



Школа-семинар, Таруса, 23–27 мая 2025

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

# КАСПИЙСКОЕ МОРЕ КАК ПРИРОДНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

С.И. Бадулин<sup>1,2</sup>, А.Г. Костяной<sup>2</sup> & С.А. Лебедев<sup>3</sup>,  
А.П. Попов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий

<sup>2</sup>Институт океанологии П.П. Ширшова РАН

<sup>3</sup>Геофизический центр РАН

26 мая, 2025



Грант РФФ #23-77-00027

<https://rscf.ru/en/project/23-77-00027>

Sergei I. Badulin, Andrey G. Kostianoy, Sergey A. Lebedev,  
Alexander P. Popov

**The Caspian Sea as a full-scale experimental facility  
supported by altimetry measurements of wind-driven  
waves,**

Dynamics of Atmospheres and Oceans,

Volume 110, 2025, 101554, ISSN 0377-0265,

<https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2025.101554>

**Available at <https://authors.elsevier.com/a/114nq1LkTK5-9e>**

[Все вопросы](#)

[badulin.si@ocean.ru](mailto:badulin.si@ocean.ru)

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



# Grande Soufflerie de Luminy OSU Institut Pythèas, Marseille, France

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



$L=40$  m

$W=2$  m

$D=1$  m

$H=1.4$  m

$U_w$  up to 17 m/s

$U_c$  up to 0.5 m/s

etc.



# Donelan et al. JPO, 2005-2006. Experiments in Lake George

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

802

JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY—SPECIAL SECTION

VOLUME 22

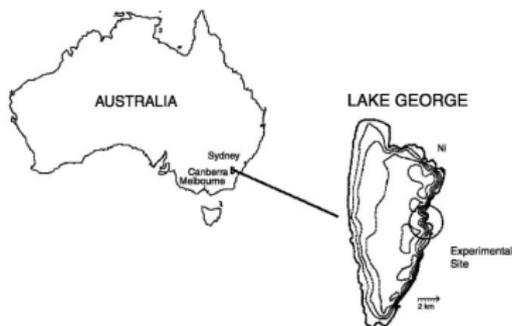


FIG. 1. Location of the Lake George site.



1678

JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY

VOLUME 36

TABLE 1. Summary of AUSWEX records used in the wind input study:  $U_{10}$  is the wind speed at 10 m height,  $u_*$  is the friction velocity,  $f_p$  and  $c_p$  are the peak frequency and phase speed, respectively,  $d$  is the water depth at the measurement location, and  $h$  is the height of Elliott pressure probe above the water level (in case of the fixed mode, this is the height above the mean water level).

Record	$U_{10}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$u_*$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$f_p$ (Hz)	$H_s$ (m)	$d$ (m)	$U_{10}/c_p$	$h$ (m)	Mode
LG8	11.9	0.44	0.54	0.156	0.319	7.2	0.021	Following
LG9	12.0	0.45	0.55	0.134	0.286	7.6	0.042	Following
LG10	8.1	0.30	0.76	0.076	0.329	5.2	0.149	Following



# Gulf Tehuantepec

e.g. Romero, L., Melville, W.K., 2010., doi:10.1175/2009JPO4127.1.

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

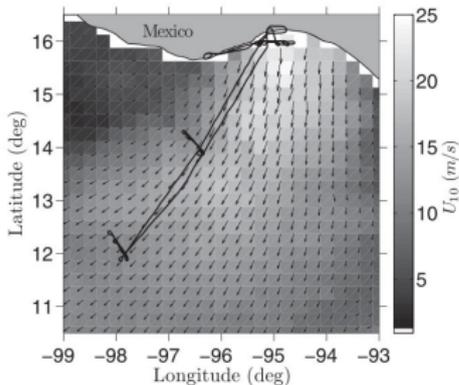


FIG. 1. QuikSCAT winds for 17 Feb 2004, showing the typical structure of the wind jet during Tehuano conditions over the Gulf of Tehuantepec. The solid black line corresponds to the flight track for research flight 05. The areas shown in white contain no data.

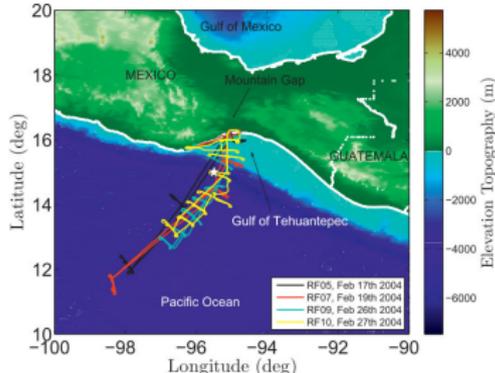


FIG. 2. GOTEX flight tracks from research flights 05, 07, 09, and 10. The white star corresponds to the location of wind time series shown in Fig. 3.



# Gulf of Lion. Mistral and Tramontane

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



Sentinel-3 natural colour from the OLCI sensor on 1 February 2022.

The strong Mistral and Tramontane winds cause widespread whitecaps and sea spray at the sea surface, which can be seen in this image as the white colours emanating from the Gulf of Lion



# JOint North Sea WAve Project

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

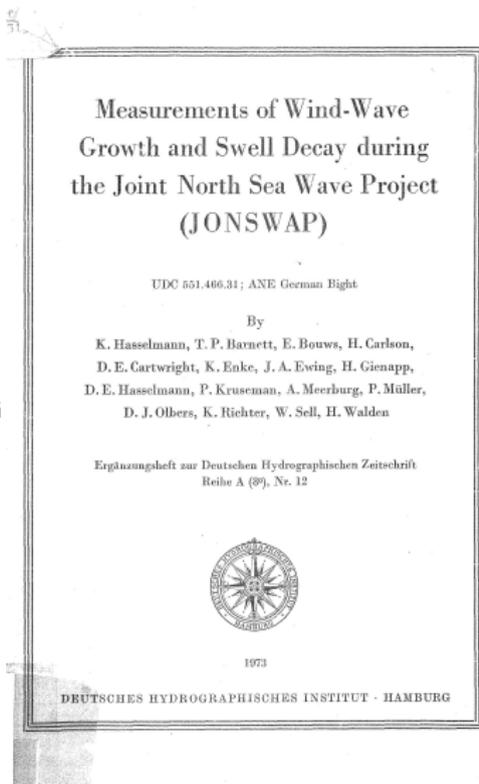
С. И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



Ten weeks of measurements  
summer time 1968-1969.

