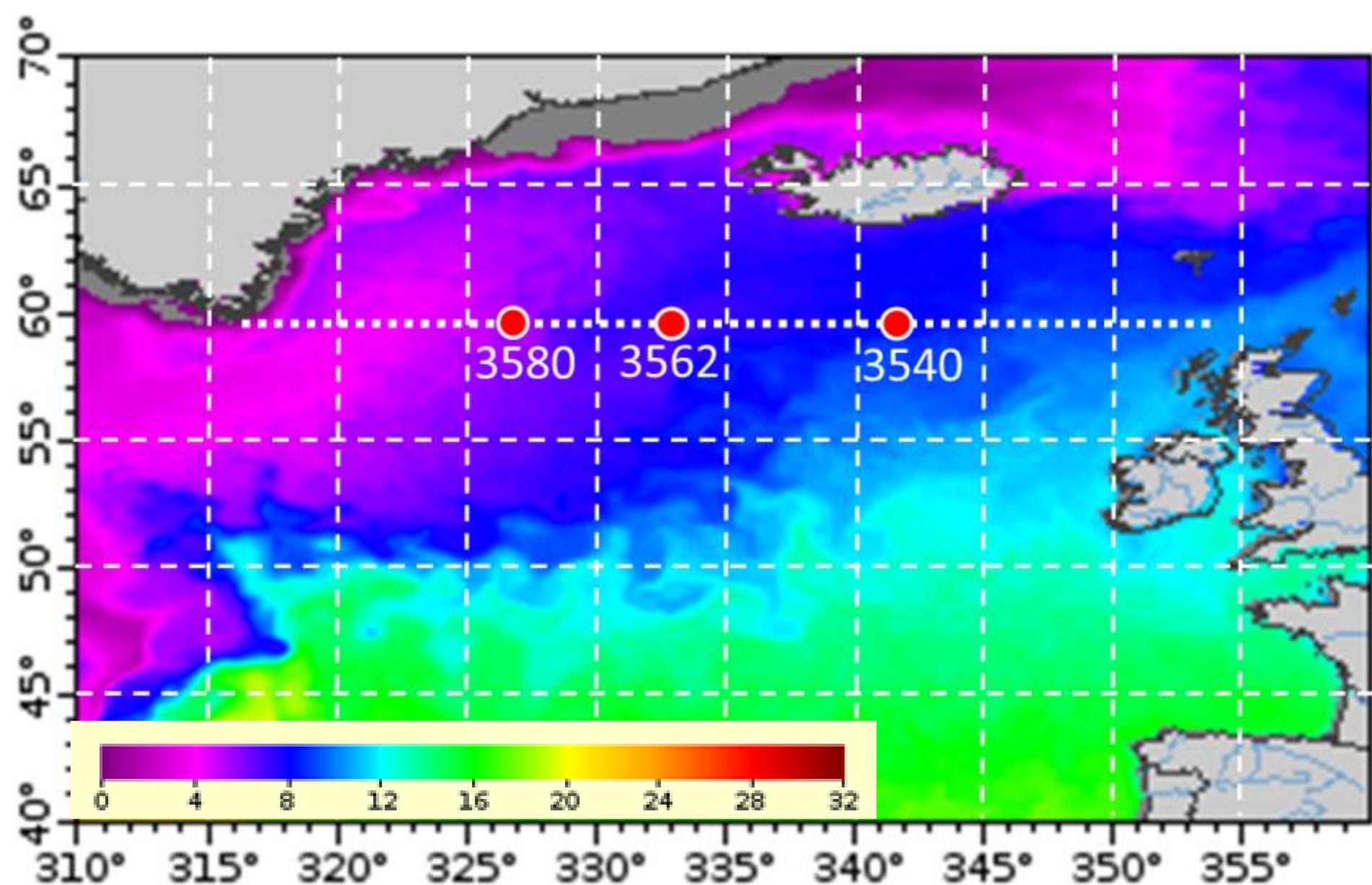
1. Подводная гора Ампер; 2. Атлантический Полигон-70; 3. Срединно-Атлантический хребет ; 4. Мезополигон; 5. Мегаполигон;
6. Субарктический полигон; 7. Чёрноморский полигон. 8. Карское море (ГОИН).

Субарктический полигон

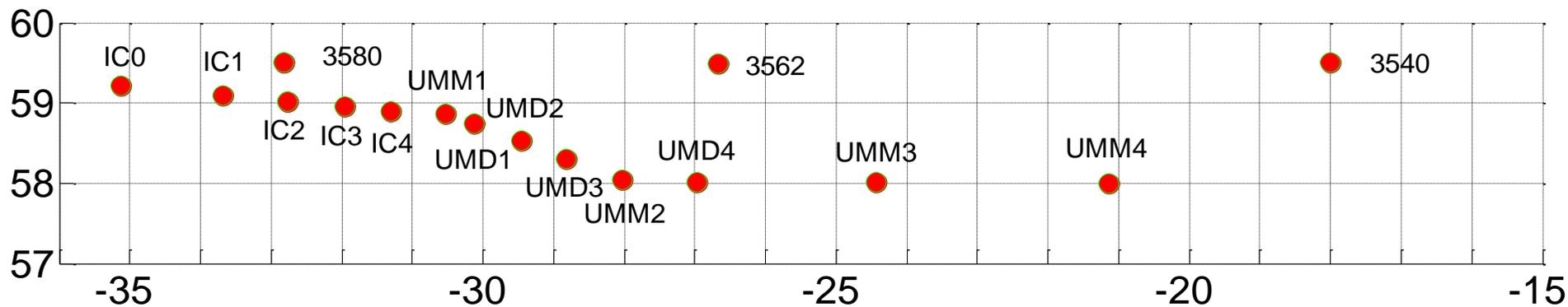
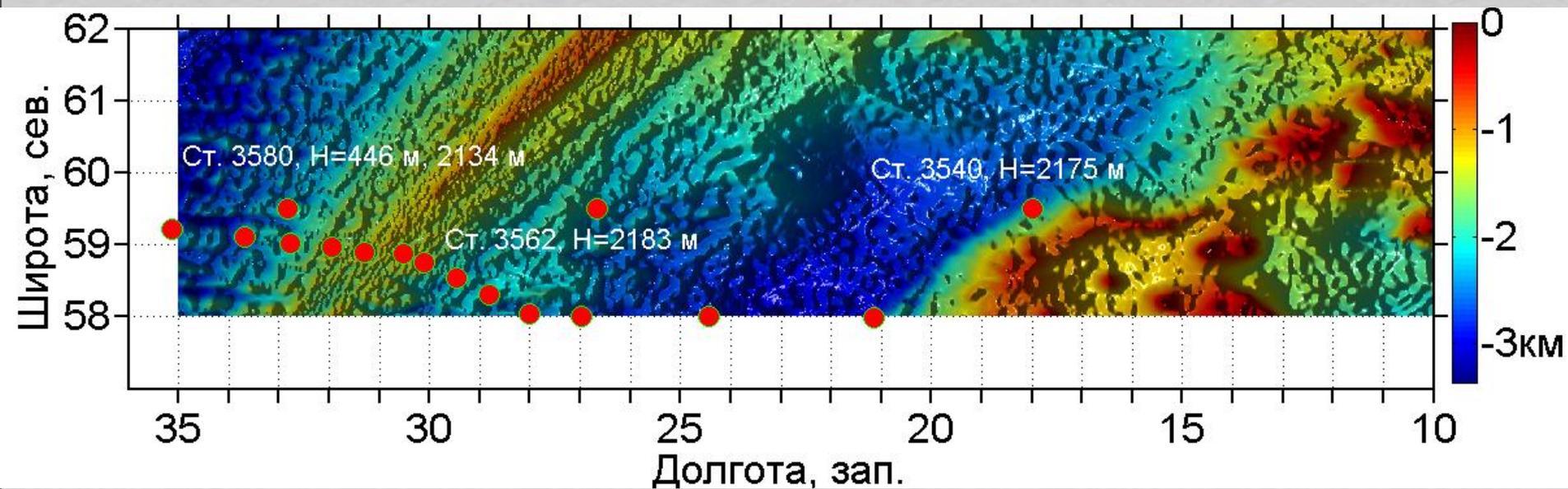
На основе временных рядов измерений придонных скорости течений и температуры, полученных в период с июня 2016 года по июль 2017 года, в трёх точках в зоне Субарктического фронта Атлантики, наряду с использованием многолетних спутниковых данных зондирований поверхности океана в приполярном регионе, рассматриваются разно-масштабные изменения на поверхности океана и придонные течения над западным и восточным склонами хребта Рейкьянес и вблизи поднятия Хэттон, на плато Роколл.



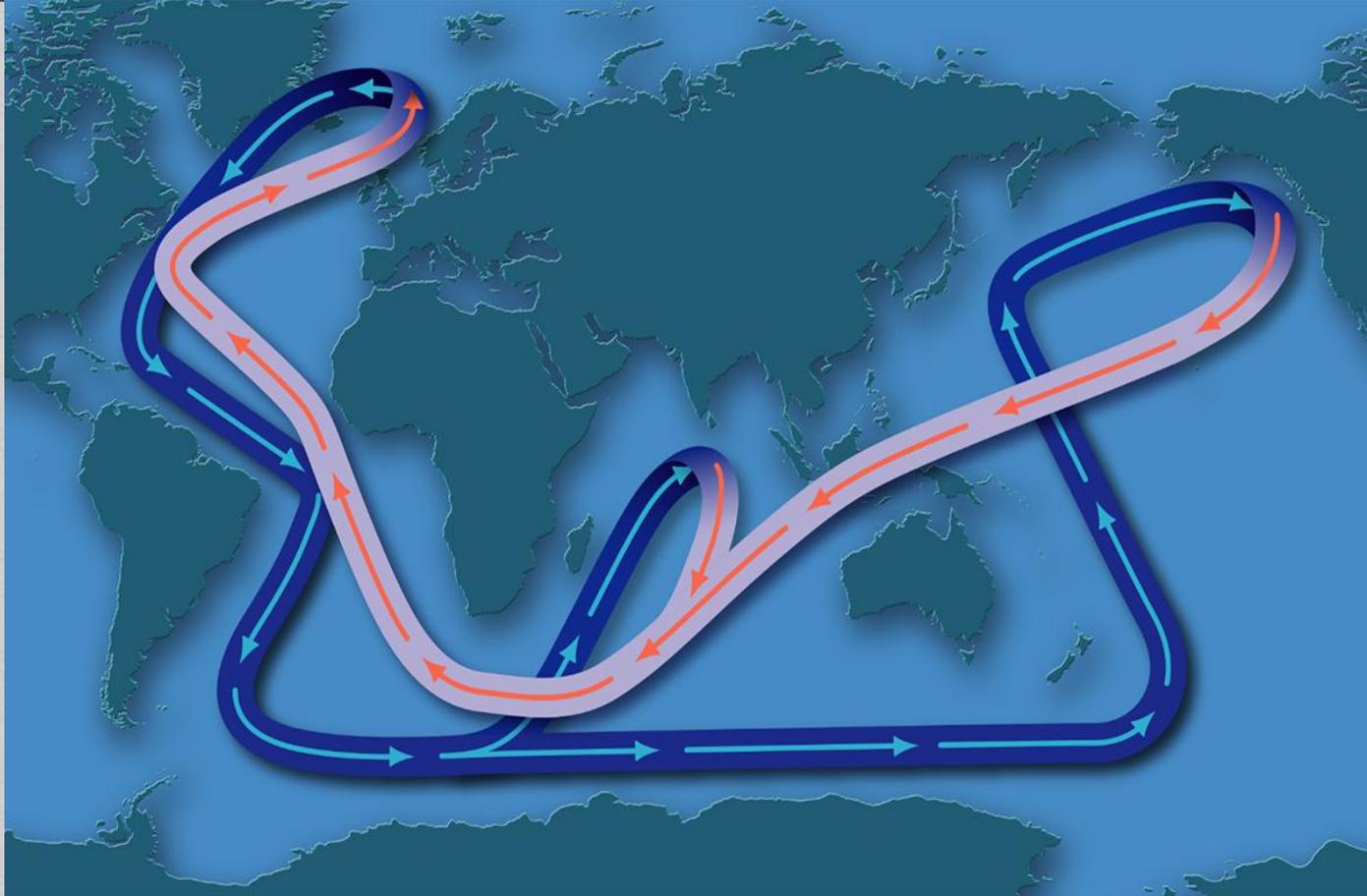
Положение буйковых станций на фоне рельефа дна Северной Атлантики, в полосе вдоль гидрологического разреза ИО РАН - 59.5° с.ш. Стрелками показаны векторы средних за год придонных течений.



Положение буйковых станций на фоне поля ТПО Северной Атлантики 2015-12-01. Точечным пунктиром показано положение многолетнего гидрологического разреза ИО РАН - вдоль 59.5° с.ш.



High-resolution current meter and hydrographic data from the Irminger Current mooring array 2014-2016. OSNAP program.



WHOI News Releases

APRIL 11, 2018

[Atlantic Ocean Circulation at Weakest Point in 1,600 years](#)

OCTOBER 18, 2013

[WHOI Scientists Receive \\$11.6 Million to Measure Changes in Ocean Circulation](#)

APRIL 13, 2018

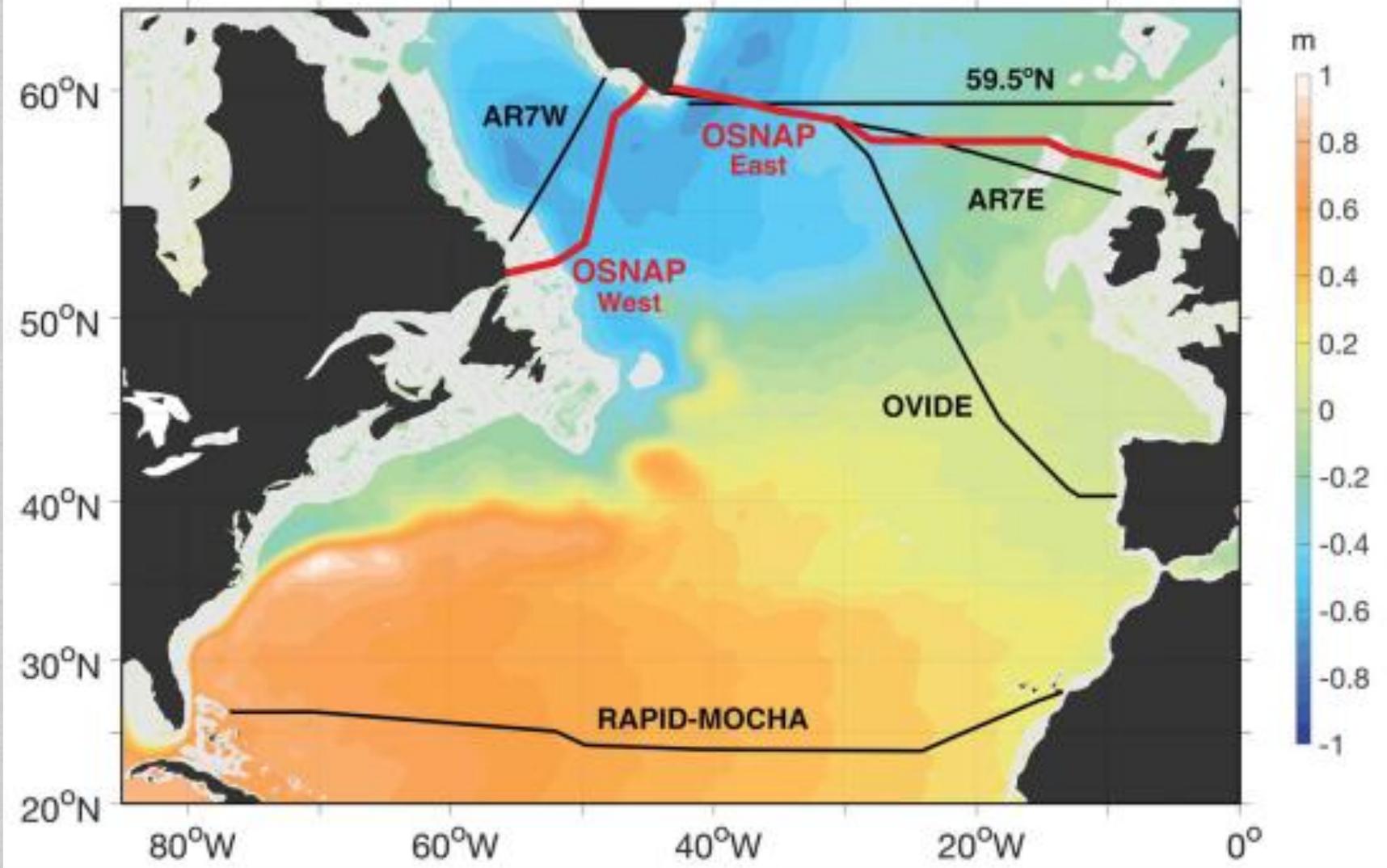
[What If the Ocean's Climate-Controlling 'Conveyor Belt' Came to a Halt?](#)

LiveScience

APRIL 12, 2018

[Gulf Stream is weakest its been in 1,600 years, study says](#)