“The area was chosen on  
account of its relative smooth  
topography, moderate tidal  
currents and convenient  
logistics”





# Дальнейший план

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

- 1 Ветер и волны в Каспийском море
- 2 Wind speed scaling of Kitaigorodskii (1962) and similarity of wind wave growth
- 3 Wind-free approach of Zakharov and self-similarity of wind-driven seas
- 4 Summary



# Каспийское море или озеро

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
ДР.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



Abs.height – 27 meters. Size – NS up to 1200 km, EW – up to 435 km. Area  $\approx 390000 \text{ km}^2$ . Max.depth – 1025 m.

It is bounded by 5 countries (too many cooks spoil the broth):  
Russia, Kazakhstan, Turkmenistan, Iran, Azerbaijan.



# МОРЕ или ОЗЕРО?

- UNCLOS – United Nations Convention on the Law of the Sea, December 10, 1982
- СОВЕТСКО-ИРАНСКИЙ ДОГОВОР 1921 г. 26 февраля, Москва.  
Подписали РСФСР — Г. В. Чичерин и Л. М. Карахан, Иран — посол Мошавероль-Мемалек (Али Голи-хан Ансари).  
Вступил в силу со дня подписания.
- Договор о Торговле и Мореплавании между Союзом Советских Социалистических Республик и Ираном. 25 марта 1940 г.  
Ратифицирован Президиумом Верховного Совета СССР 7 апреля 1940 года, иранским меджлисом 4 апреля 1940 года
- . . . . .

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



# Северо-западные и юго-восточные ветры на Каспии

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

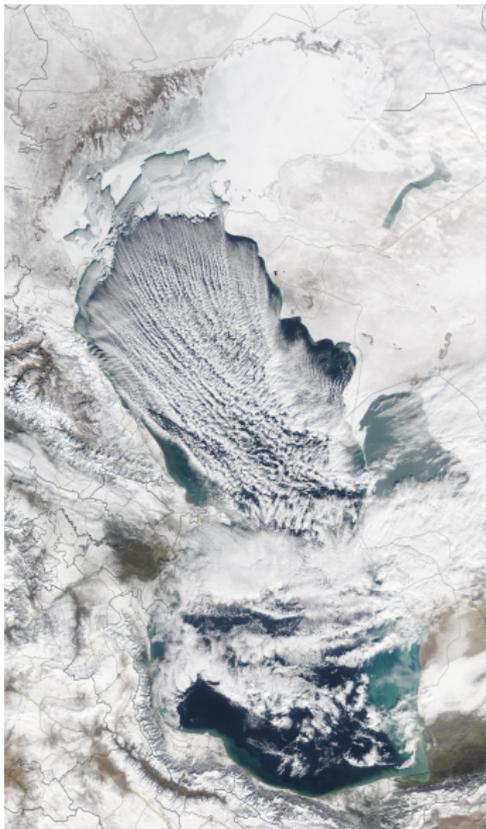
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



Satellite view of the Caspian Sea from MODIS-Terra on 10 January 2008. Clouds generated over relatively warm sea surface display a wind pattern over the Caspian Sea with a dominant wind from the ice margin in the Northern Caspian Sea to the southeastern direction



# Северо-западные ветры (ERA5)

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

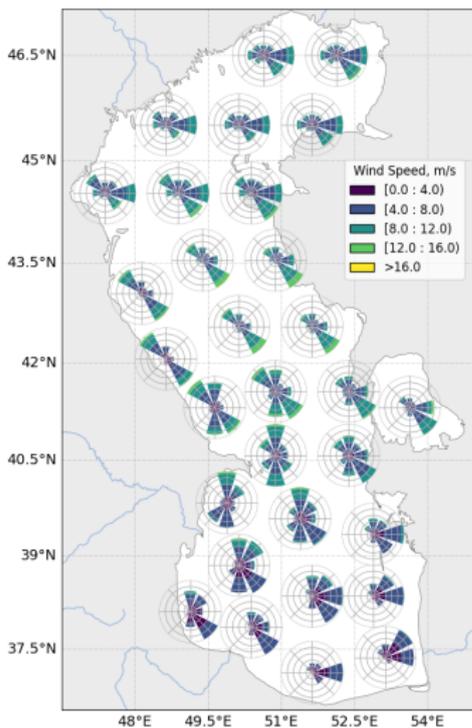
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

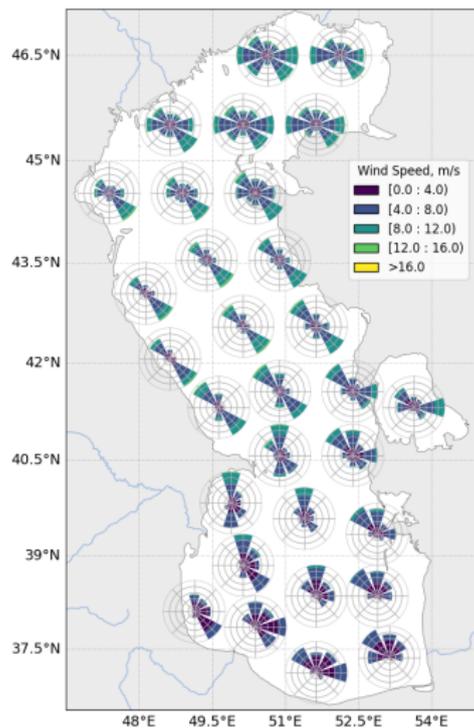
Китайгородский

Захаров

Summary



Октябрь



Январь



# Южные, юго-восточные ветры (ERA5)

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

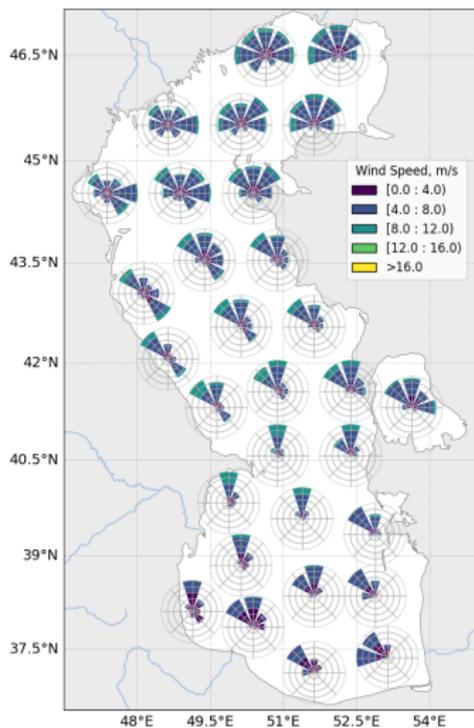
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

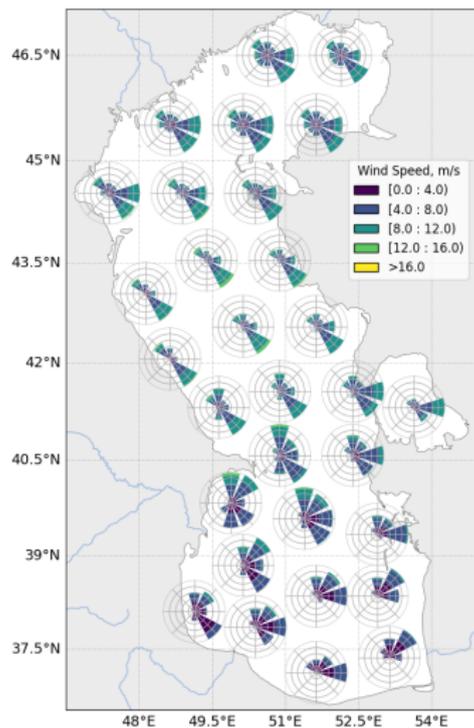
Китайгородский

Захаров

Summary



Апрель



Июль



# Каспийское море – ветро-волновой канал с готовой системой измерений

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

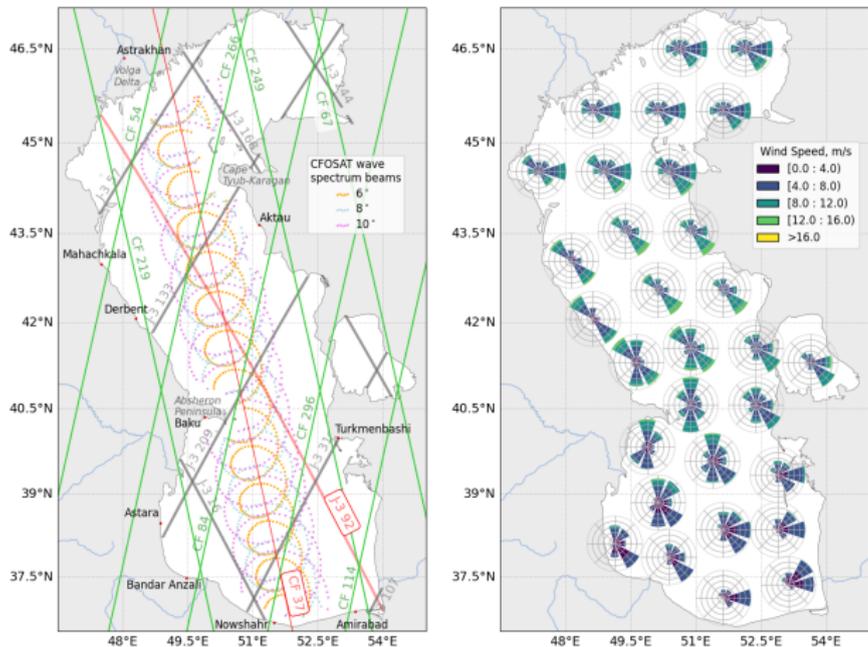
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



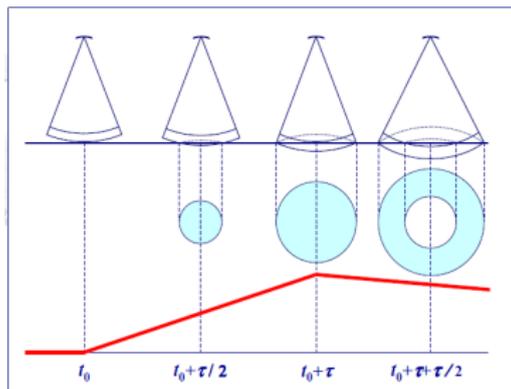
Left – Tracks of Jason-3 and CFOSAT. Red – p92 (J3), p37 (CFOSAT);

right– October wind roses

Track lengths > 1000 km !!!



# How the altimeter measures waves?



Main goal of the altimetry is to measure the Earth (ocean) surface height. Wavelength is 2.2 cm (Ku-band), pulse length is about 1 meter. Surface footprint  $\approx 5$  km.

The surface height is estimated from a mid-point of the front, wave height is from the front width. The surface reflectivity (normalized radar cross-section) is used to empirically parameterize near-surface wind speed and wave period.

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



# Performance of our **wind** channel

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

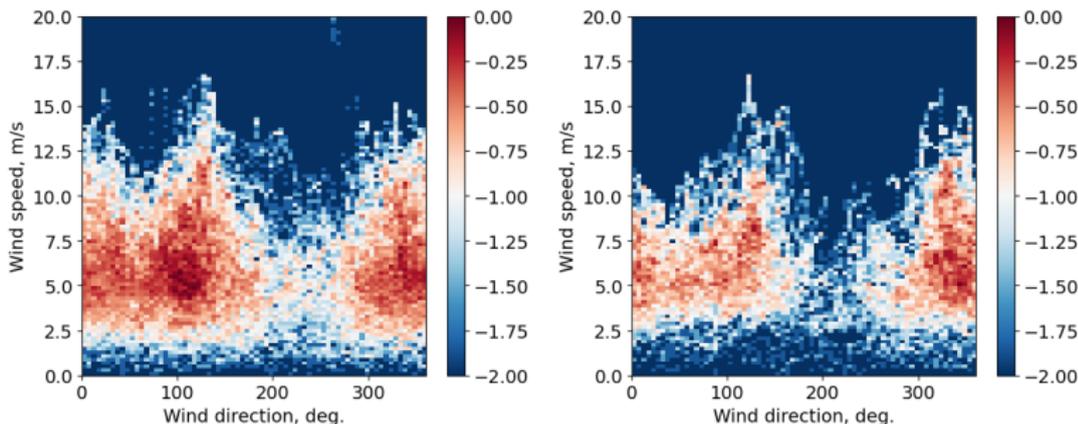
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



Probability of wind speed occurrence vs direction.

Directions  $\theta \approx 130^\circ$  (south-east, from the Iranian coast) and  
 $\theta \approx 330^\circ$  (north-west, from the Volga lowlands)

Right – p92 of Jason-3 (red track), left – the rest of the data.