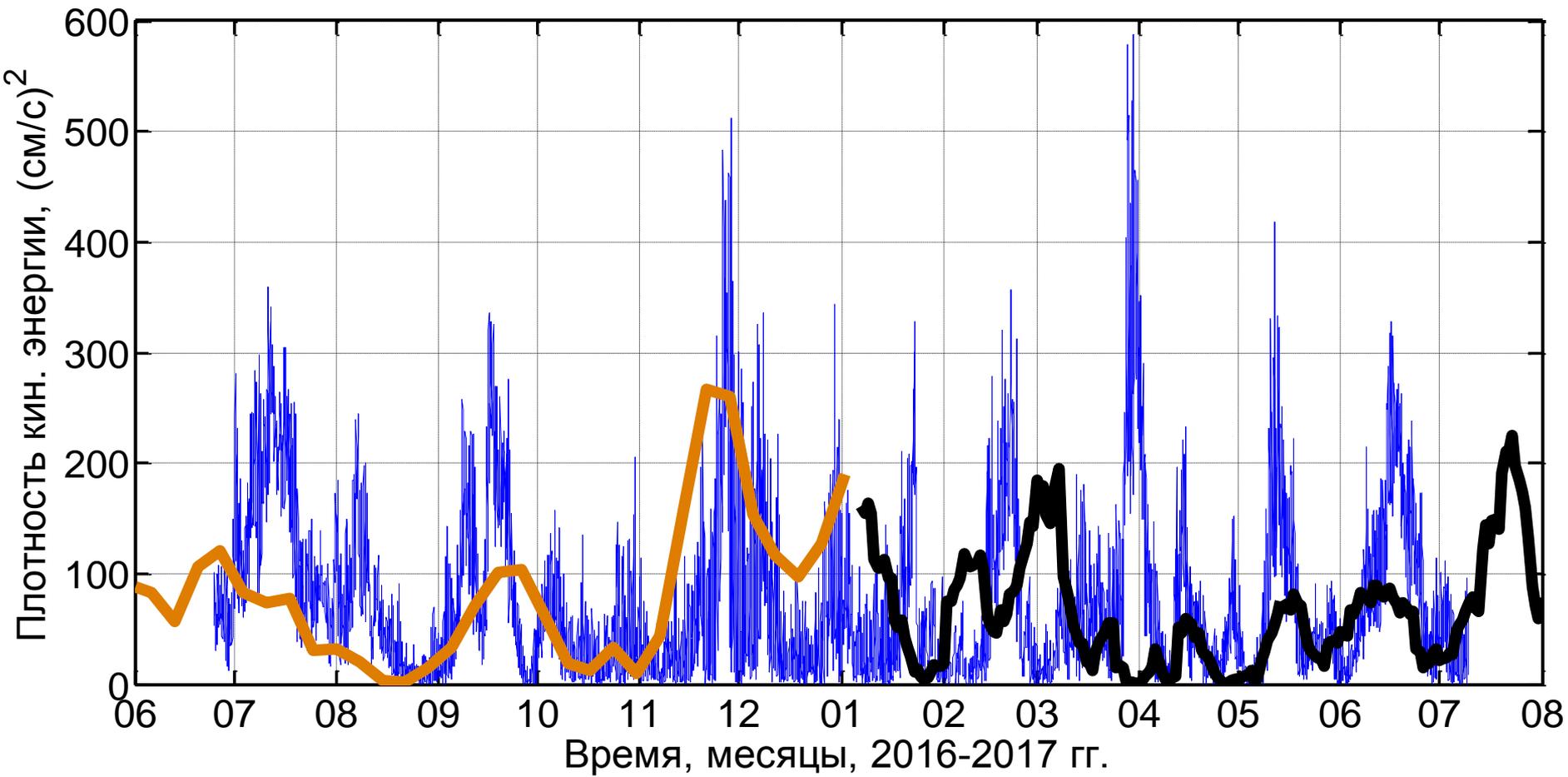
UPI



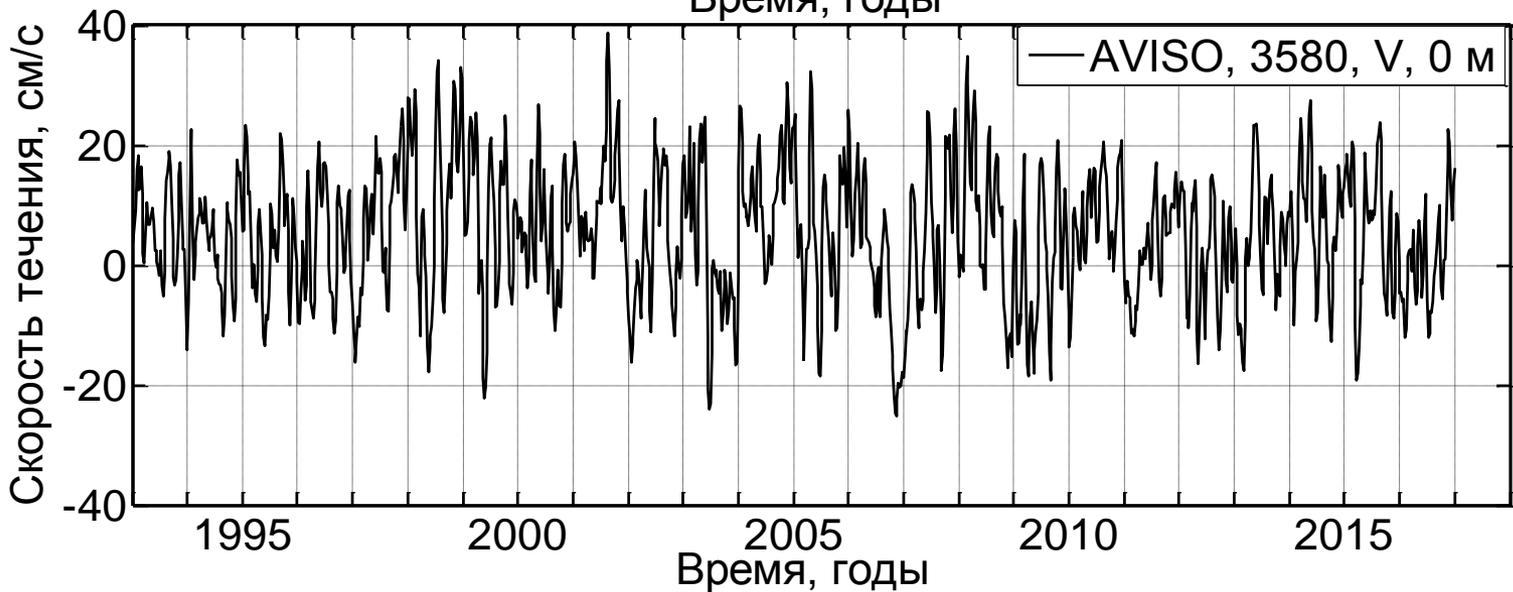
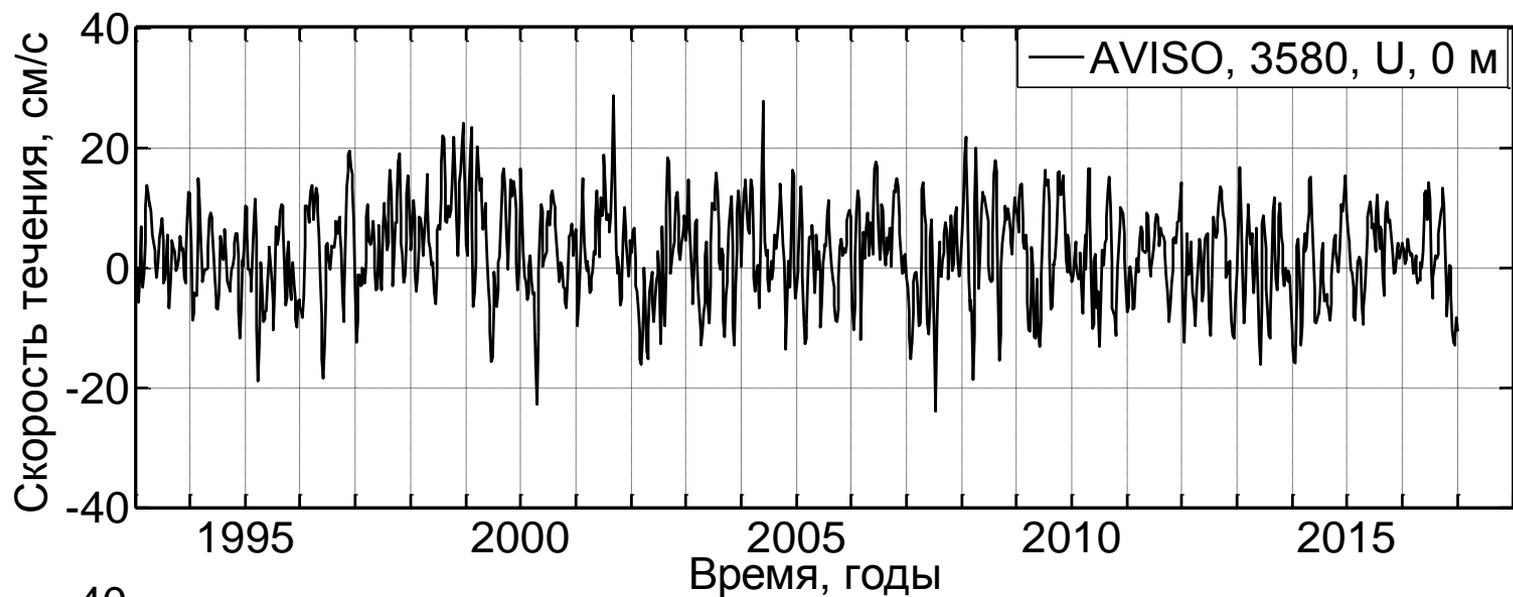
OSNAP observing system. (From Lozier, et al, 2019)

The OSNAP section (red line) superposed on a map of mean absolute dynamic height (meters), with bathymetry <500 m shaded gray. The OSNAP observing system was designed to take advantage of the German Labrador Sea exit array at 53°N (operational since 1997) (32); the recently installed U.S. Global OOI (Ocean Observatories Initiative) node in the southwest Irminger Sea; repeat A1E/AR7E hydrographic sections across the Irminger and Iceland basins (42, 43); and the Ellett Line in the eastern basin (operational since 1976) (44). OSNAP complements several monitoring programs in the North Atlantic: the Canadian repeat AR7W program in the Labrador Sea (18, 45), Cape Farewell-Scotland sections at 59.5°N (29, 30), the French OVIDE line across the eastern North Atlantic (22), and the U.K.-U.S. RAPID-MOCHA array at 26.5°N (3).

Ст. 3580,446 м+AVISO



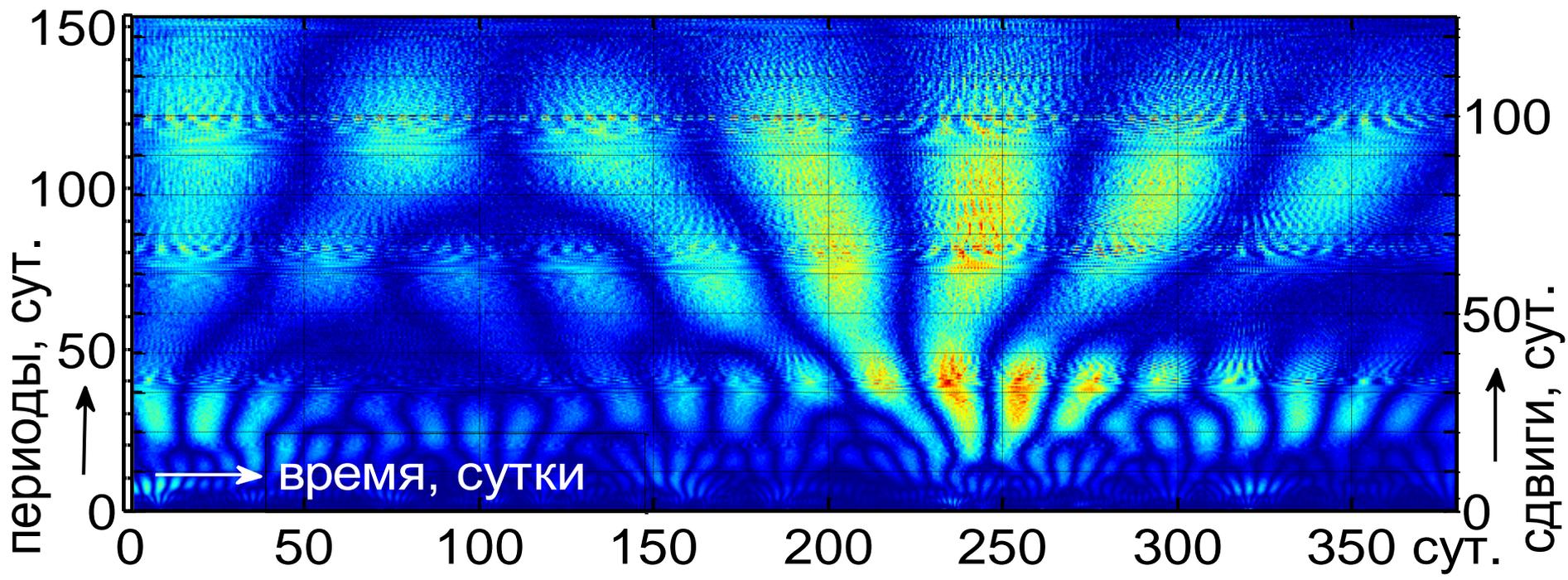
Плотность кинетической энергии течений на ст.3580, глубина 446м (синяя линия) и геострофического течения на поверхности моря, по данным AVISO (жирные линии).



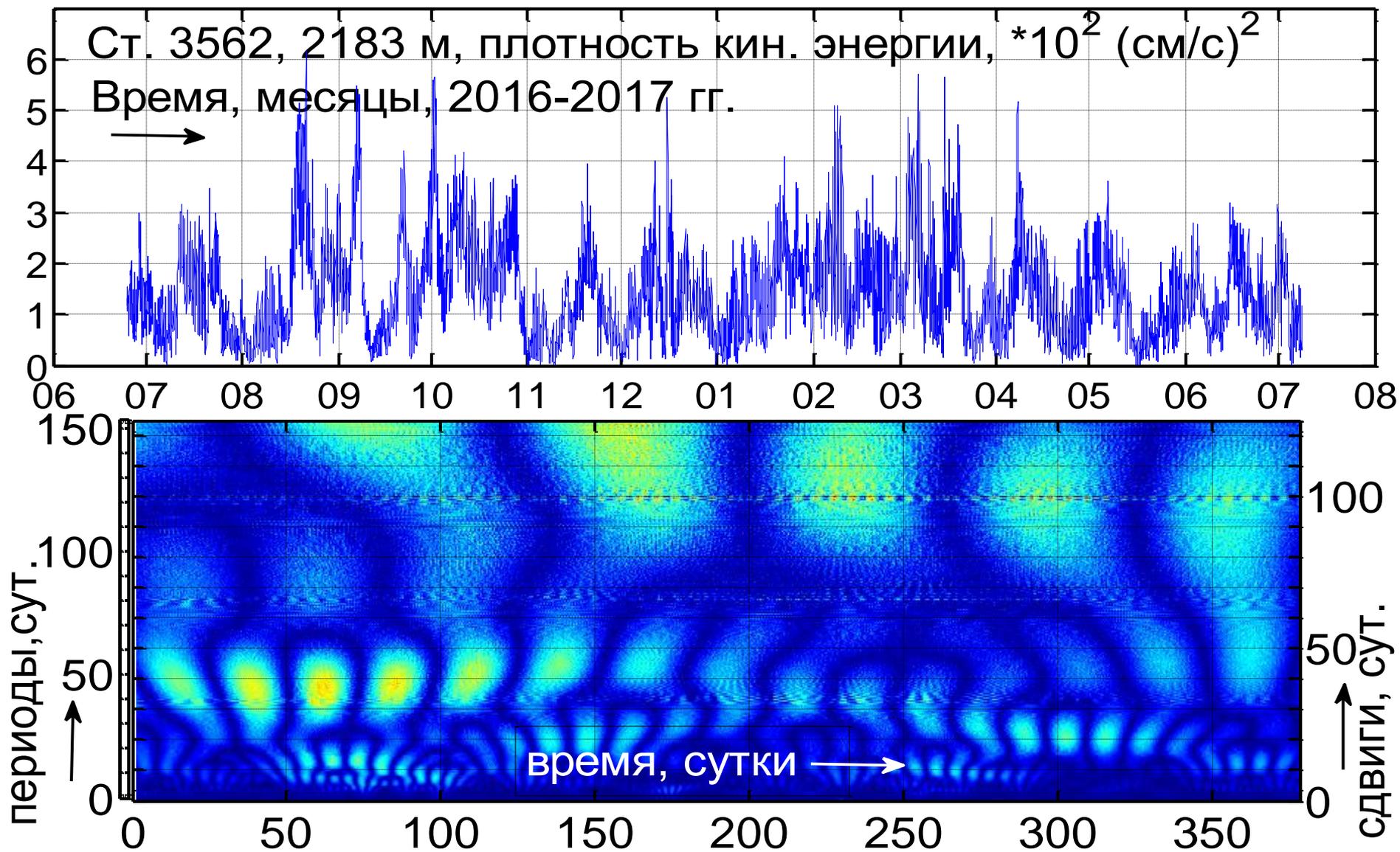
Скорости геострофических течений на поверхности моря (баротропная компонента течений) по данным AVISO вблизи ст. 3580, в точке 59.5 N, 32.8 W, в период 1993-2017 гг.



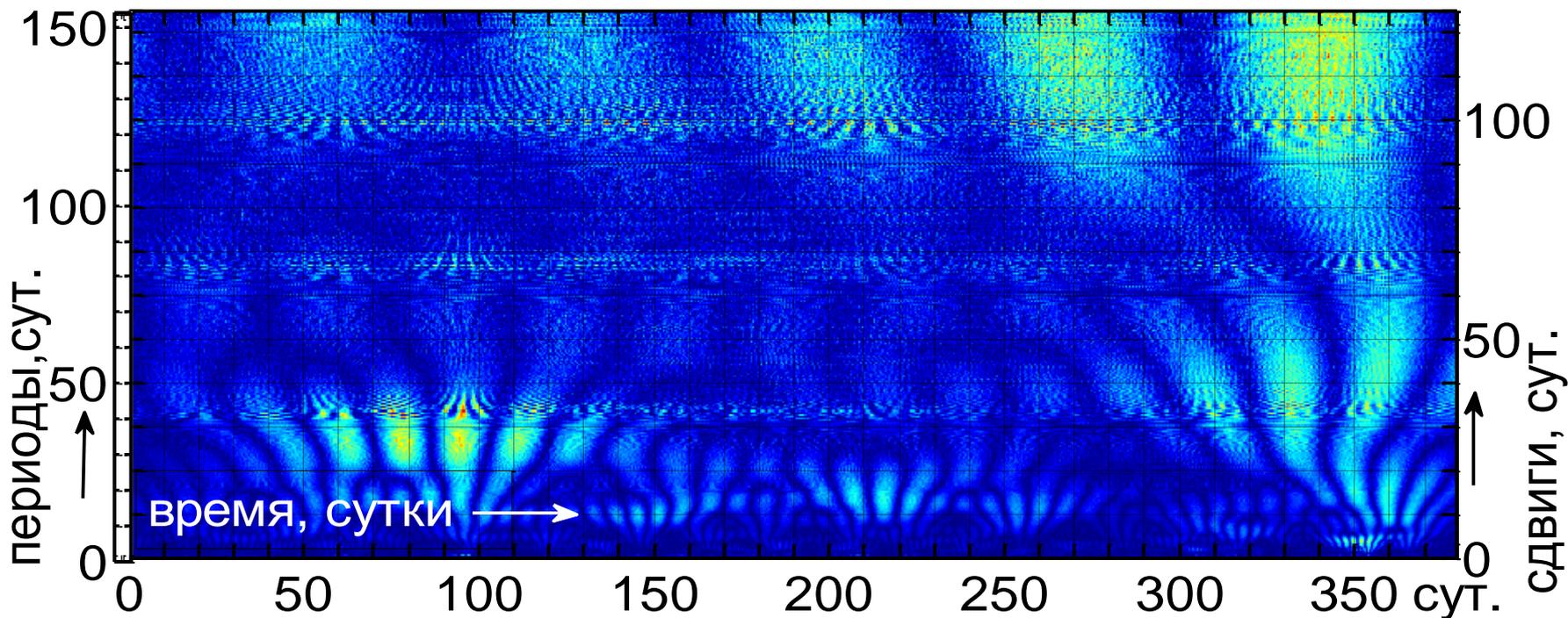
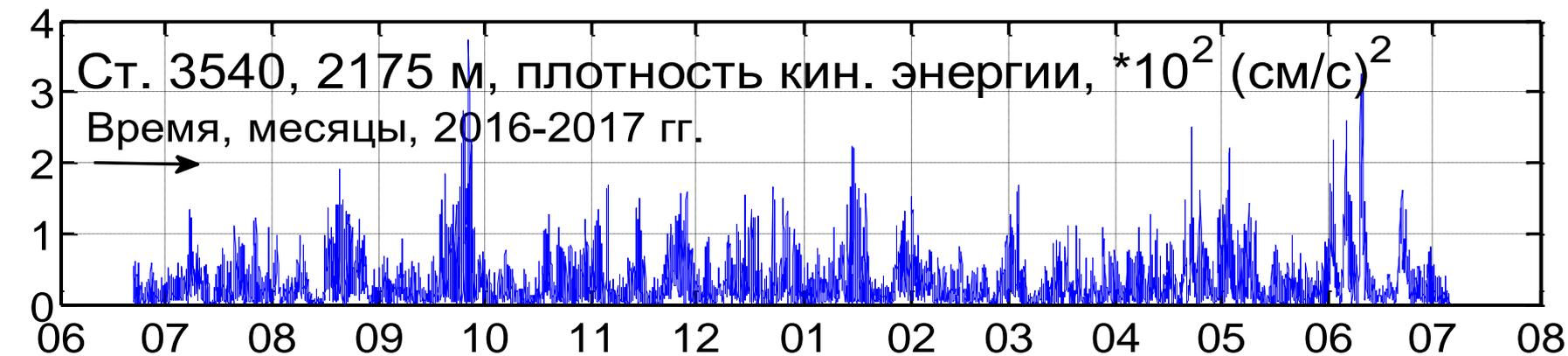
Вэйвлет-диаграмма плотности кинетической энергии на станции 3580, горизонт 446 м. (Иллюстрация «Удары в системе»!).