# Performance of our **wave** channel

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

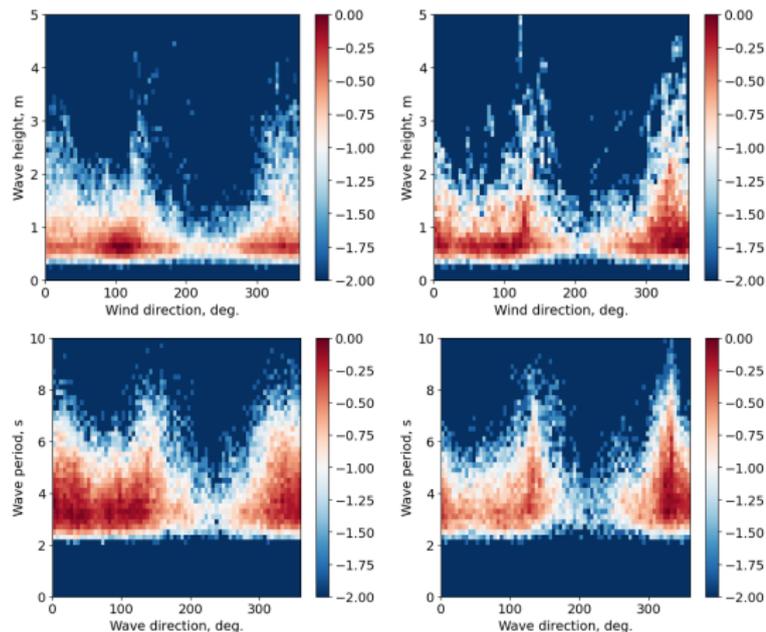
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



Same as in previous slide.

Top – wave heights, bottom – wave periods

Right – the main axis, left – all the rest

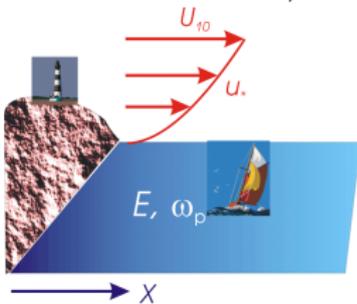


# Wind-speed scaling of Kitaigorodskii

## No equations but physics

Frequently cited but rarely read

*Kitaigorodskii (1962) Applications of the theory of similarity to the analysis of wind-generated wave motion as a stochastic process. Bull. Acad. Sci. USSR, Geophys.Ser., Engl. Transl. N1, 105-117.*



Even in the idealized setup the wind wave evolution is determined by a long set of physical quantities: “external”  $U_{wind}$ ,  $g$ ,  $x$  and “intrinsic”  $H_s$ ,  $T$ , ...

Much more frequently cited

*W.Pierson, L.Moskowitz. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on **the similarity theory of S.A.Kitaigorodskii**:*

Although dimensional analysis is a useful tool in many problems, Neumann and Pierson ... cast a skeptical eye on its application to wave theory

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



# Splendors and miseries of dimension analysis: the science or the art?

This is not only a formal analysis of dimensions, but also of physics

$a = \frac{gT}{U_{10}}$  – wave age, dimensionless wave period

$\xi = \frac{gH_s}{U_{10}^2}$  – quasi-age, dimensionless wave height

$\tau = \frac{gt}{U_{10}}$  – dimensionless duration

$\xi = \frac{gH_s}{U_{10}^2}$  – dimensionless fetch

$a = f(\xi)$  – very strong hypothesis that implies features of universality of the wave spectrum

We have wind speed, wave heights and periods from altimetry.  
Go ahead !!!

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



# What is wind speed?

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

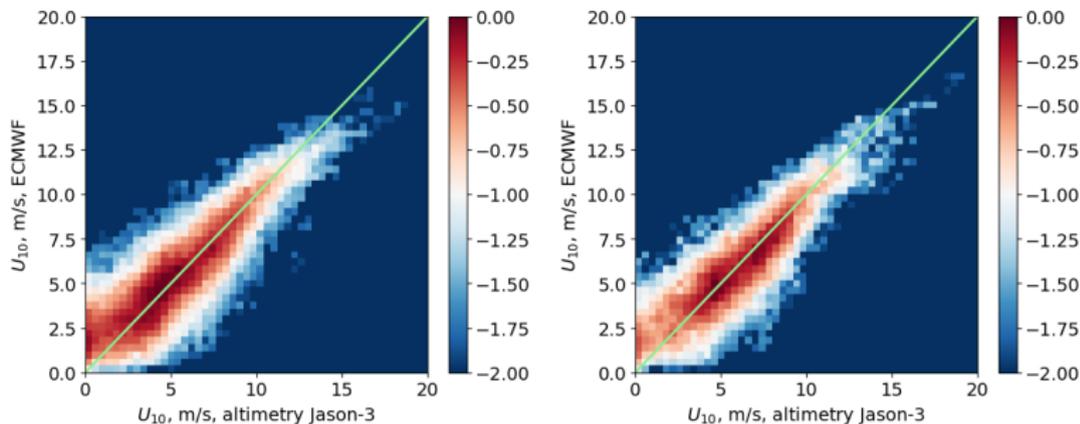
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



Model wind vs altimetry parametrization

Left – all data; right – p92, Jason-3

Остановимся на альтиметрическом ветре



# What is wave period?

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

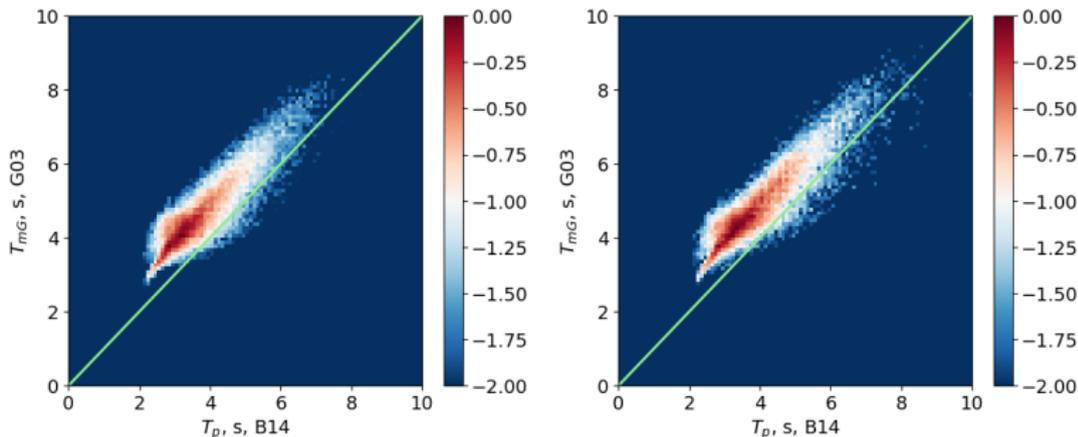
Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

## Параметрическая модель периода против физической



Все треки

Трек 92

Работаем с обеими моделями



# It works sometimes

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

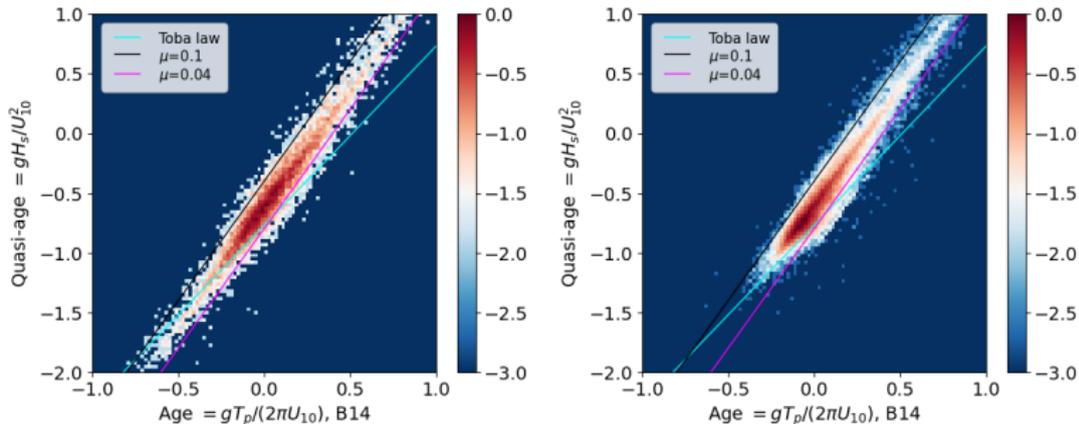
Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

## Quasi-age vs wave age



Left – all data

Right – track 92

Usually, they rely upon power-law dependence

$$\xi \sim a^T, \text{ where } 4/3 < T < 2.$$

$T = 2$  – constant wave steepness.

It looks like a success of the wind speed scaling



# Sometimes it does not work

## Dependencies on dimensionless fetch

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

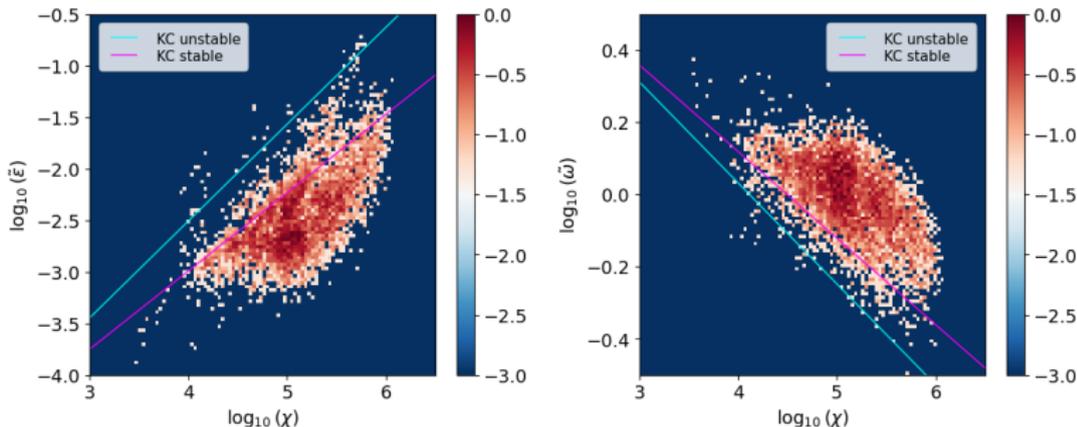
Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

### North-western winds



There is no similarity or universality, just a tendency.

Wind speed is not a good parameter because  
**wave growth** depends on **energy flux to waves**  
which is not a universal function of wind speed



# Sometimes it does not work

## Dependencies on dimensionless fetch

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

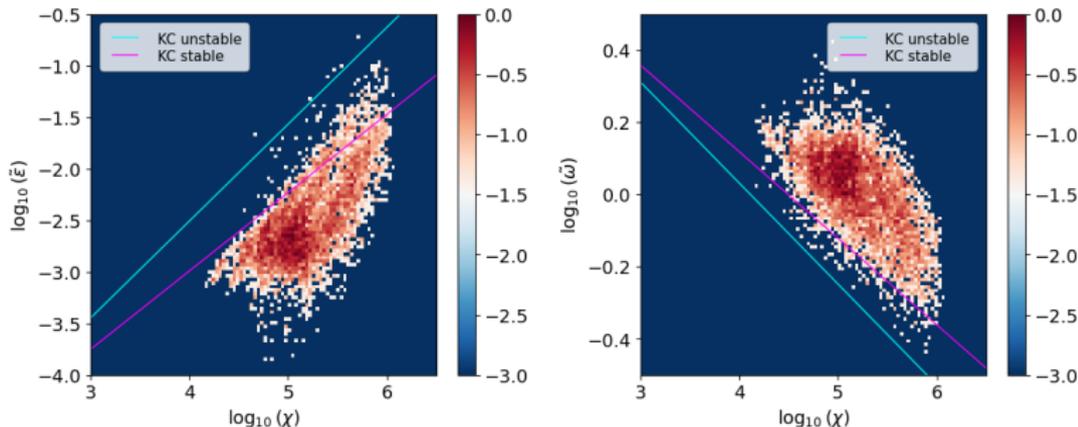
Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

### South-eastern winds



There is no similarity or universality, just a tendency.

Wind speed is not a good parameter because  
**wave growth** depends on **energy flux to waves**  
which is not a universal function of wind speed



# Kinetic equation for water waves (Lothar Wolfgang Nordheim 1928, Rudolf Ernst Peierls 1929, Klaus Hasselmann 1962)

Wind-wave spectrum as an ensemble of waves with random phases – quasi-particles:

kinetic equation, Boltzmann equation, Hasselmann equation

$$\frac{\partial N_{\mathbf{k}}}{\partial t} + \nabla_{\mathbf{k}} \omega_{\mathbf{k}} \nabla_{\mathbf{r}} N_{\mathbf{k}} = S_{nl} [N_{\mathbf{k}}] + S_{in} [N_{\mathbf{k}}] + S_{diss} [N_{\mathbf{k}}]$$

$N(\mathbf{k}) = E(\mathbf{k})/\omega(\mathbf{k})$  – distribution density of the quasi-particles  
– wave action,  $\mathbf{k}$  – an analogue of momentum of classic particle, frequency  $\omega_{\mathbf{k}}$  satisfies linear dispersion equation

$$\omega^2(\mathbf{k}) = g|\mathbf{k}|$$

with  $d$  – the water depth.