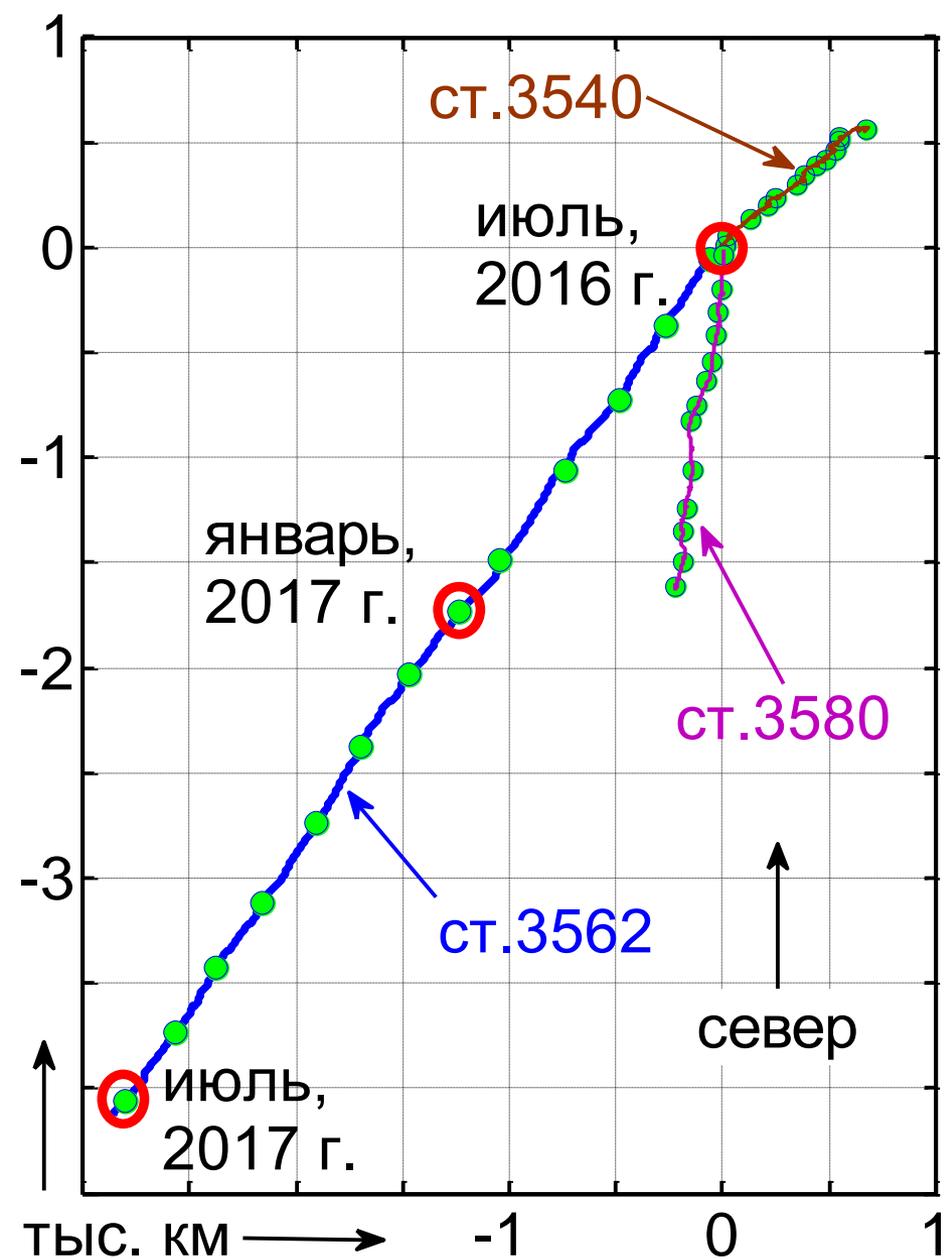
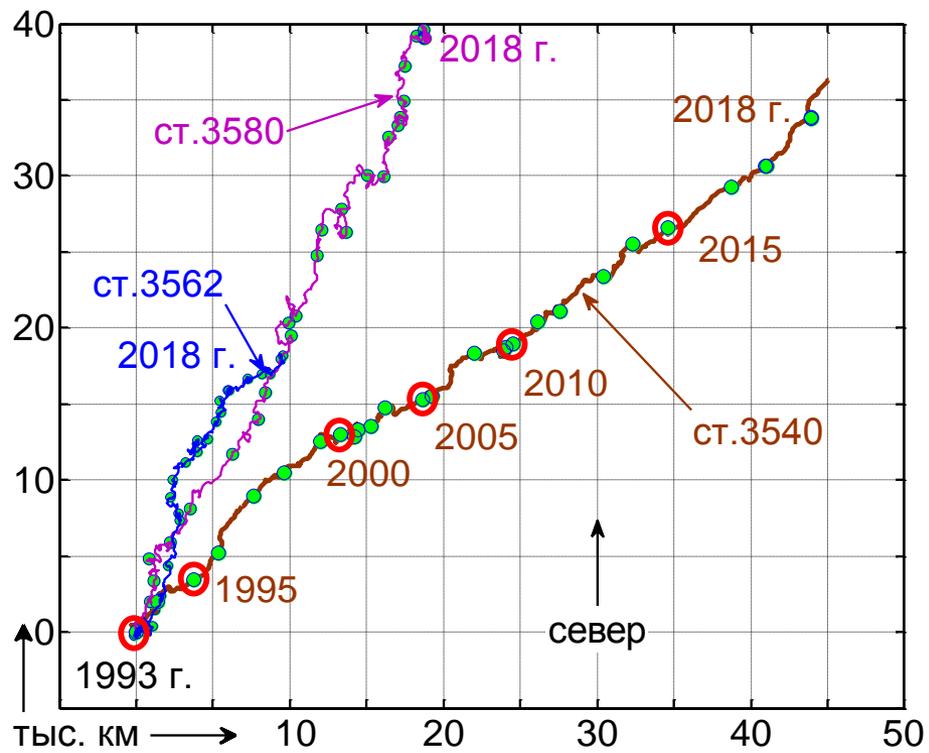
Вэйвлет-диаграмма изменений плотности кинетической энергии на станции 3580, горизонт 2134 м.



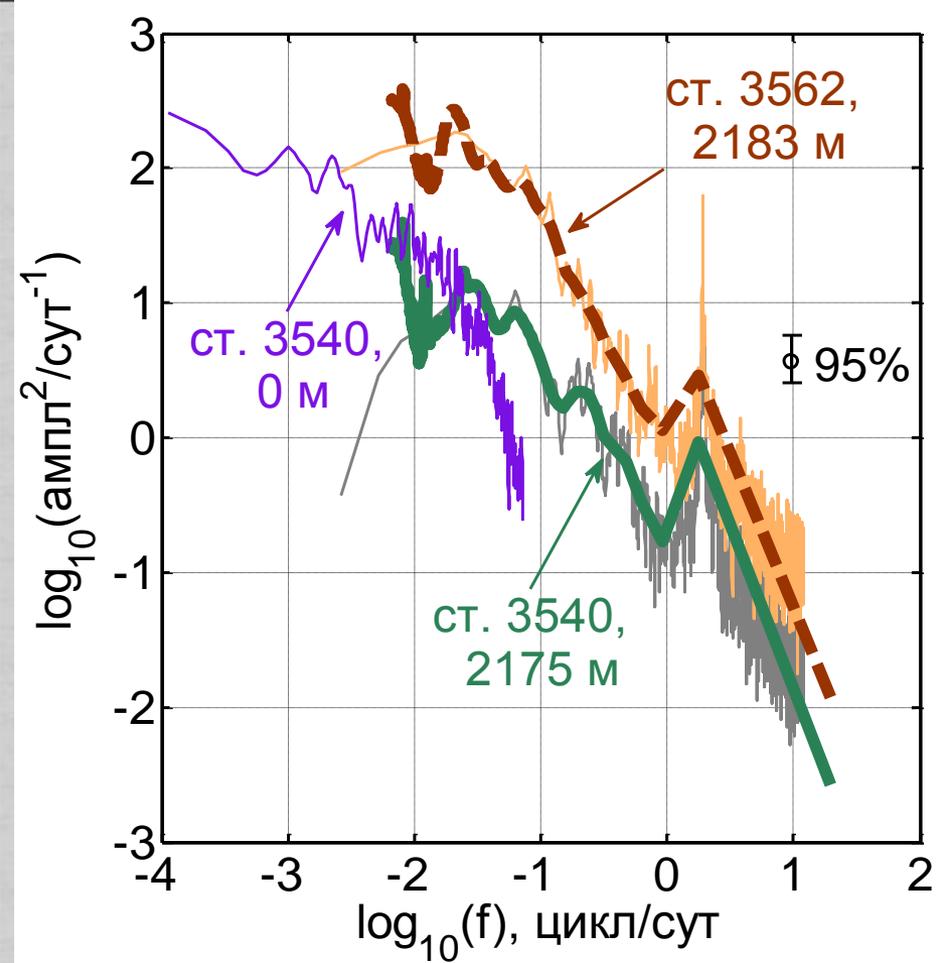
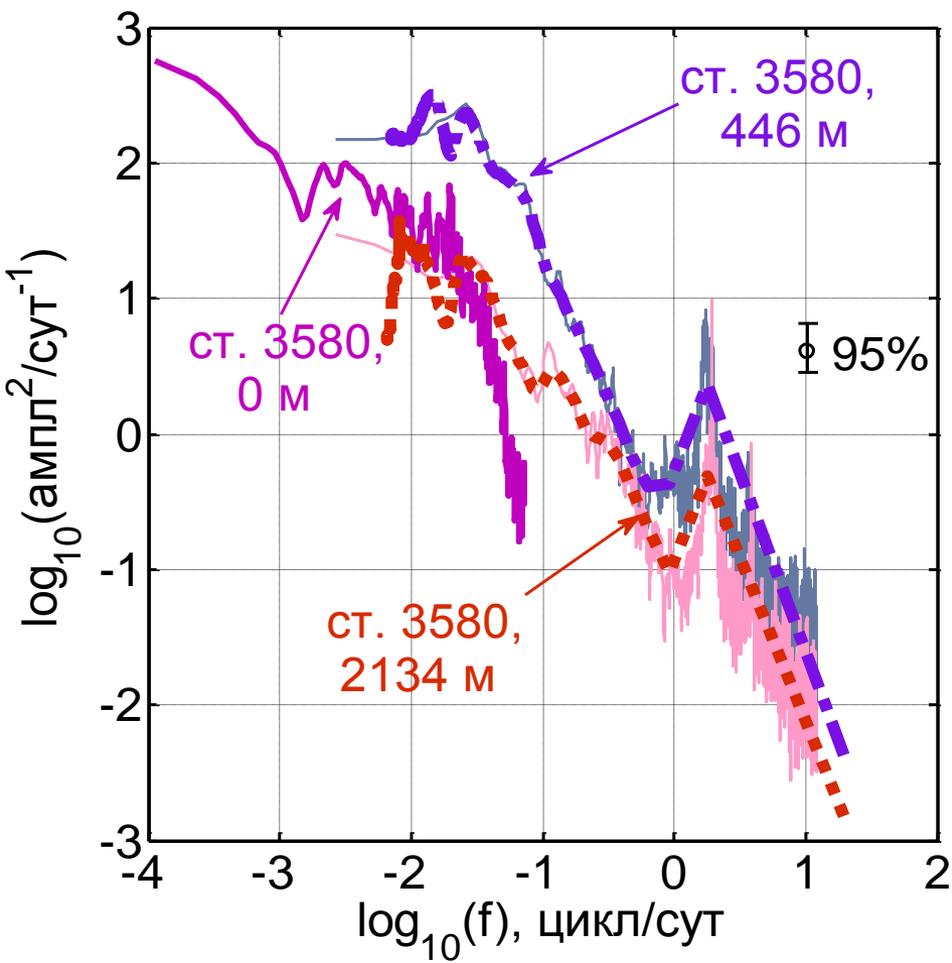
Вэйвлет-диаграмма изменений плотности кинетической энергии на станции 3562, горизонт 2183 м.



Вэйвлет-диаграмма изменений плотности кинетической энергии на ст. ст. 3540, гор. измерений 2175 м.



Прогрессивные векторные диаграммы геострофических течений на поверхности моря по данным AVISO-слева; придонных течений по измерениям *in situ*—справа. Ст. 3580, горизонт 2134 м; ст.3562 - 2183 м; ст. 3540 – 2175 м; глубины моря 2229, 2237, 2229 м, соответственно.



Спектры плотности кинетической энергии течений около дна и на поверхности моря, на станциях 3580, 3562 и 3540. Тонкие линии – Фурье спектры. Утолщённые линии – вэйвлет-плотность.

Полигон над подводной горой Ампер

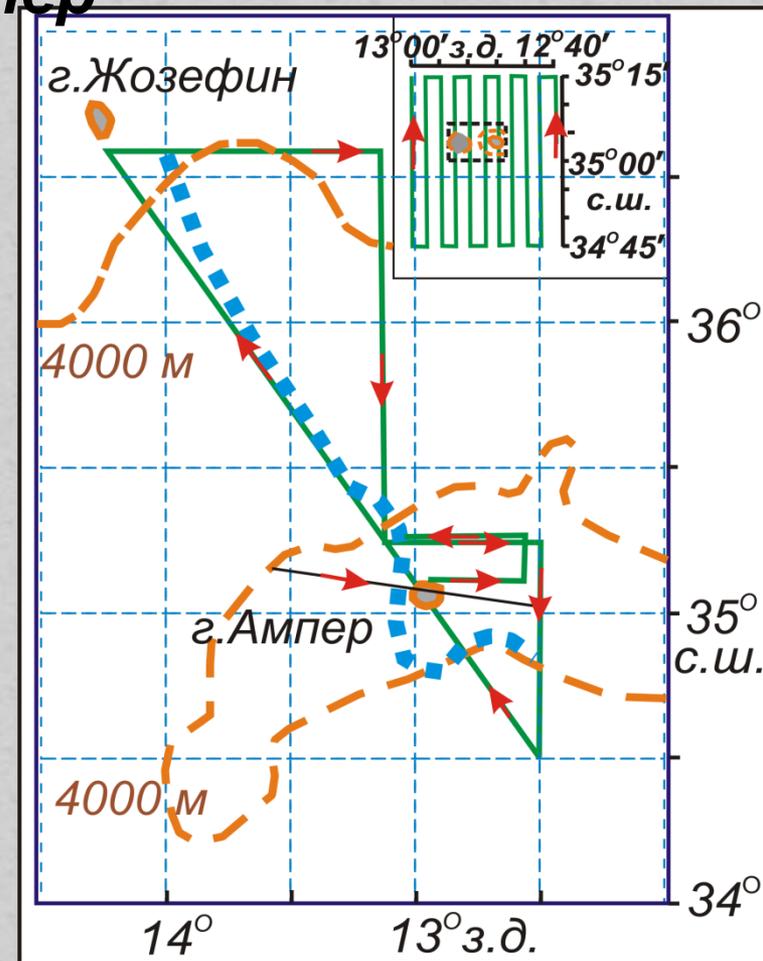
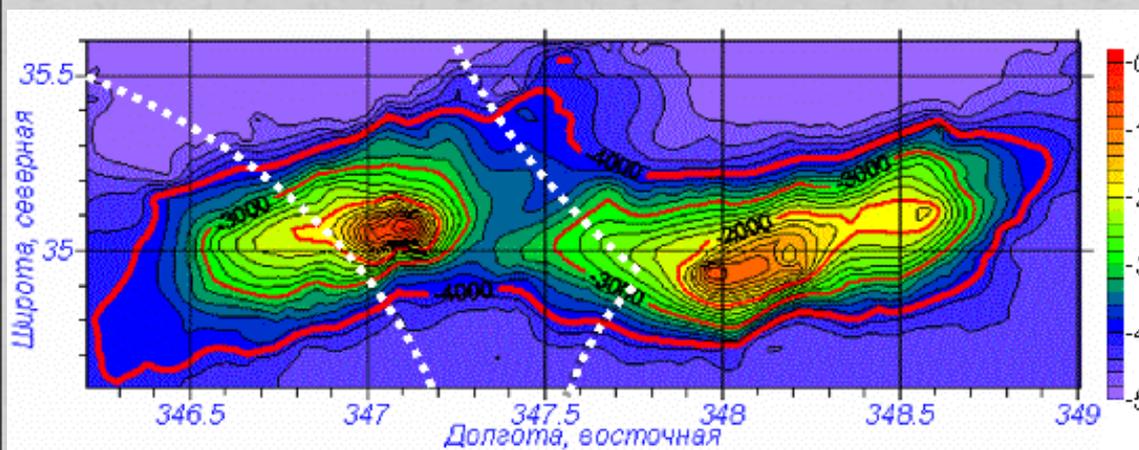
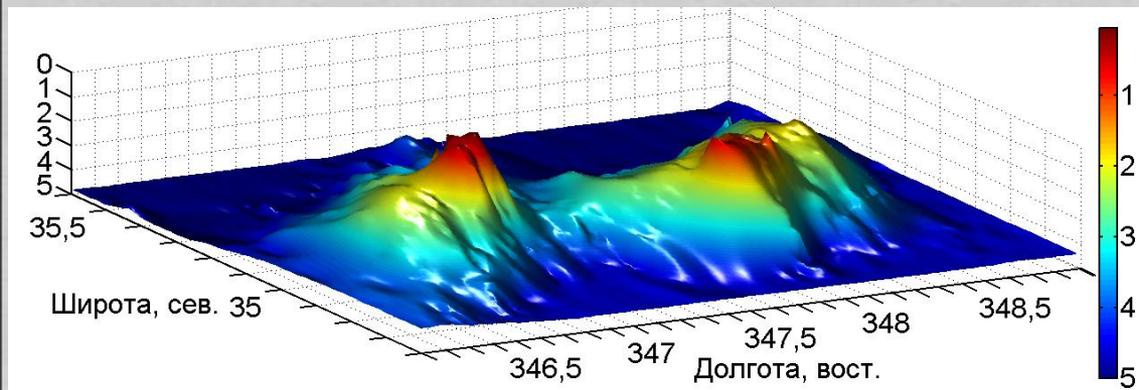
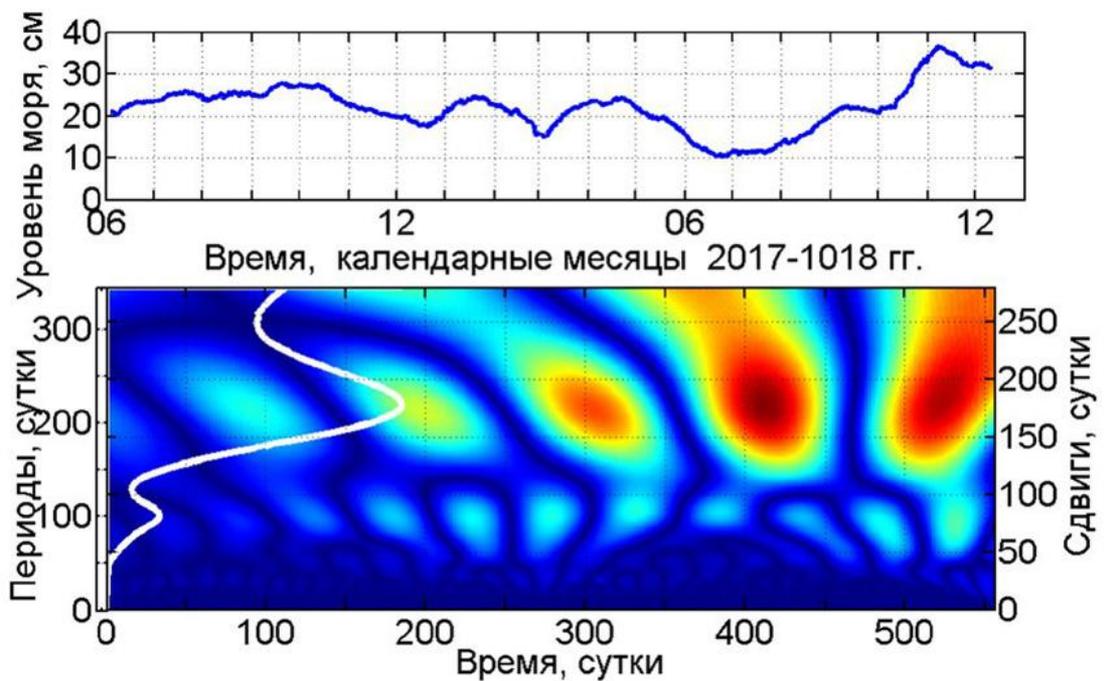
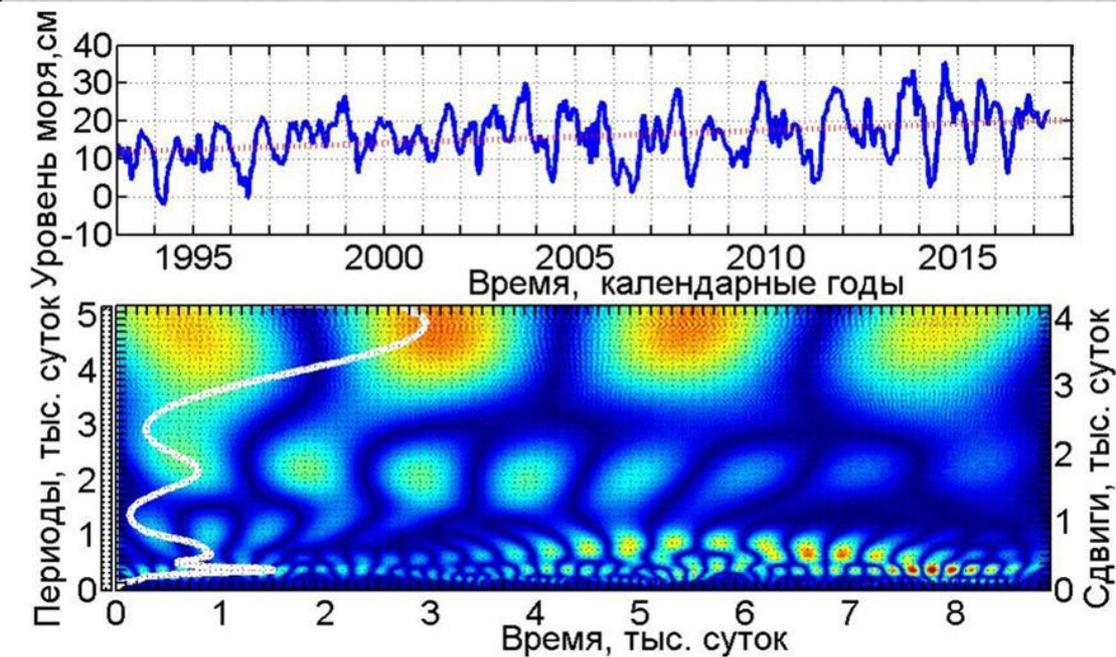
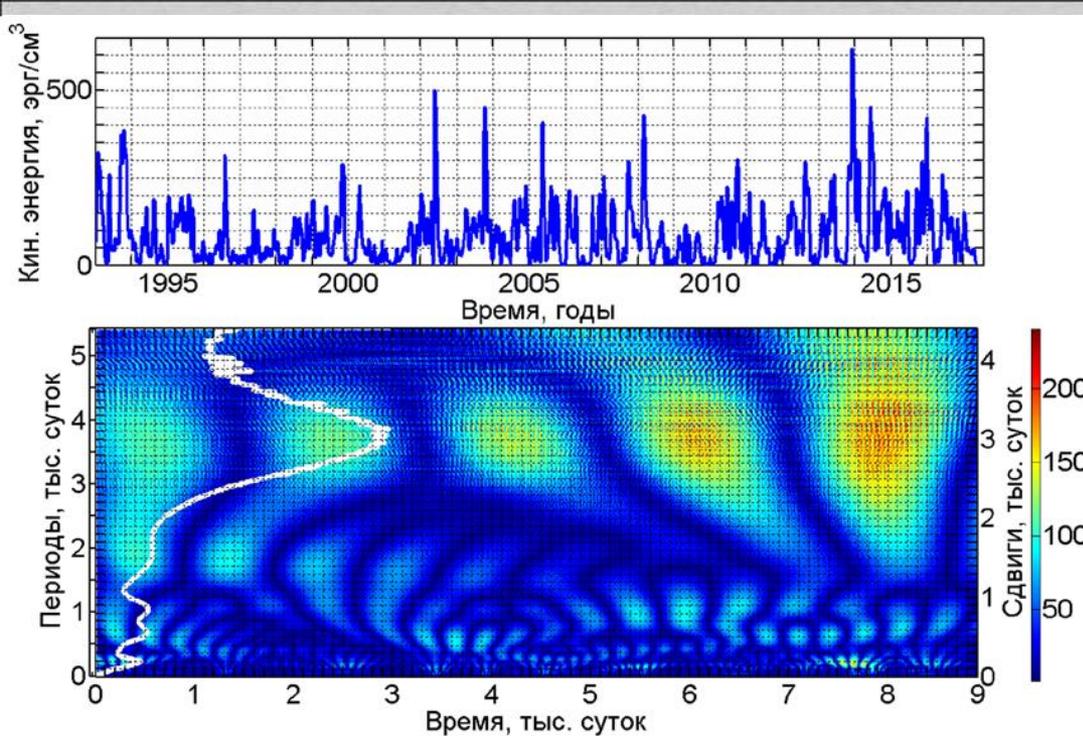