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



# Self-similar solutions for growing wind sea – a generalization of KZ solutions?

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

- 1 Dominating nonlinearity  $\Rightarrow$  split balance model

$$dE/dt = S_{nl} \quad (1)$$

$$\langle dN/dt \rangle = \langle S_{in} + S_{diss} \rangle \quad (2)$$

- 2 Homogeneity property  $S_{nl}[\kappa \mathbf{k}, \nu N_{\mathbf{k}}] = \kappa^{19/2} \nu^3 S_{nl}[\mathbf{k}, N_{\mathbf{k}}]$
- 3 Self-similar solutions for the conservative equation (1)

$$E(\omega, \theta, x) = b^5 x^{p+q} F(b\omega x^q)$$

with “magic links” (see the talk of Andrei Pushkarev)

$$q_x = (2p_x + 1)/10$$

- 4 The closure (2) dictates power dependencies for energy and frequency

$$E = E_0 x^{p_\tau}; \quad \omega = \omega_0 x^{-q_\tau}$$

- 5 Last but not least – spectral shape invariance.

$F(\zeta)$  depends weakly on parameters of self-similarity



# Wind-free conversion of the self-similar solutions to an invariant

Wave invariant (Zakharov et al. 2015, JFM)

$$\mu^4 \nu = \alpha_0^3$$

two dimensionless parameters  $\mu$  and  $\nu$  replace two of Kitaigorodskii – wave age and quasi-age

$\mu = \frac{\omega_p^2 \sqrt{\langle \eta^2 \rangle}}{g}$  – steepness;  $\nu = \omega_p t$  or  $\nu = k_p x$  – lifetime  
 $\nu \sim \mu^{-4} \sim \tau_{nl}$  – lifetime is proportional to the instant nonlinear relaxation scale

The invariant does not depend on self-similarity exponents  $p, q$  and depends slightly on wave spectra shapes ( $\alpha_0$ ):

The adiabatic invariant  
without an adiabatic parameter !?

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



# The **wind-free** scaling of **wind wave** growth

Duration-limited

$$q_{\tau} = \frac{2p_{\tau} + 1}{9}$$

$$\tilde{H} = \frac{H_s}{gt^2};$$

$$\tilde{T} = \frac{T_p}{2\pi t}; \quad \tilde{T} = \nu$$

$$\tilde{H} = 4\alpha_{0(d)}^{3/4} \tilde{T}^{9/4} \approx 3.06 \tilde{T}^{9/4}$$

Fetch-limited

$$q_x = \frac{2p_x + 1}{10}$$

$$\tilde{H} = \frac{H_s}{x};$$

$$\tilde{T} = T_p \sqrt{\frac{g}{8\pi^2 x}}; \quad \tilde{T} = \nu^{-1/2}$$

$$\tilde{H} = 8\alpha_{0(f)}^{3/4} \tilde{T}^{5/2} \approx 5.59 \tilde{T}^{5/2}$$

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



# Look at the Caspian Sea Wind-free representation

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

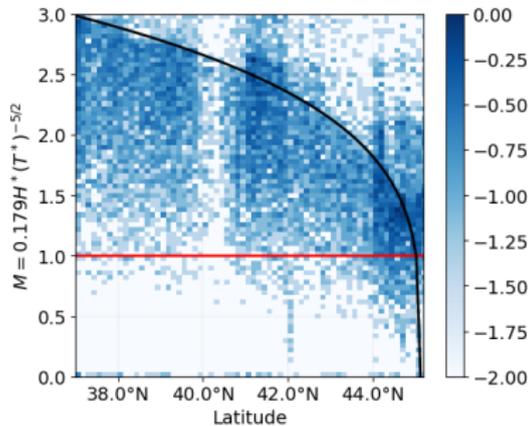
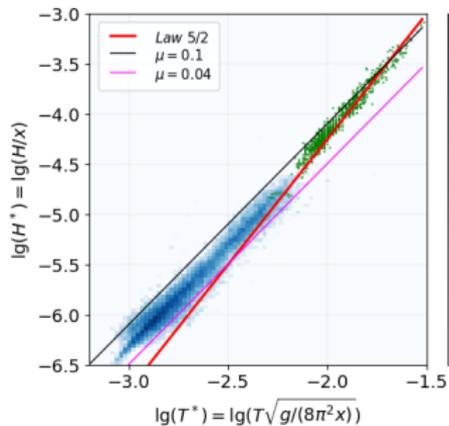
С. И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

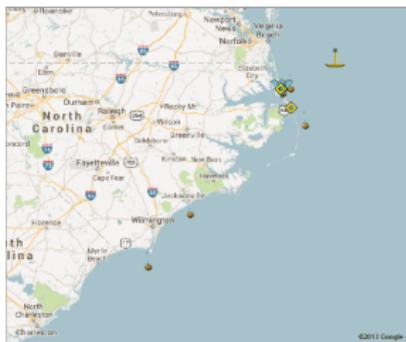
Захаров

Summary



Waves from the Volga delta

Waves from the Iranian coast



FRF wave riders

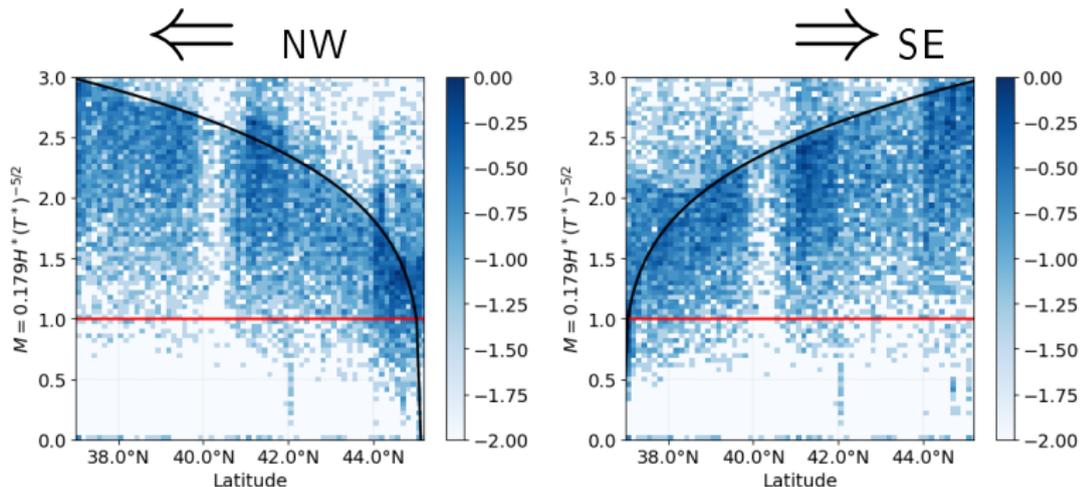
ID	Fetch	N
190	6.1 km	102
192	18.5 km	35
200	18.5 km	24
430	18.5 km	606
630	3.0 km	171