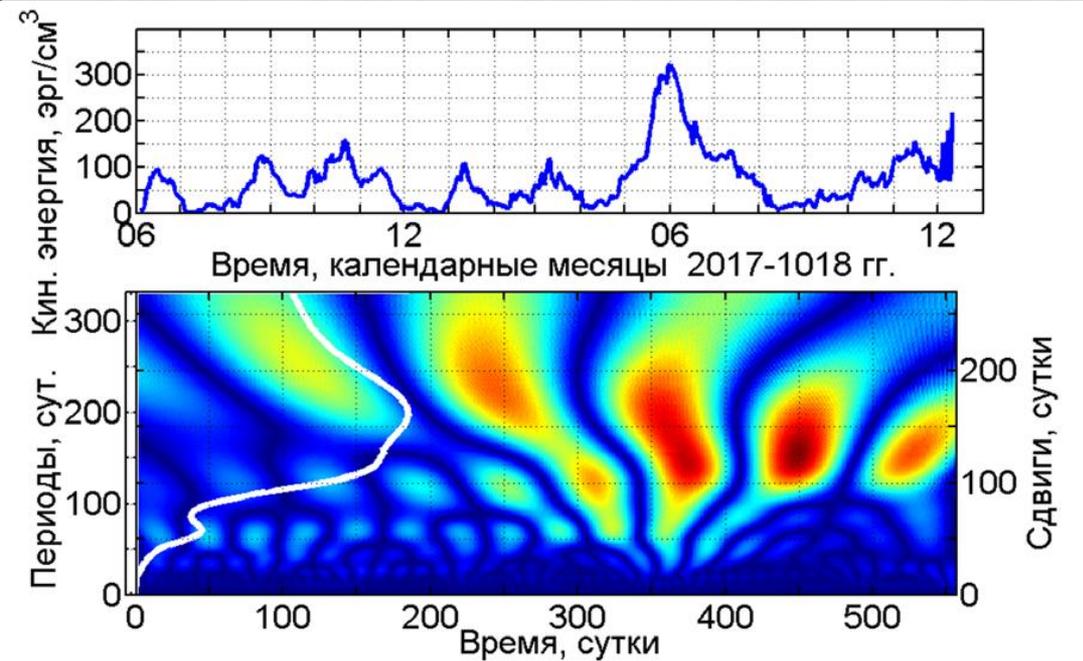
Схема измерительного полигона и топография подводных гор Ампер и Корал-Патч. Изометрический вид – панель вверху; изолинии глубины в метрах – панель внизу. Точечные линии – границы Экономических зон(EEZ) Португалии и Марокко. Справа: на врезке: схема галсов с СТД – измерениями, выполненных с 24 января по 5 февраля 1985 г. вблизи п.г. Ампер. Красные стрелки указывают направление галсов. Положение гидрологического фронта показано синим пунктиром. Пунктирные коричневые линии – изобаты схематичного рельефа дна.

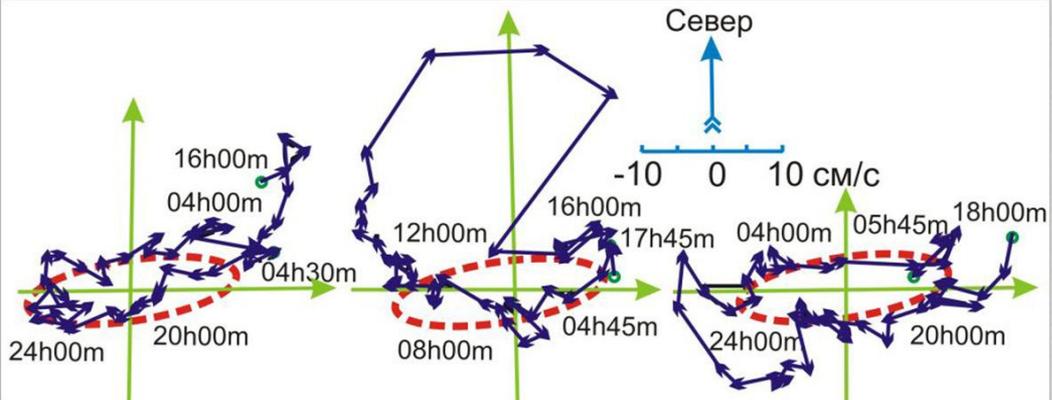
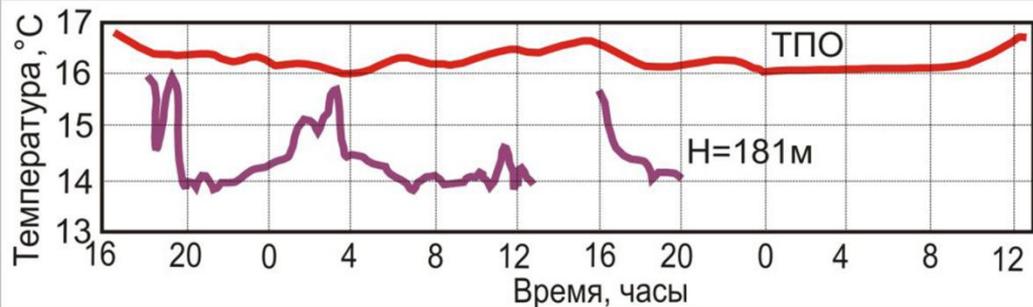


Многолетние вариации аномалий уровня моря и вэйвлет-диаграммы вблизи подводной г. Ампер, в точке 35.1°N , 12.9°W ; в период 1993–2017 гг. – вверху; в период 2017–2018 гг. – внизу. Ядро вэйвлет-преобразования – функция Морле. Красные участки соответствуют высокой вэйвлет-плотности. Светлая кривая – средняя по временному ряду спектральная плотность.



Многолетний ход плотности кинетической энергии геострофических течений на поверхности океана вблизи г. Ампер (точка 35.1°N, 12.9°W), изменения в периоды 1993–2017 гг. (вверху) и 2017–2018 гг. (внизу), верхняя панель и вэйвлет-диаграммы, (нижняя панель).





Температура и течения в термоклине над «малой» вершиной горы Ампер 27–29, января 1985 г. Верхняя панель – ТПО (красная линия) и температура на глубине 181 м. В середине – северная и восточная (пунктир) компоненты скорости течений на глубине 195 м. Внизу: годографы вектора скорости течений. Средний эллипс полусуточных течений представлен красной пунктирной линией. Приведены моменты кульминации Луны. Время GMT.

16h00m, январь, 27 04h45m, январь, 28 18h00m, январь, 28
 04h30m январь, 28. 17h45m, январь, 28. 05h45m, январь, 29.

Полигон над САХ, к юго-востоку от Азорских островов

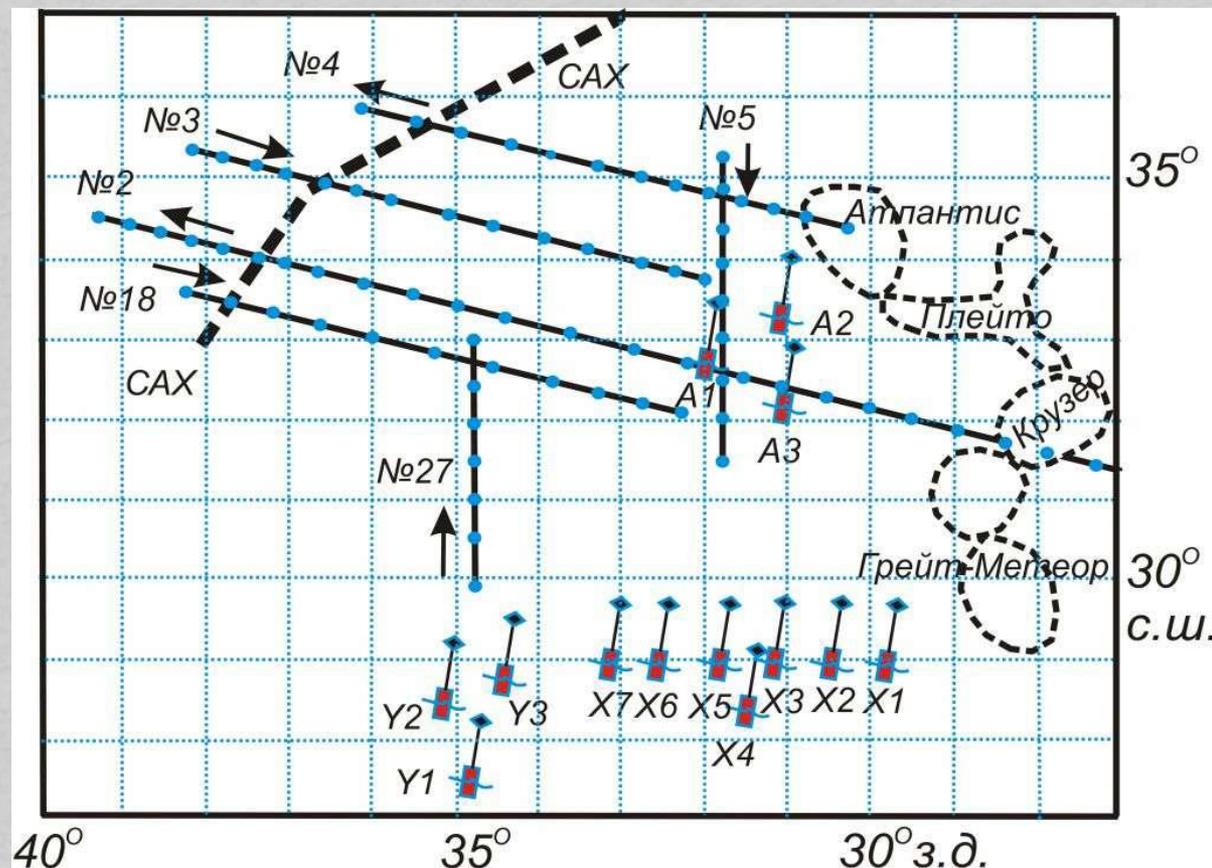
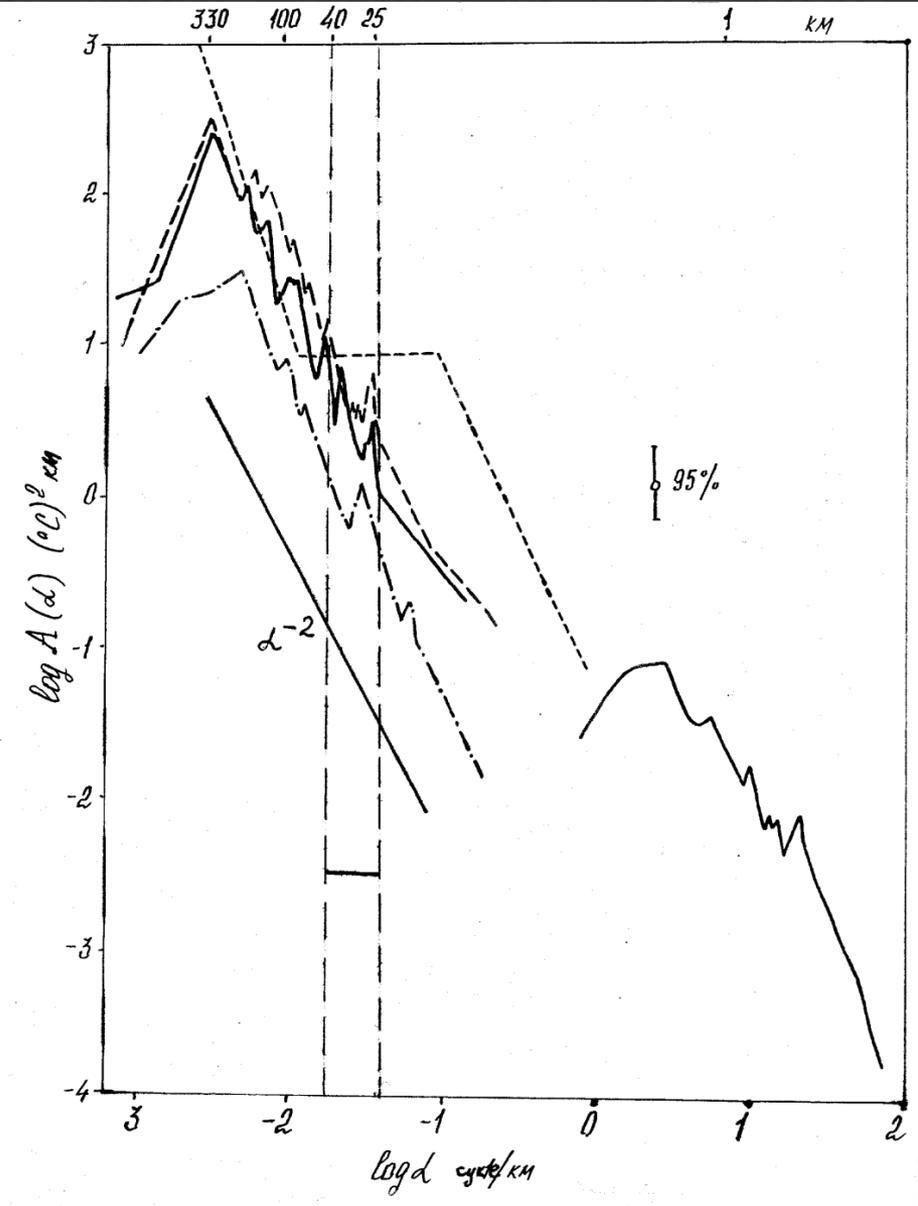
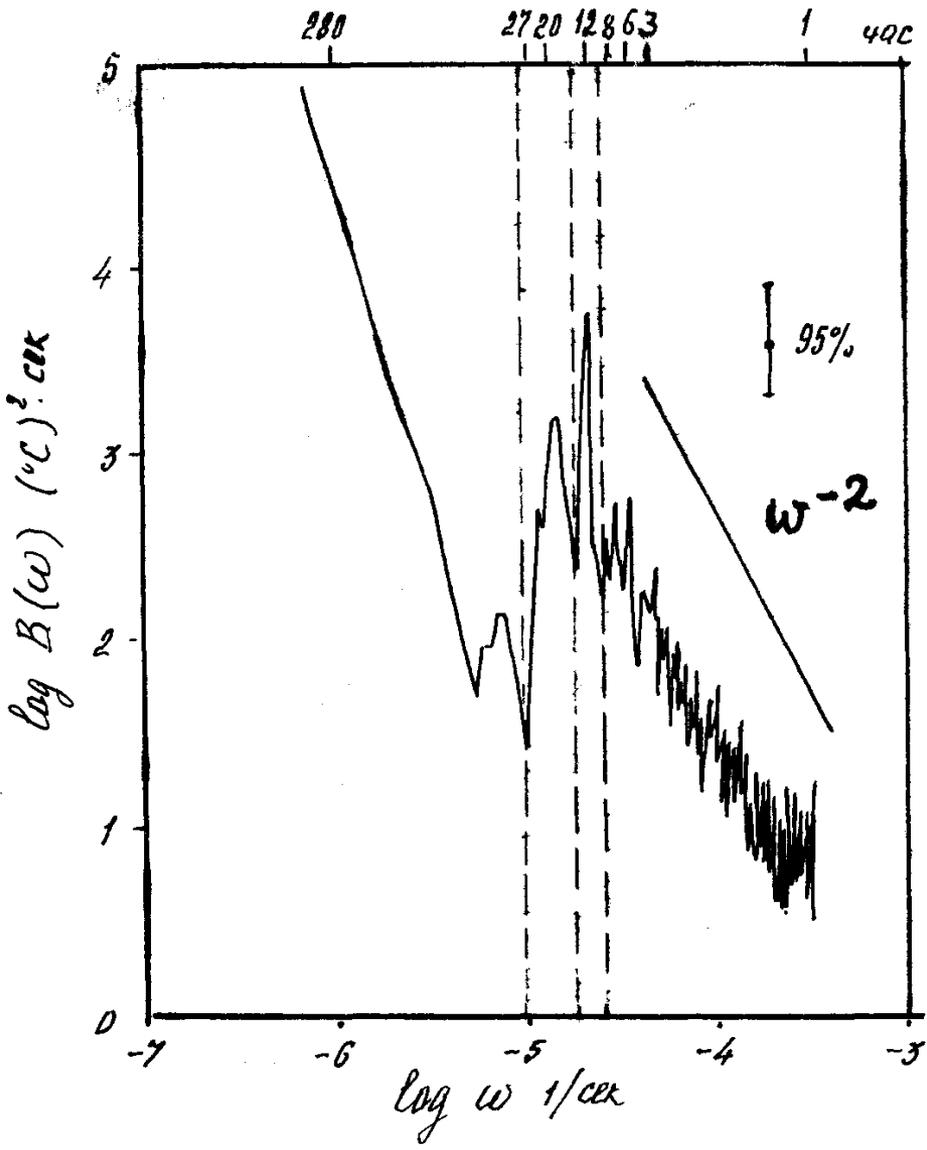
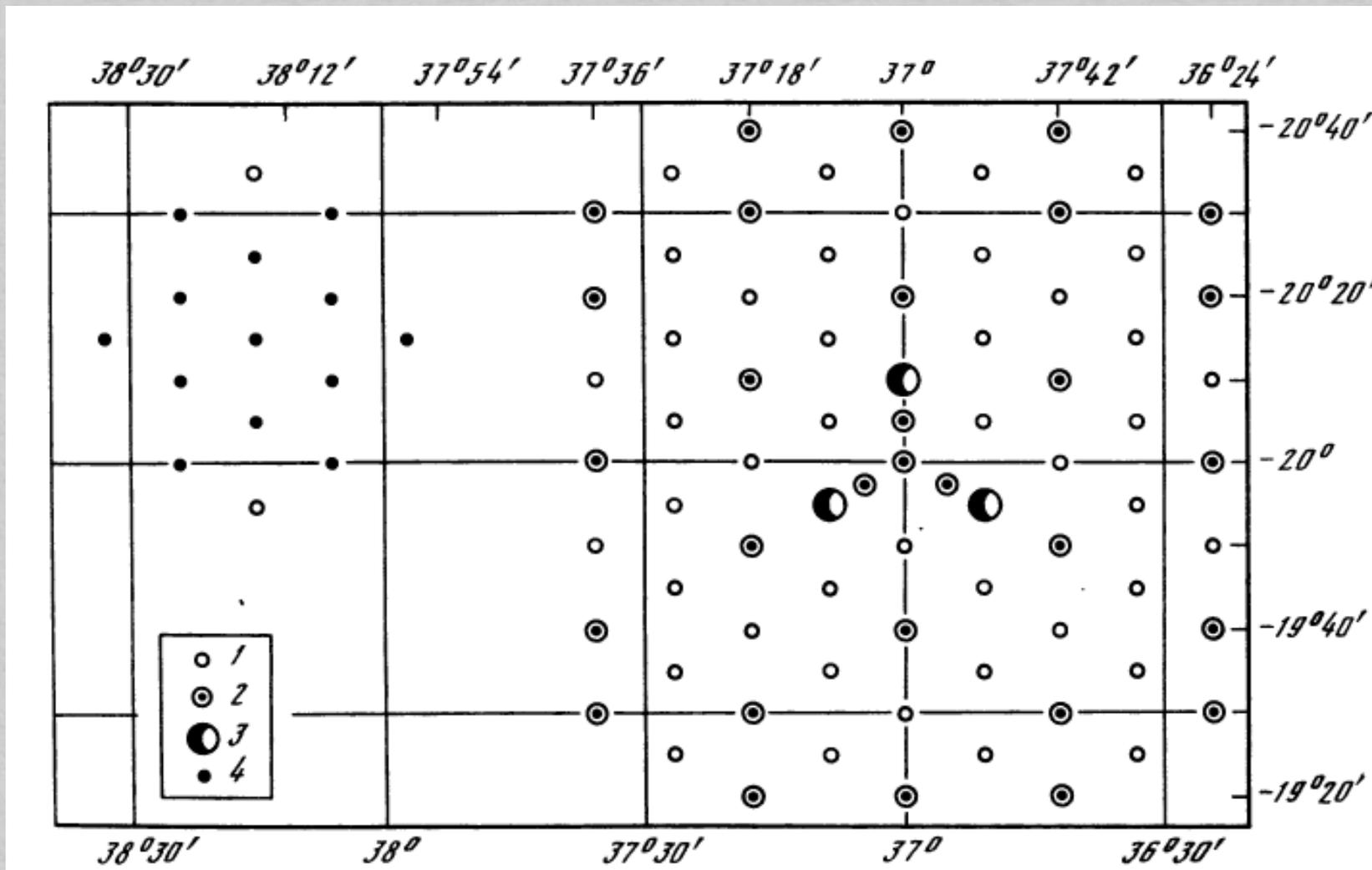


Схема измерительного Полигона в гидрофизической экспедиции Института океанологии РАН, летом 1980 г. Условные обозначения: отрезки прямых линий с точками - галсы с зондированиями верхнего 500-метрового слоя при помощи ТЗО (температурного зонда обрывного). Стрелки - направление движения судна. Значок в виде поплавка с мачтой отмечает положение автономной буйковой станции. Пунктирные линии - ось САХ и схематичное положение крупных подводных гор.

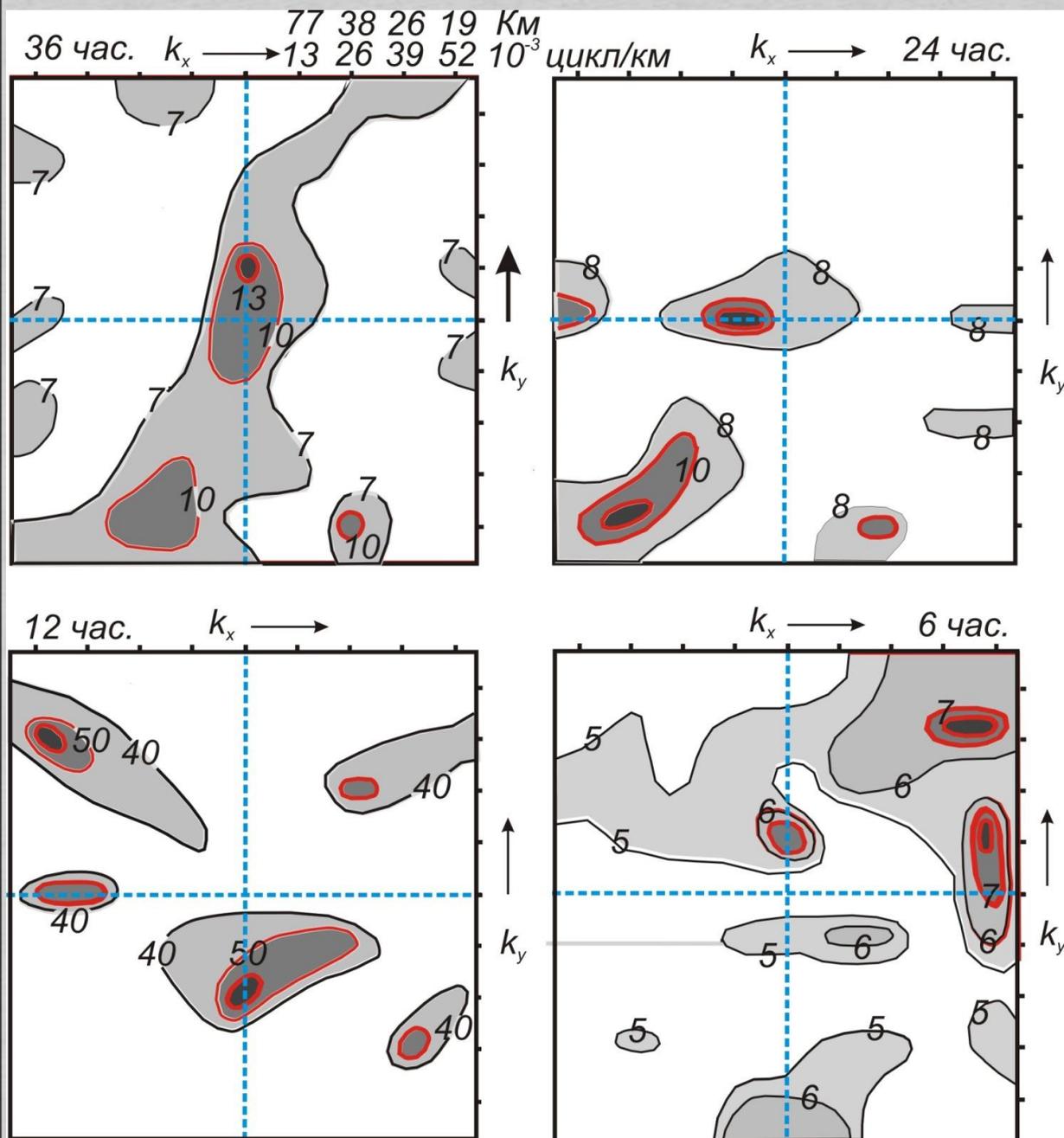


Типичные временные (по данным АБС) и одномерные пространственные автоспектры Фурье колебаний температуры на поверхности моря (по данным разрезов буксируемыми зондами) в районе Мезополигона.

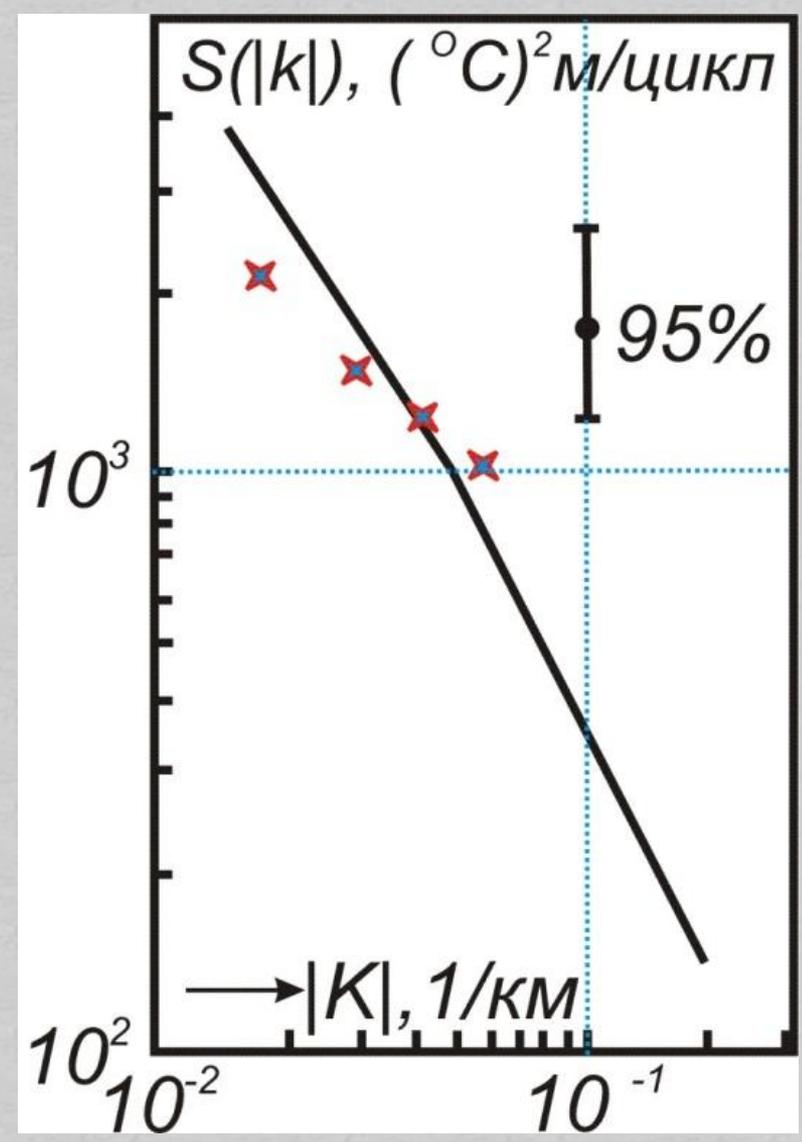
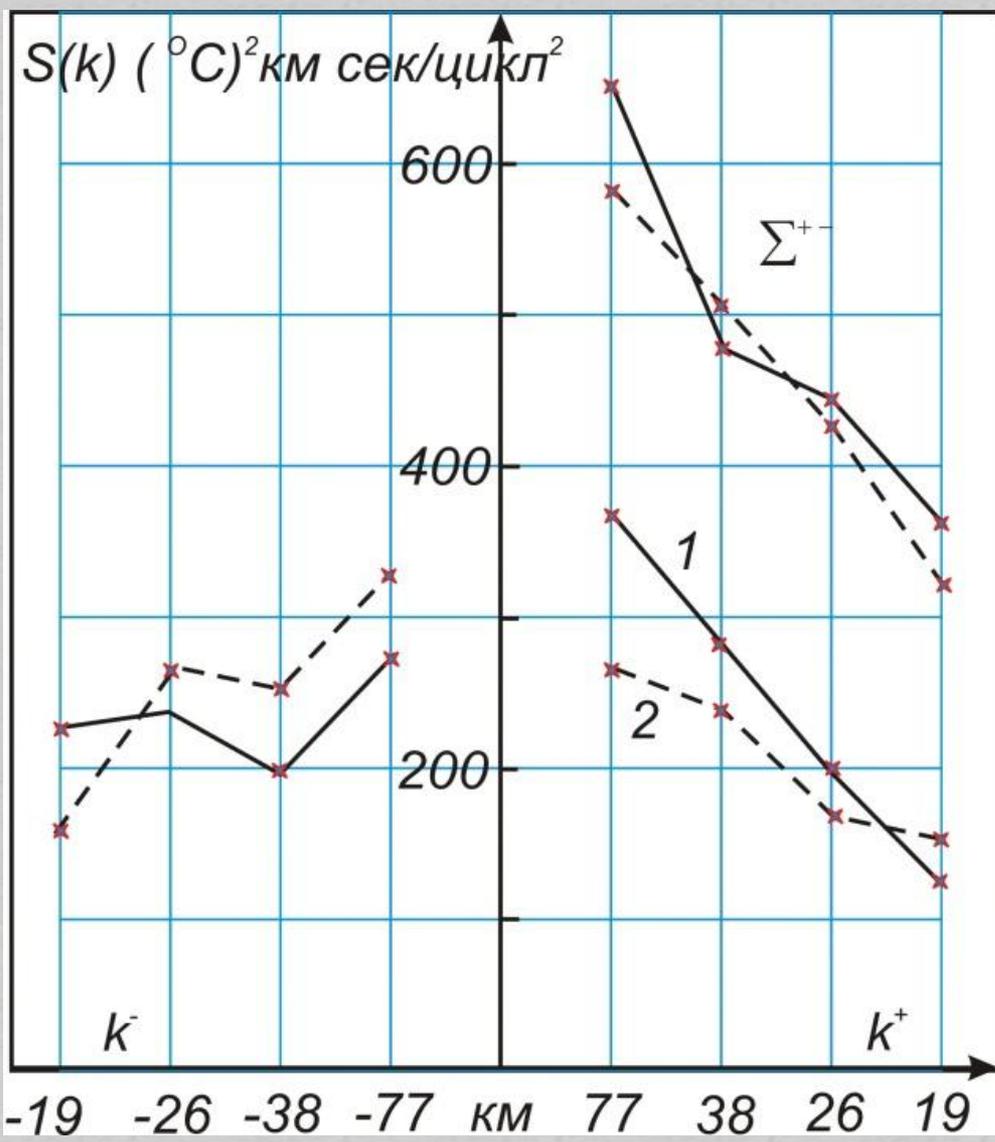
Полигон Мезополигон



Расположение АБС на «Мезополигоне» в период 1985, апрель-май. Полигон №1 – справа, Полигон-№2 – слева. Измерители скорости течений и температуры на горизонтах: 1- 75,200 м; 2- 75,200,600,1200 м; 3- 75,200,1200 м; 4 - 75,200,800,1000,1200,1500 м.

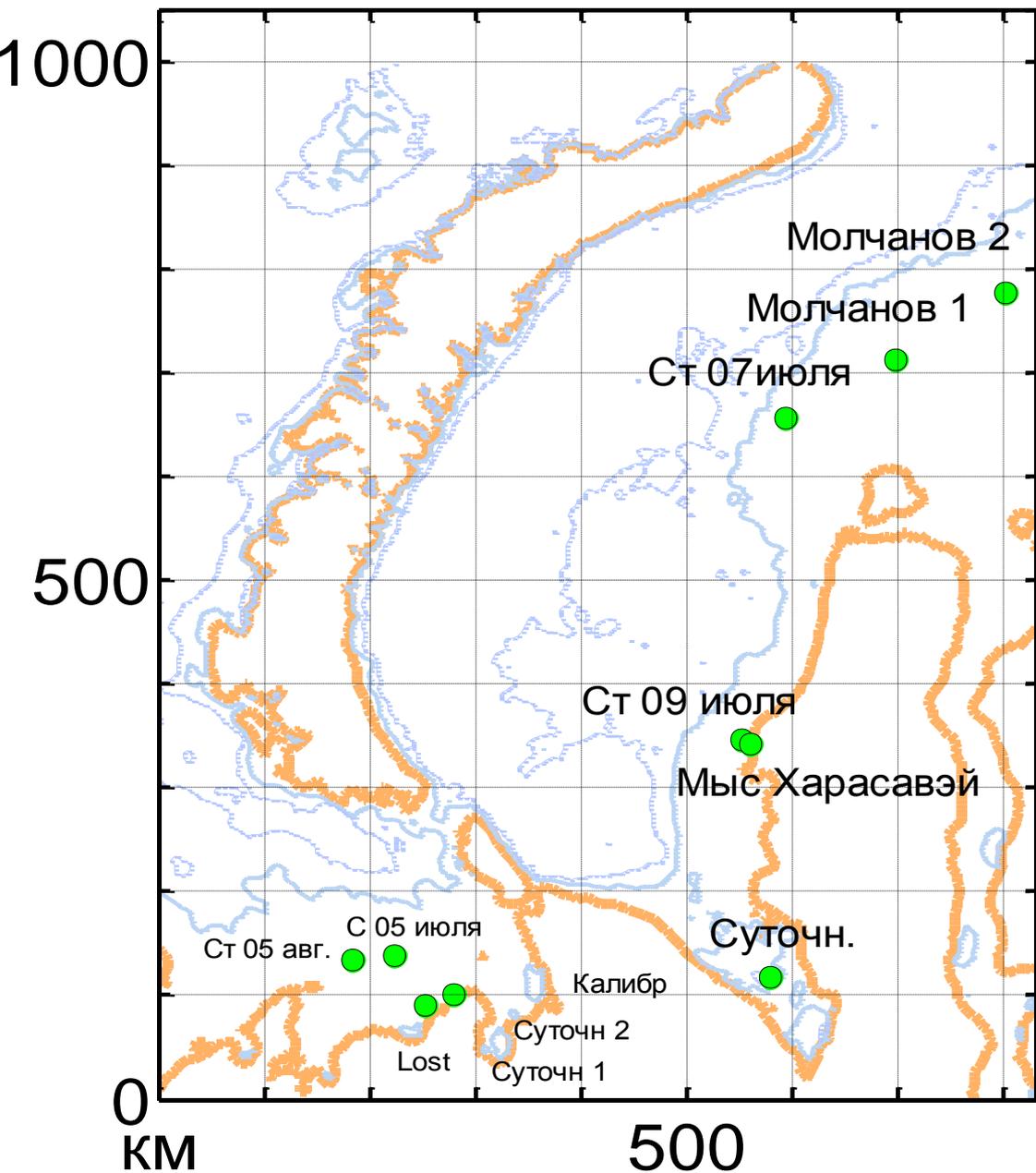


Сечения
 пространственного
 спектра температуры
 воды, на периодах:
 36, 24, 12, 41 и 6 час.,
 горизонт 200 м.