Зеленые точки –  
данные FRF на  
разгонах  $x < 10$  nm,  
на Каспии  $x > 10$  nm



# Look at the Caspian Sea

Invariant  $\mu^4 \nu \alpha_0^{-3} = 1$



Waves from the Volga delta

Waves from the Iranian coast

Видим короткие участки ( $\sim 100$  км) роста волнения и затем зависимость **разгон**<sup>1/4</sup>, которая отвечает постоянным высотам и периодам волнения – **fully-developed, matured sea**  
Здесь период оценивался по теории слабой турбулентности

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

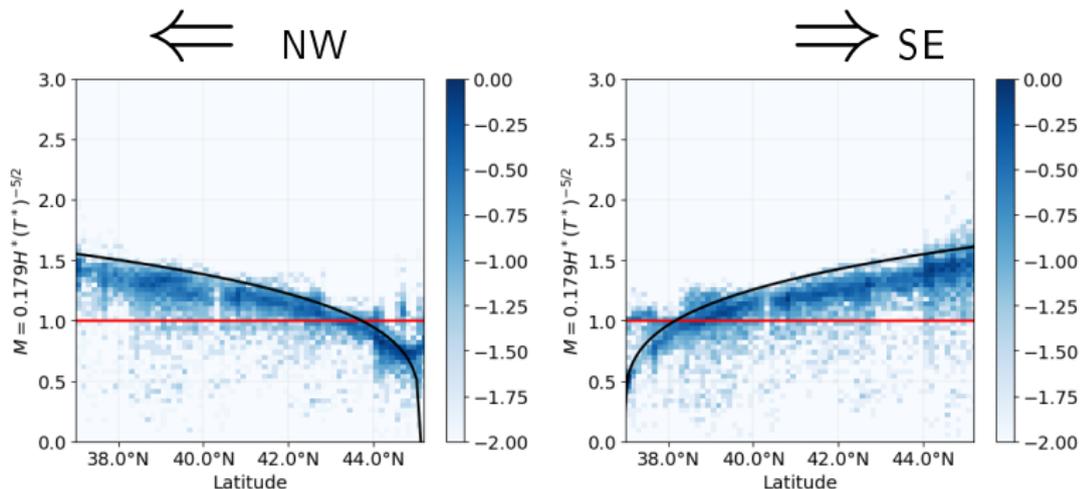
Summary



# Look at the Caspian Sea Invariant

$$\mu^4 \nu \alpha_0^{-3} = 1$$

То же самое с оценками периодов по параметрическим формулам Gommenginger et al. (2003)



Waves from the Volga delta

Waves from the Iranian coast

Важно иметь хорошие оценки волновых периодов, что спутниковыми методами сделать непросто

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary



# JOint North Sea WAve Project

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

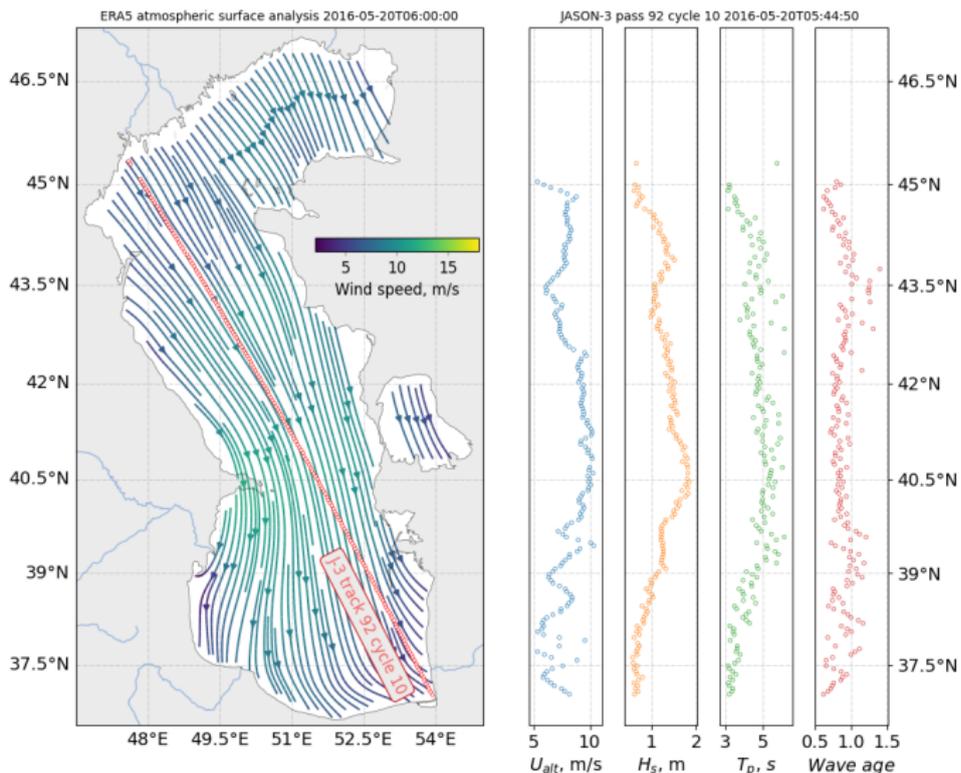
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary