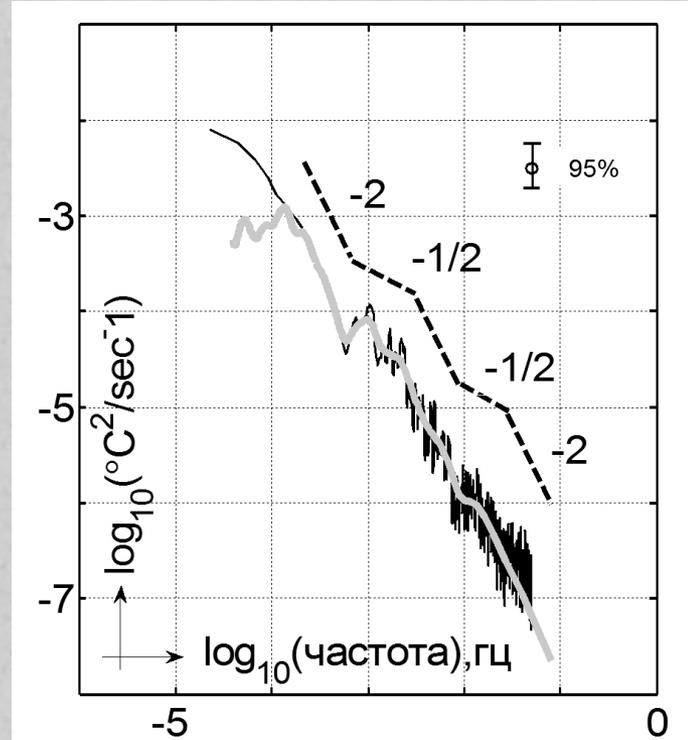
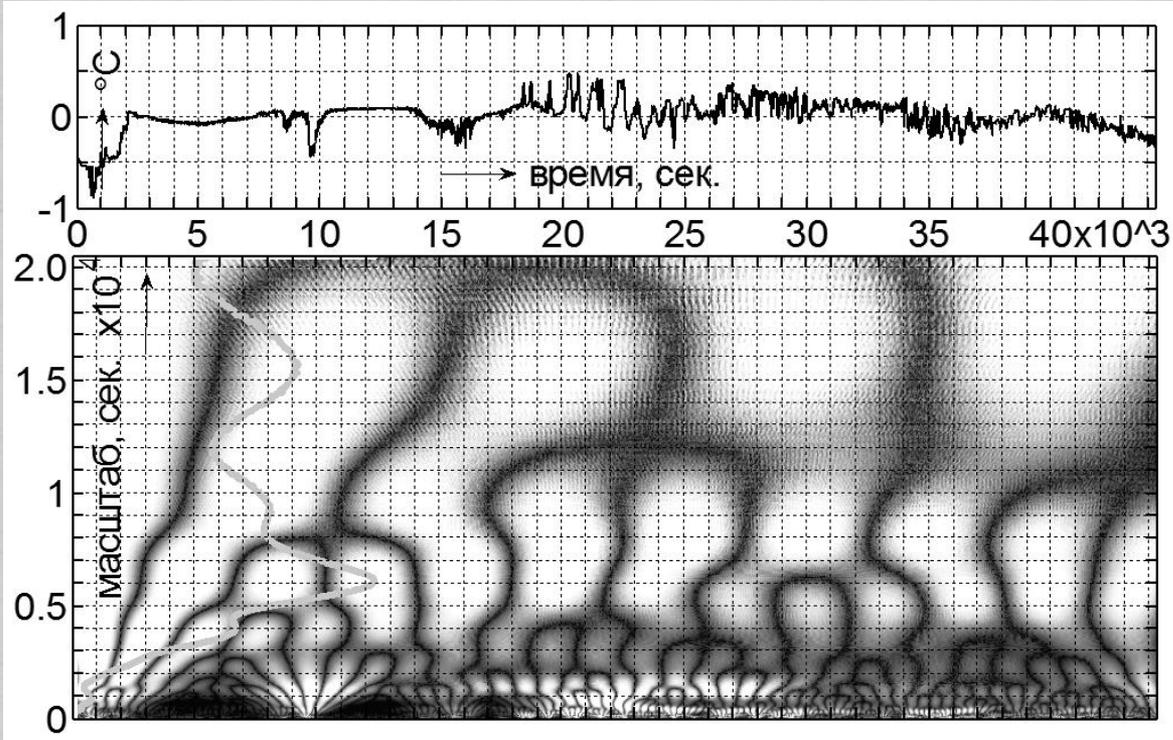
Длинноволновый участок спектра температуры, полученный при буксировке термотрала, и значения (обозначены звездочками) проекции пространственного спектра по данным АБС.

Полигон в Карском море



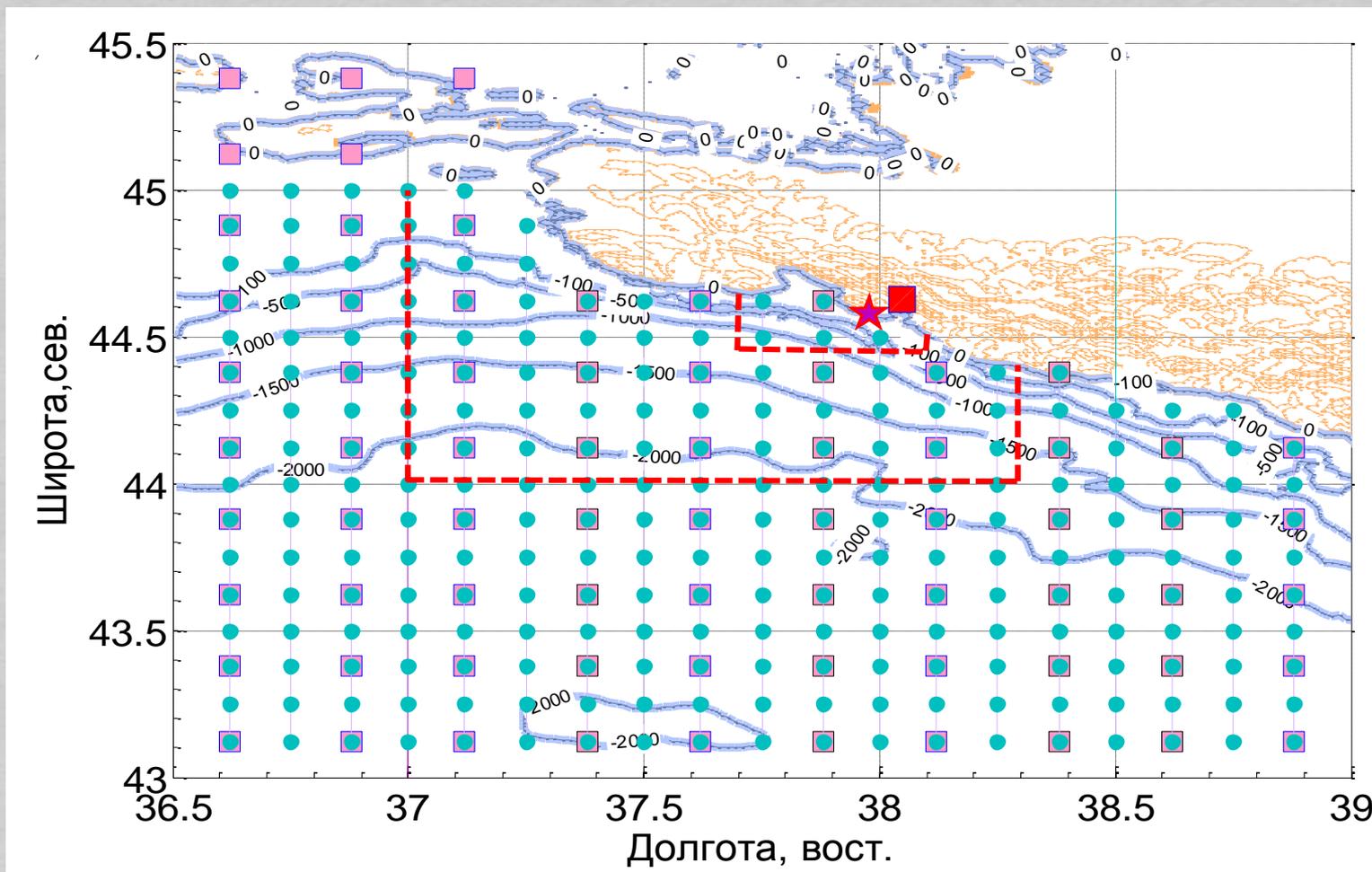
К настоящему моменту в Карском море были проведены ряд экспедиций ГОИН, ИО РАН, ААНИИ по фундаментальным и прикладным задачам. Главными результатами работ были выяснение гидрологической структуры, динамики вод и фронтальных зон Карского моря; процесса распространения стоков Оби и Енисея и формирования линз опреснённых вод, водообмена между Карским и Арктическим бассейнами. О сезонной и долговременной изменчивости гидрофизических полей известно немного.

Измерительные станции в Баренцевом и Карском морях летом 2012 г.



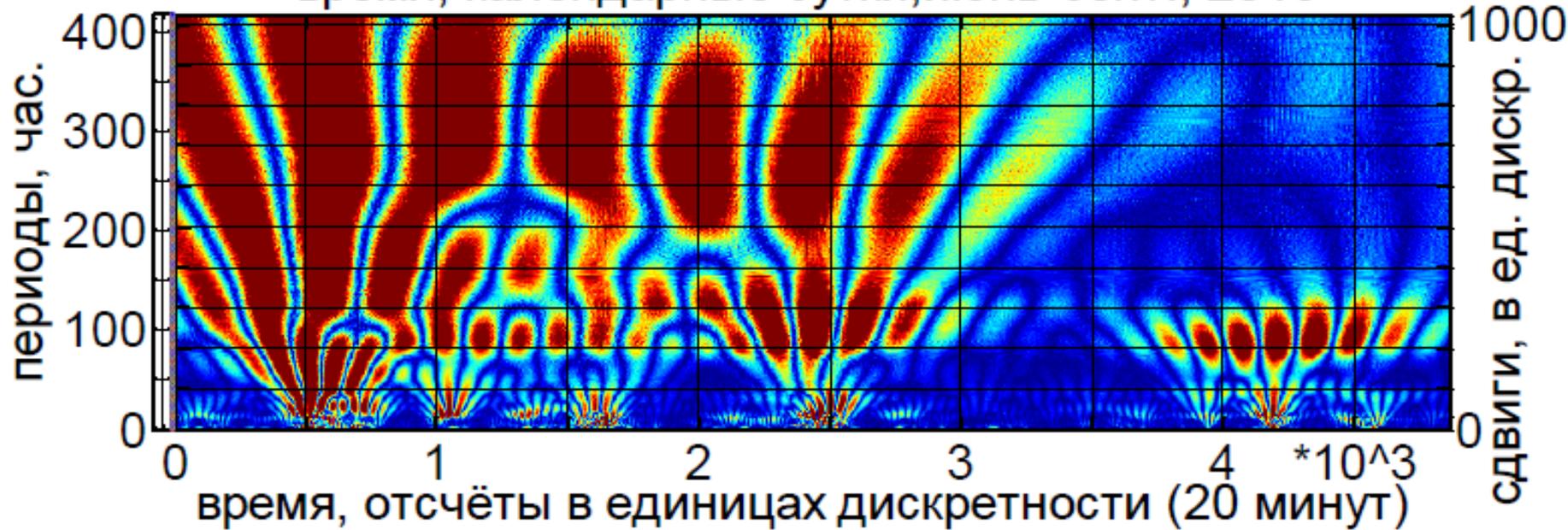
Сравнение вэйвлет и Фурье спектров изменений температуры на суточной гидрологической станции в Баренцевом море. Верхняя панель — реализация, временной ход температуры воды. Нижняя панель — вэйвлет плотность. Справа: спектр Фурье — тёмная сплошная кривая; вэйвлет спектр — светлая сплошная; пунктирные линии и цифры около них показывают наклоны участков спектра.

Черноморский полигон ИО РАН

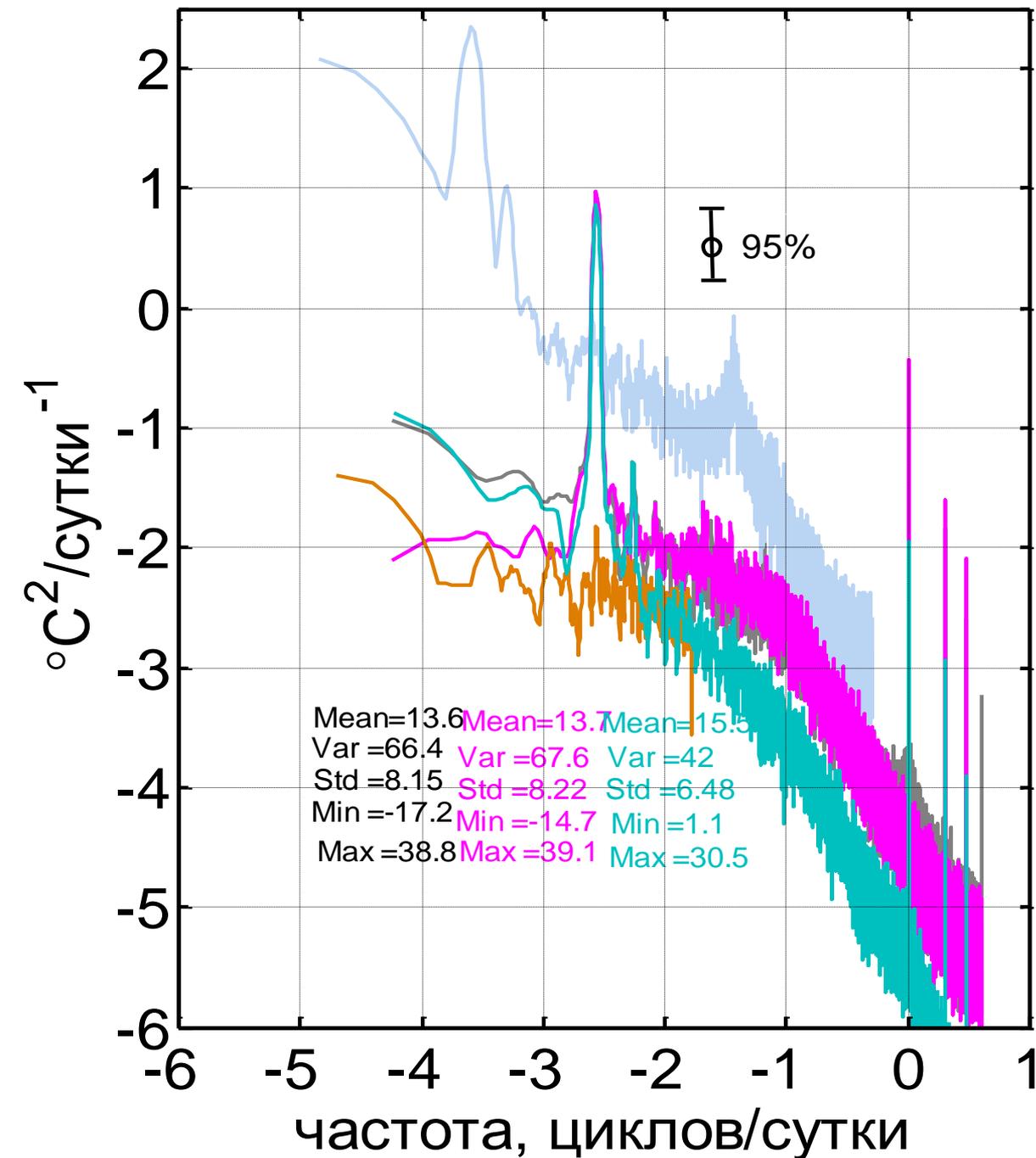


Гидрофизический полигон в северо-восточной части Черного моря.

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.

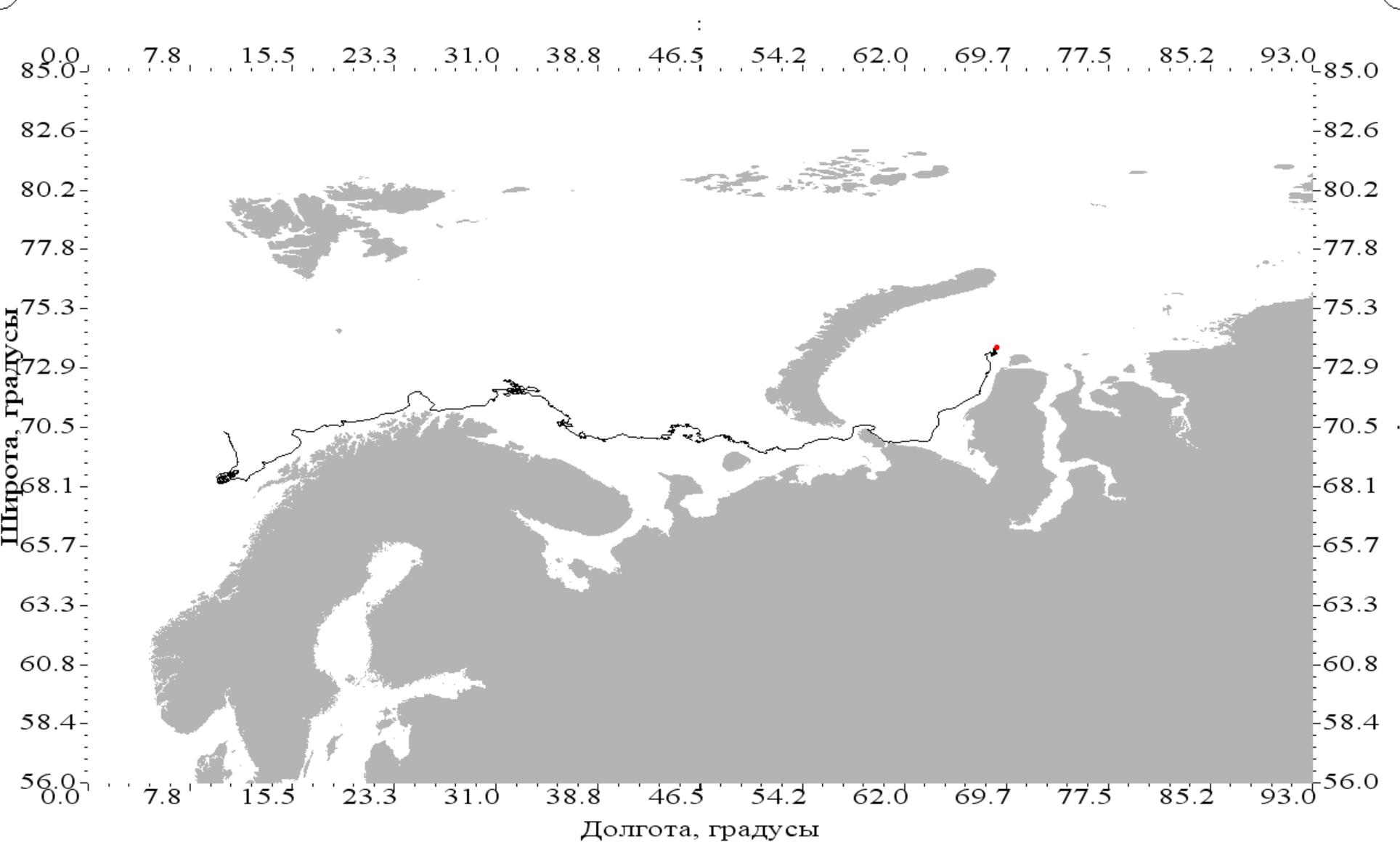


Вэйвлет-диаграмма плотности горизонтальной кинетической энергии течений в верхнем слое (горизонт 19,5 м, (глубина 100 м) на акватории вблизи Голубой бухты. Дискретность измерений – 20 мин.

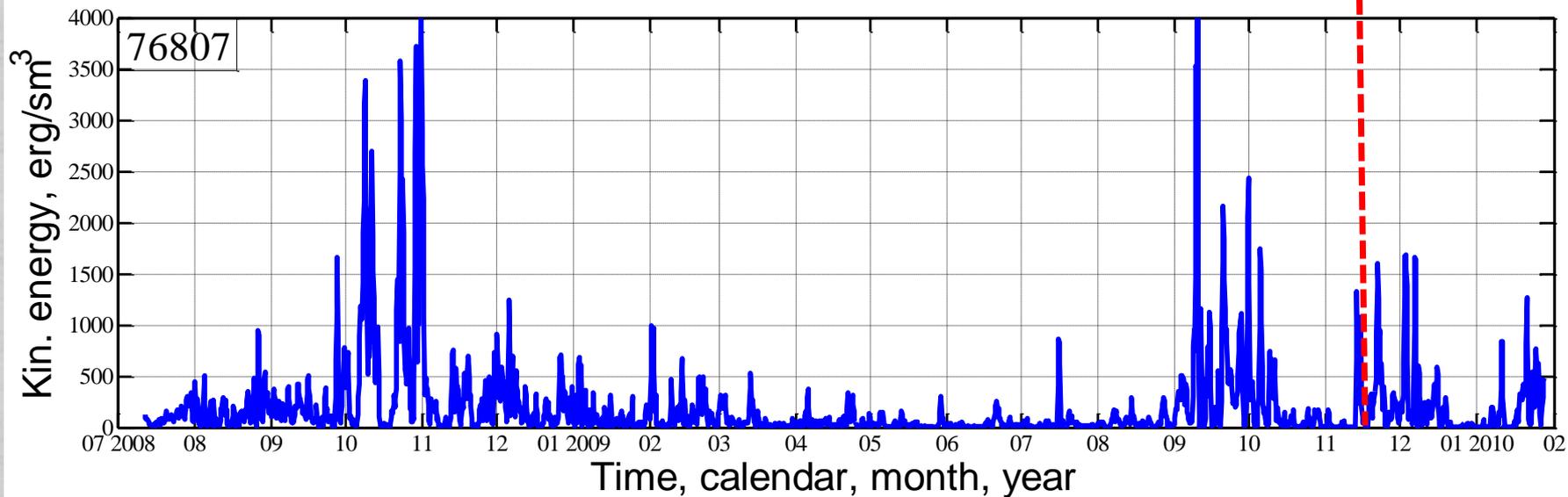
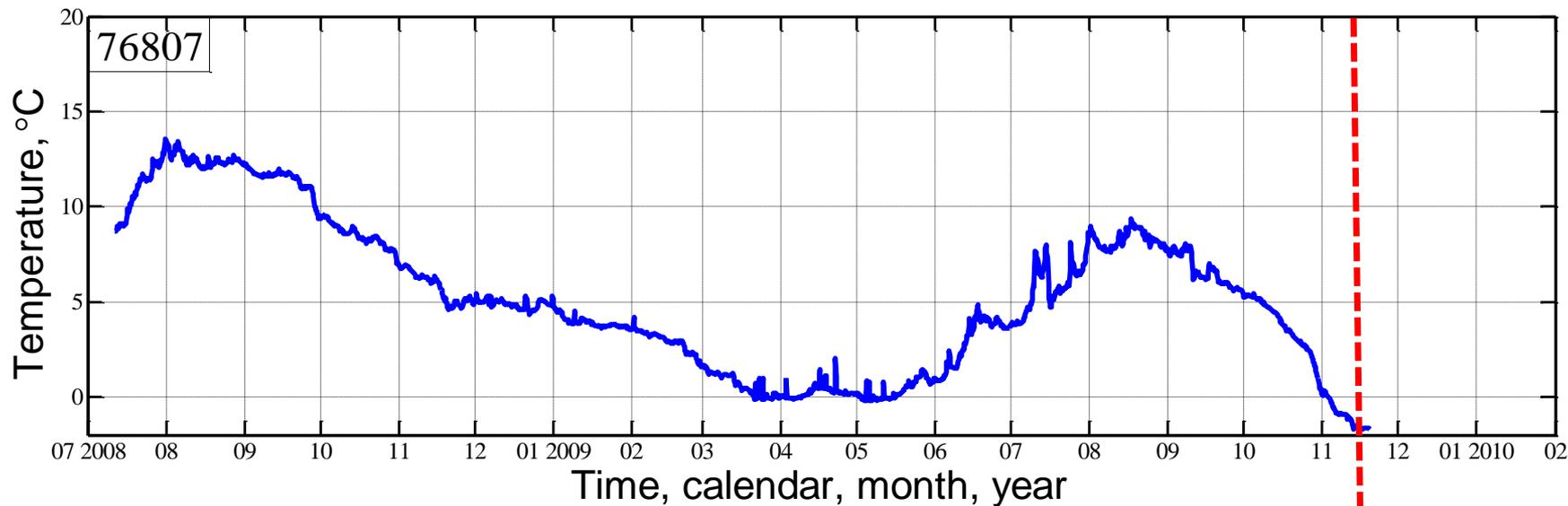


Спектральные плотности (Фурье), нормированные на дисперсию ряда:

1. серый цвет – температура воздуха на метеост. Геленджика, измерения по срокам .
2. розовый – модель временного ряда колебаний температуры воздуха.
3. зелёный – температура воды, суточные значения (метеост. Геленджика.)
4. коричневый – индекс NAO (1853-2012 гг., ежемес.)
5. голубой – числа Вольфа (1640-2012 гг., дискр. 10 сут.).

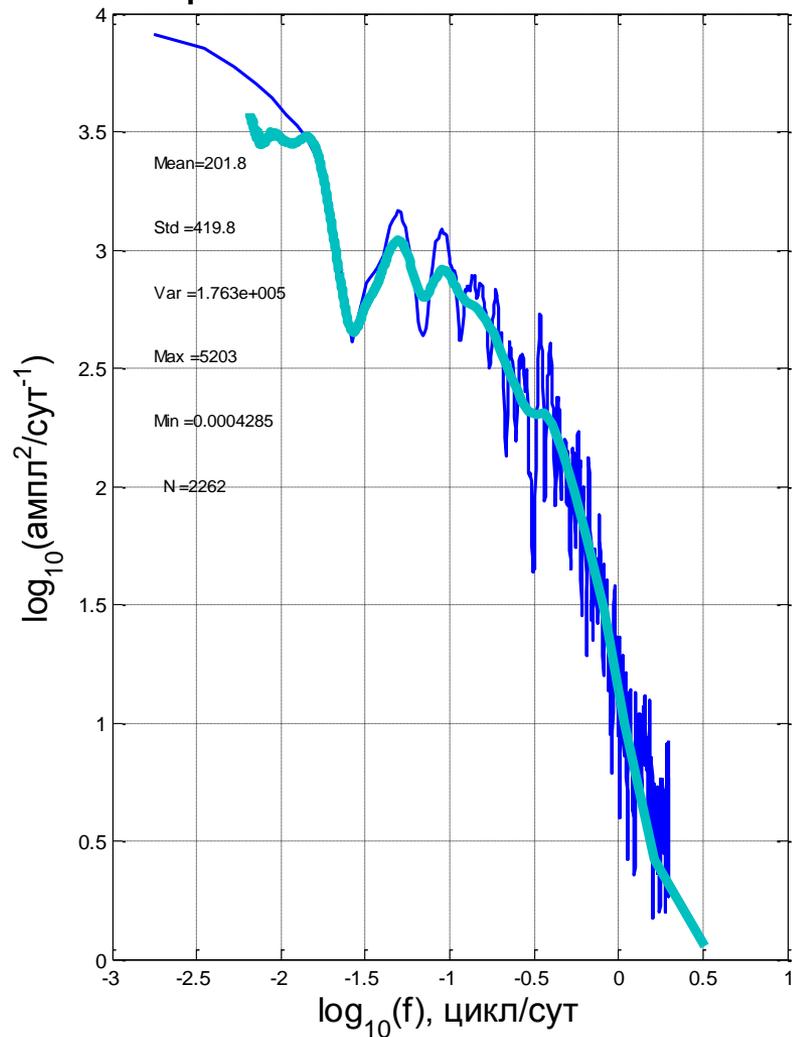


Траектория дрейфтера ARGO(s) # 76807.
Автор: Никитин О.П.

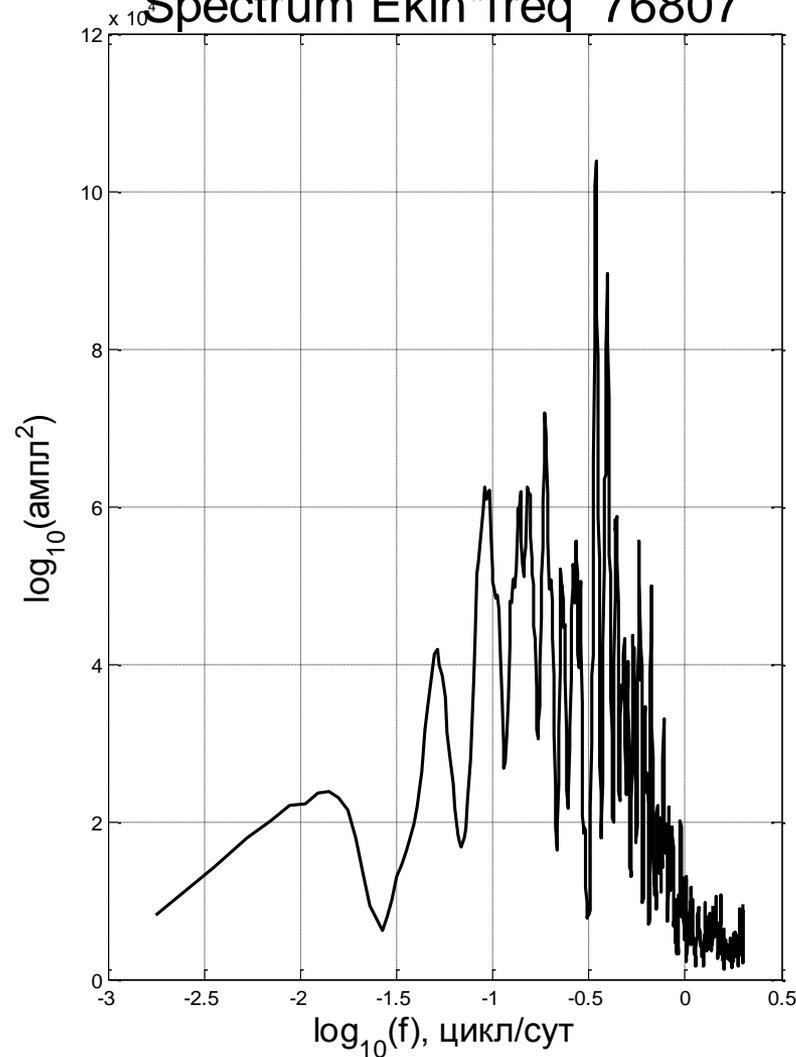


Температура поверхности воды (верхняя панель) и плотность кинетической энергии (нижняя панель) буйка № 76807. Красная пунктирная линия обозначает время отрыва паруса.

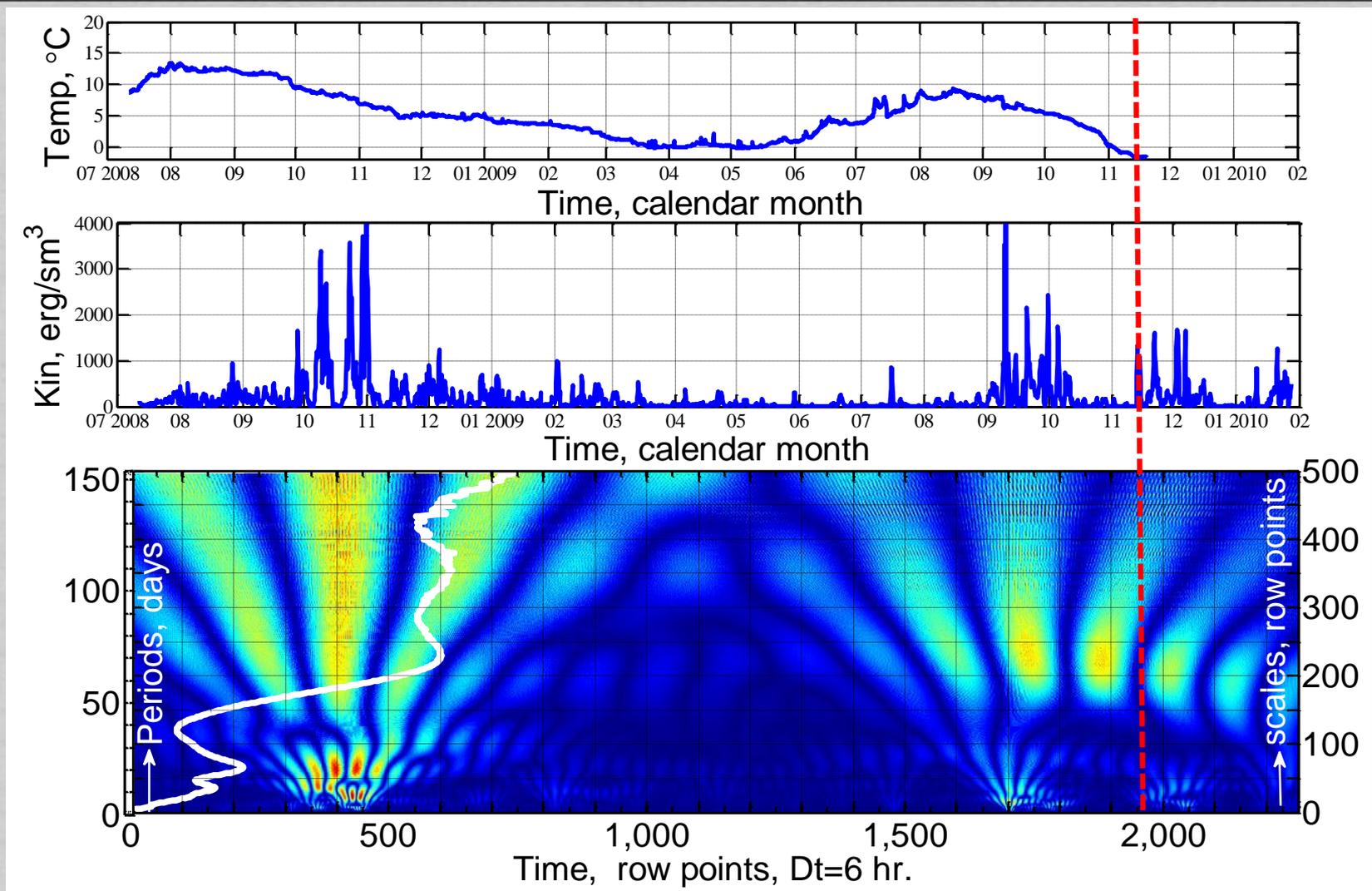
Spectrum Ekin 76807



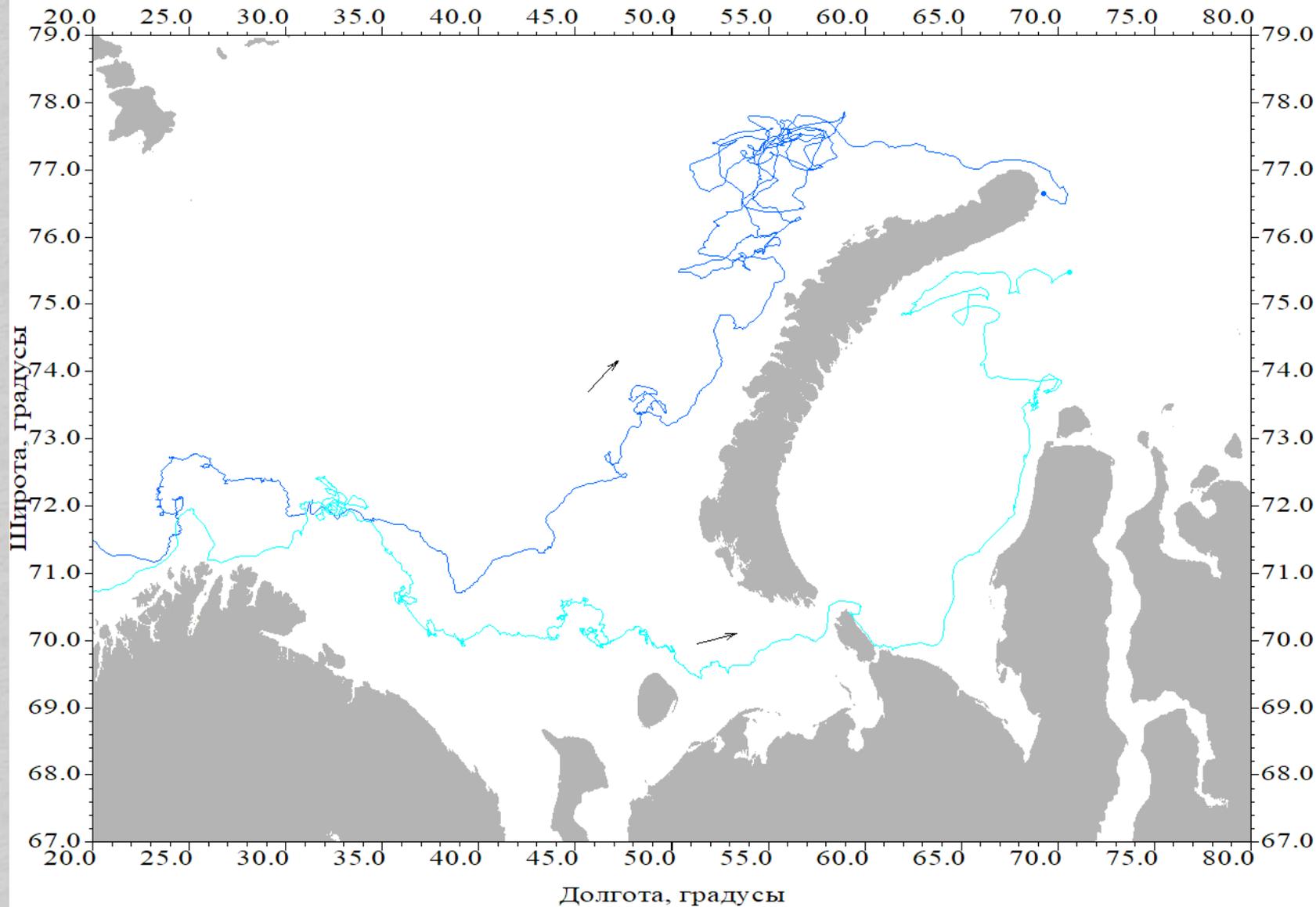
Spectrum Ekin*freq 76807



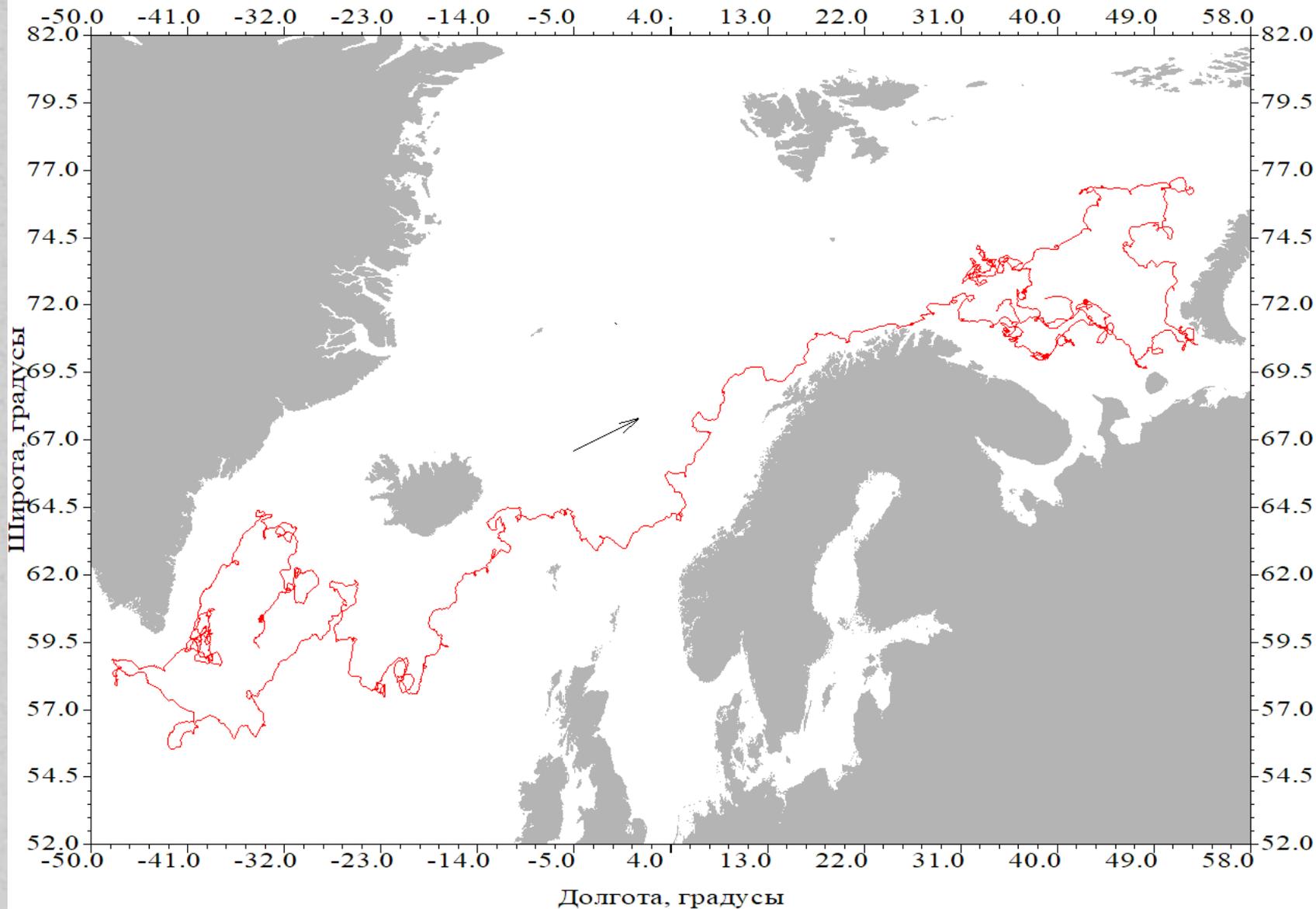
Спектральная плотность Фурье плотности кинетической энергии (слева) и спектр дисперсии плотности кинетической энергии (справа) буйка № 76807. Светлая зелёная кривая- спектр вэйвлет- плотности, проинтегрированной по времени.



Ход температуры поверхности воды (верхняя панель), плотности кин. энергии (средняя панель), вэйвлет- плотность кин. энергии (нижняя панель) буйка № 76807. Светлая линия- спектр вэйвлет- плотности, проинтегрированной по времени. Красная пунктирная линия обозначает время отрыва паруса.



Траектории дрейфтеров ARGOS(s) ## 76807 & 46280.
Автор: Никитин О.П.



Траектории дрейфтера ARGOS(s) #83427. Автор: Никитин О.П.

Эвристическое рассуждение о структуре временных спектров.

Авторегрессия первого порядка и спадание спектра(красный шум).

Для объяснения спада спектра по закону $S_T \sim f^{-2}$, рассмотрим простую модель формирования флуктуаций температуры в воде. Красный шум описывается моделью авторегрессии первого порядка (Марковский процесс):

$$X_n - \mu = \alpha(X_{n-1} - \mu) + Z_n,$$

где Z_n - некоррелированный белый шум с дисперсией σ_Z^2 , корреляционной функцией $\gamma(u)$: $\gamma(u) = \sigma_Z^2 \alpha^{|u|}$ где $\delta(u)$ - δ -функция. Коэффициент авторегрессии α характеризует релаксацию процесса и подбирается эмпирически, например, методом наименьших квадратов. Соответствующий спектр мощности P_k :

$$P_k = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}$$

где $k = 0 \dots N/2$ - индекс частот $f_k = 2\pi k / (N\delta t)$.

Процессу авторегрессии первого порядка соответствует уравнение:

$TX'(t) + (X(t) - \mu) = Z(t)$, с функцией отклика $h(u) = e^{-u/T}$, $0 \leq u < \infty$, $h(u) = 0$, $u < 0$; и спектром мощности:

$$P_{XX} = \frac{\sigma_Z^2}{1 + \left(\frac{2\pi f T}{1}\right)^2}$$

$-\infty \leq f \leq \infty$. В частности, рассматривая упрощённые уравнения баланса тепла на границе раздела атмосфера-океан, можно показать, что:

$$\rho c_p (\theta_t + \mathbf{U} \cdot \nabla \theta) = \text{div}(\mathbf{Q} + \mathbf{I}_R),$$

где c_p - теплоёмкость при постоянном давлении, θ - потенциальная температура, Q - поток тепла, I_R - объёмный источник тепла вследствие потока солнечной радиации, U - скорость течений. Это уравнение, без учёта адвекции, можно привести к виду :

$$\tau T_t - \lambda^2 \nabla^2 T + T = F(r, t),$$

где $\tau = C/B$, временной масштаб релаксации системы, C - локальная теплоёмкость, D - термическая диффузия, B – коэффициент отдачи тепла в окружающую среду, $\lambda = (D/B)^{1/2}$ - горизонтальный масштаб, $F(r, t)$ – внешний источник тепла, который может включать периодические компоненты (сезонные, суточные), связанные с солнечным прогревом и случайные потоки тепла. Физический смысл процесса следует из фундаментального решения

$$T(r, t) = (\tau/4t) \exp(-r^2 \tau/4\lambda^2 t - t/\tau), \text{ где } r = xi + yj, |r| = r.$$

Тепло, после точечного впрыска (например, в результате потери энергии фотоном) распространяется на расстояние λ за время релаксации τ .

Вводя преобразование Фурье для T и F :

$$T(r, t) = \int \hat{T}(\omega, k) e^{ikr - \omega t} dk d\omega \quad ;$$

$$F(r, t) = \int \hat{F}(\omega, k) e^{ikr - \omega t} dk d\omega \quad ;$$

где $\omega = 2\pi/T$, $|k| = 2\pi/L$, $\omega, |k|$, - частота и волновое число, получим спектр мощности из преобразования Фурье уравнения теплопроводности :

$$P(\omega, k) = \langle |\hat{T}(\omega, k)|^2 \rangle = \langle |\hat{F}(\omega, k)|^2 \rangle / (\tau^2 \omega^2 + (\lambda^2 k^2 + 1)^2),$$

причём для источника тепла в виде белого шума имеет место соотношение

$$\langle |\hat{F}(\omega, k)|^2 \rangle = \sigma_F^2 = const.$$

Таким образом, получена зависимость автоспектров температуры в сплошной среде от частоты и волновых чисел.

Интерпретация

Причины апериодических "вспышек" кинетической энергии движений внутри океана, разнообразны. Среди них известны воздействия атмосферных процессов ([Krauss, 1986](#)), перемещение многомасштабных фронтов в океане (Siedler et al., 1985), а также, в Северной Атлантике, переливы глубинных вод Северного Ледовитого океана через Гренландско-Фарерский "порог", распространение Средиземноморских вод повышенной солёности, сток великих сибирских рек в Арктике и др. (Вязилова и др., 2014; Дианский и др., 2010; Buckley, Marshall, 2016). Имеются также объяснения таких эффектов из теории случайных хаотических систем, для которых сложное нерегулярное поведение является характерным. В таких системах могут возникать сравнительно редкие экстремальные «вспышки» энергии, которые по амплитуде в несколько раз превышают стандартные отклонения от среднего состояния (Farazmand, Themistoklis, 2016).

Выводы

1. Пульсирующие придонные течения над хребтом Рейкьянес: плотность кинетической энергии течений изменяется в широких пределах: от нуля до ~ 800 эрг/см³. Общая изменчивость обусловлена циклическими вариациями и перемежаемостью (“вспышками”) колебаний. Выделяются многолетние (3–5-летние) циклы, сезонные колебания, синоптические вариации с периодами в интервале 30-300 суток, а также инерционные колебания и полусуточные приливные волны.

2. Буйковые станции были расставлены поперёк границы водных масс - Субарктического фронта. Гидрологические зондирования и T-S диаграммы показывают, что станция № 3580 находилась в зоне Субарктической водной массы, станция 3540 – в Северо-Атлантической воде, а станция 3562 – в области промежуточных вод, образующихся при трансфронтальном обмене. Соответственно термохалинной структуре, геострофические течения (AVISO) на поверхности океана вызывают средний дрейф вод на северо-восток с плотностью кинетической энергии (в среднем за 25 лет) 106, 45, 86 (± 3) эрг/см³ для станций 3580, 3562, 3540, соответственно. Поток на станции 3580 соответствует направленной к Исландии ветви Северо-Атлантического течения, которая образует восточную часть Субарктического циклонического круговорота. Течение на станции 3540 является продолжением главной ветви Северо-Атлантического течения и направлено в сторону Исландско-Фарерского поднятия. В промежуточных водах, на станции 3562, наблюдаются течения с меньшими скоростями и большой завихренностью.

Выводы, продолжение 1

3. Придонные течения на склонах хребта Рейкьянес (станции 3580, 3562), противоположны направлению Северо-Атлантического течения на поверхности океана. Напротив, вне Субарктического круговорота (станция 3540, около банки Хэттон), направление течений сохраняется до дна. Кинетическая энергия течений около дна - 27, 143, 31 (± 1) эрг/см³, для станций 3580, 3562, 3540, соответственно. В зоне промежуточных вод, на восточном склоне хребта Рейкьянес, имеет место мощный реверсивный (относительно Северо-Атлантического течения) поток вод на юго-запад, с большой средней скоростью ~ 15 см/с.

4. Сложные гидрологические поля в окрестности подводной горы Ампер образуются в результате многомасштабных гидрофизических процессов в области Азорского фронта и восточной ветви Азорского течения. На поверхности океана наблюдается средний дрейф со скоростью ~ 5.54 ± 0.05 см/с, преимущественно на восток. В области смешения субтропических вод и вод умеренных широт, развиваются разнообразные по формам и размерам меандры и вихри. Плотность кинетической энергии геострофических течений составляет в среднем 87 ± 1 эрг/см³. В случайные моменты времени, по невыясненной причине, возникают вспышки течений, в которых энергия сильно возрастает (до 610 эрг/см³).

Выводы, продолжение 2

5. Характерными особенностями исследованных временных рядов являются перемежаемость по времени и по пространству и «красный» вид спектров, при котором интервалы спада мощности разделены «ступеньками». На вэйвлет-диаграммах отмечаются характерные иерархические структуры разномасштабной текущей дисперсии («грабли»).

6. Сравнение с модельными фрактальными рядами показывает, что такие структуры спектров Фурье и вэйвлет-диаграмм обусловлены разномасштабными самоподобными циклами, которые повсеместно наблюдаются в колебаниях параметров рассмотренных гидродинамических сред.

7. Обобщённый спектр фазовых параметров в системах гидродинамического типа можно представить в виде фонового красного шума и пиковых энергонесущих интервалов, соответствующих циклическим и инерционным внешним воздействиям. Красный шум моделируется авторегрессионным процессом первого порядка. Отклик гидрофизической системы на случайные по фазе и амплитуде внешние воздействия есть нормальный шум, преобразованный в системе с релаксацией, временной масштаб которой определяется физическими свойствами среды.

Выводы, продолжение 3

8. Предполагается, что "хаотические" флуктуации возникают вследствие процесса экспоненциальной релаксации возмущений в гидродинамической системе, выведенной из равновесия в результате множественных случайных внешних воздействий. Спектр такого процесса имеет "красный" вид и может объяснить спадающий по частоте как ω^{-2} спектральный фон, который повсеместно наблюдается по измерениям в сплошных средах. На этом фоне спектральные пики и плато указывают на процессы притока энергии в гидродинамическую систему океана. Однако, параметры циклических составляющих спектра также имеют признаки нестационарности по среднему значению, дисперсии и частотам, так что бывает затруднительно их оценить. Максимумы в спектре расплываются и плохо выражены. В дополнение к релаксационному процессу, в "хаотическую" составляющую добавляются разномасштабные (различной амплитуды и продолжительности) "вспышки" колебаний, которые возникают в случайные моменты времени. Такая хаотичность также известна под названием "перемежаемость". Перемежаемость существенным образом сказывается на средних величинах, которые часто ошибочно используют для характеристики нестационарной системы "в среднем".

Выводы, продолжение 4

9. С учётом перемежаемости исследуемых процессов, выделены отдельные реализации эволюции поля с яркими проявлениями процессов релаксации системы после выведения из равновесного состояния.

10. В мелководных акваториях, по сравнению с открытым океаном, сложность полей и временная изменчивость возрастают. Значительные вариации измеряемых гидрофизических параметров имеют место на малых временных масштабах, начиная от 10 сек. и пространственных масштабах - от 10 см.

11. Причины апериодических "вспышек" кинетической энергии движений внутри океана, разнообразны. Среди них известны воздействия атмосферных процессов, перемещение многомасштабных фронтов в океане, а также, в Северной Атлантике, переливы глубинных вод Северного Ледовитого океана через Гренландско-Фарерский "порог", распространение Средиземноморских вод повышенной солёности, сток великих сибирских рек в Арктике и др. Имеются также объяснения таких эффектов из теории случайных хаотических систем, для которых сложное нерегулярное поведение является характерным.

Литература

- Амбросимов А.К., Дианский Н.А., Ключиткин А.А., Мельников В.А. Долговременная изменчивость течений в зоне субарктического фронта Атлантического океана// Океанологические исследования. 2019. Том 47. № 2. С. 246–256. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).15.
- Архипов В.В. Мельников В.А., Цветинский А.С. Особенности разномасштабных гидрофизических процессов в Карском море//Одиннадцатая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН. 11-15 ноября. 2013.
- Вязилова А.Е., Алексеев Г.В., Смирнов А.В. Связь термохалинных аномалий в северо-западной Атлантике и Северо-европейском бассейне с колебаниями климата// Проблемы Арктики и Антарктики. № 3 (101). 2014. С. 48 - 61.
- Дианский Н.А., Володин Е. Н., Гусев А. В. Воспроизведение современного климата в совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана// Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 46. № 4. 2010. С. 448-466.
- Зацепин А.Г. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой части Черного моря// Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т.50. №1. С.16-29, <http://dx.doi.org/10.7868/S0002351513060163>.
- Мельников В.А. Особенности разномасштабных вариаций в геофизических сплошных средах// Процессы в геосредах. Москва:ИПМех РАН. Т. 2(3), 2015. С. 49-61.
- Мельников В.А. Волновой подъём вод над Срединно-Атлантическим хребтом в районе Азорского фронта// "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов"., Москва:ИКИ РАН. Т. 13, № 6. 2016. С. 142-152.
- Мельников В.А. Бароклинные M2 приливы над Срединно-Атлантическим хребтом// Труды Государ-ственного океанографического института. Исследования океанов и морей. Т. 218. 2017. С. 168-190.
- Мельников В.А., Голенко Н.Н. Гидрофизические процессы вблизи подводной горы Ампер// Семнадцатая Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)". Материалы конференции. 2019. С. 321.
- Мельников В.А., Пиотух В.Б., Зацепин А.Г. Ветры, течения и энергетический обмен в гидрометеорологической системе на шельфе в северо-восточной части Черного моря//Материалы Первой международной научно-технической конференции по термогидромеханике океана: Современные проблемы термогидромеханики океана «СПТО – 2017»: в 1 т., 192 с., : сб. ст. / [сост.: А.Г. Костяной, С.А. Свиридов]; Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН – Москва:ИО РАН. 2017. С. 114-117. DOI 10.29006/978-5-9901449-3-4-2017-1.
- Мельников В.А., Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И. Ветровые циклы и климатические тренды Чёрного моря// Труды Государственного океанографического института, Исследования океанов и морей. Москва:ГОИН. Т. 219, 2018. С. 101-123. URL: www.goin.ru, ISBN 978-5-9909833-2-8.

Литература (продолжение)

- Мельников В.А., Никитин О.П. Особенности траекторий поверхностных поплавков ARGO(S) при переносе из Северной Атлантики в Карское море// Труды XXVIII Международной конференции “Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – Новороссийск, 2020”. Электронный сборник материалов конференции.
- Buckley M. W., Marshall J. Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review// Rev. Geophys. 54. 2016. P. 1-59.
- Calman J. On the interpretation of ocean current spectra. Part II: Testing dynamical hypotheses // J. Phys. Oceanogr. 1978. Vol. 8. No 7. P. 644–652. [doi.org/10.1175/1520-0485\(1978\)008<0644:OTIOOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1978)008<0644:OTIOOC>2.0.CO;2).
- Farazmand M., Themistoklis P.S. Dynamical indicators for the prediction of bursting phenomena in high-dimensional systems// Physical Review. E 94, 032212. 2016. P. 1-15 . DOI: 10.1103/PhysRevE.94.032212.
- [Krauss W.](https://doi.org/10.1029/JC091iC04p05061) The North Atlantic Current// Journal of Geophysical Research. V.91, Issue C4. 1986. P. 5061-5074. <https://doi.org/10.1029/JC091iC04p05061>.
- Melnikov Vasiliy, Lidija Moskalenko, Vladimir Piotoukh, and Andrey Zatsepin. Multiscale wind cycles and current pulses at the Black Sea eastern boundary// Geophysical Research Abstracts, Vienna: EGU General Assembly. 2015. Vol. 17. EGU2015-7184-1.
- Melnikov V.A., Zatsepin A.G., Piotoukh V.B. Hydrophysical research using long-term Polygons// International Symposium “70 years of World Ocean Research”. P.P. Shirshov Institute of Oceanology. RAS, Moscow. Russia. September, 12-13. 2016. P. 7.
- Sagaut P., Deck S., Terracol M. Multiscale and Multiresolution Approaches in Turbulence. Imperial College Press, 2006 г.
- Siedler G., W. Zenk, and W. J. Emery, Strong Current Events Related to a Subtropical Front in the Northeast Atlantic// J. Phys. Oceanogr. 15. 1985. P. 885–897. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015<0885:SCERTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<0885:SCERTA>2.0.CO;2).

Спасибо за внимание

*Мельников Василий Андреевич,
Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН,
Тел. +7 916 241 87 16, vmelnikov@ocean.ru*