# JOint North Sea WAve Project

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

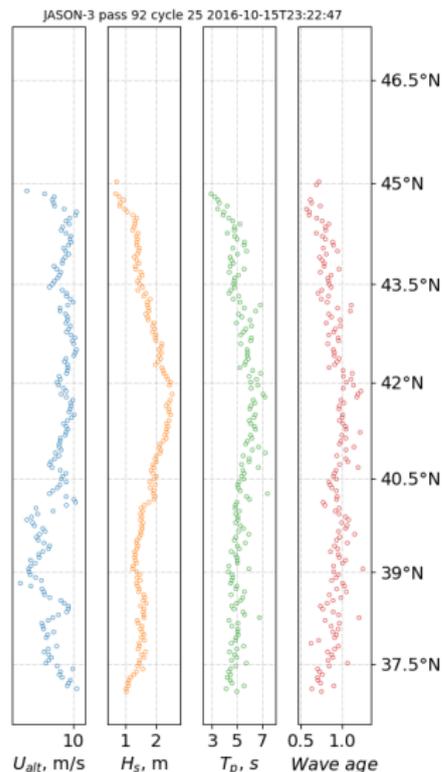
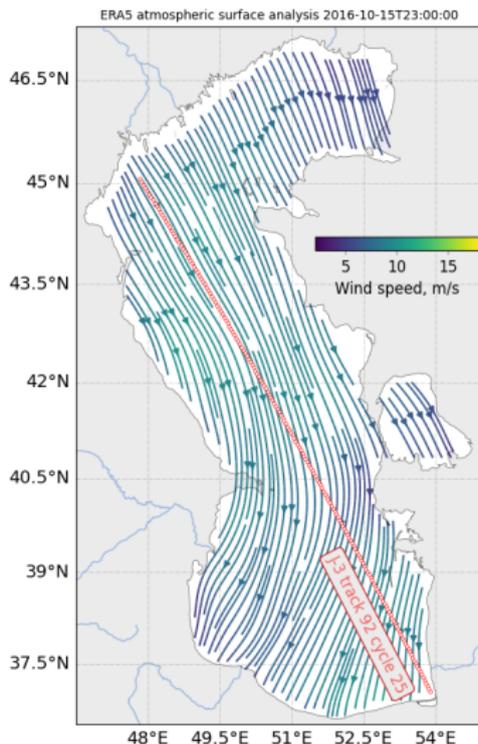
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary





# JOint North Sea WAve Project

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

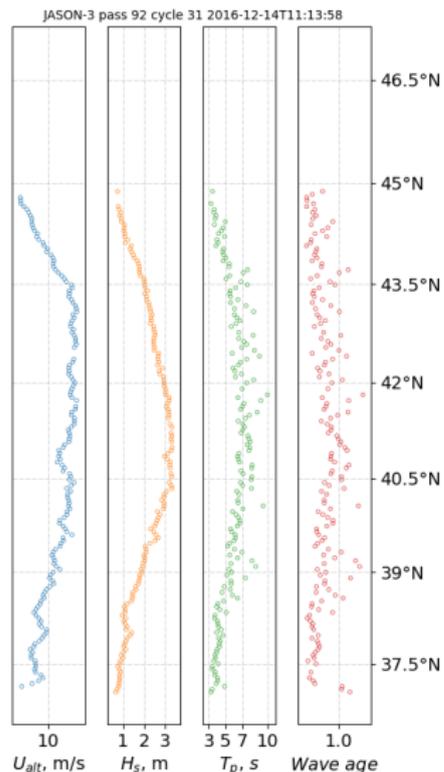
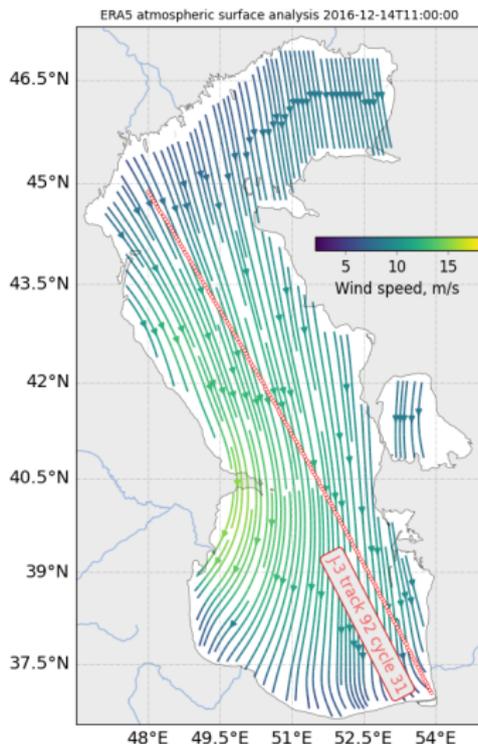
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary





# JOint North Sea WAve Project

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

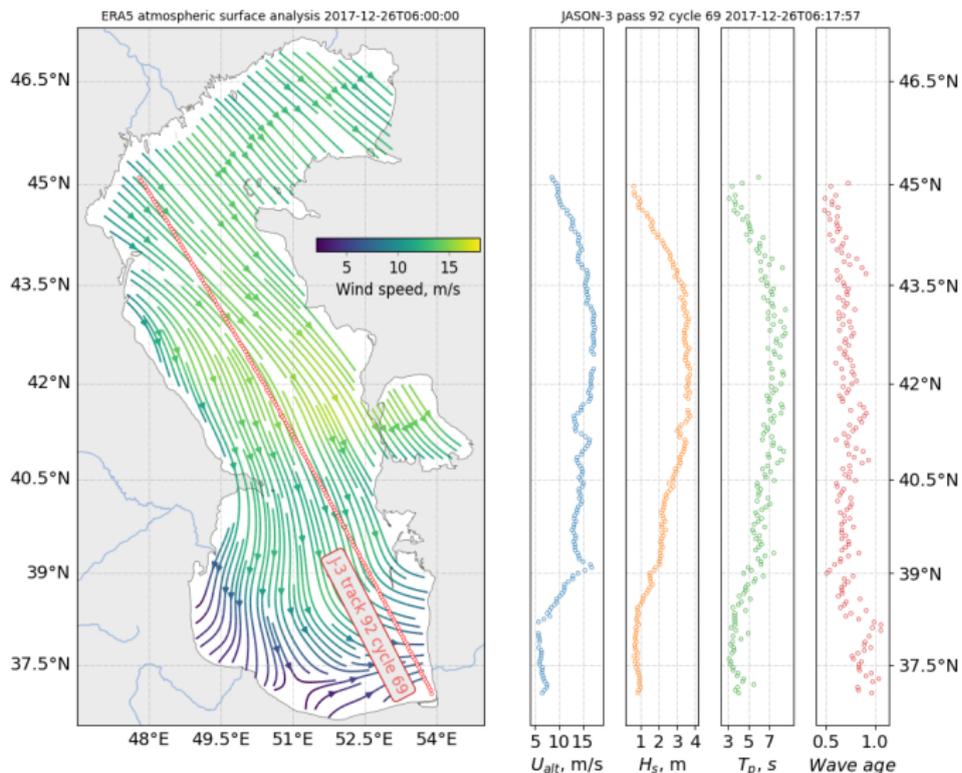
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary





# JOint North Sea WAve Project

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

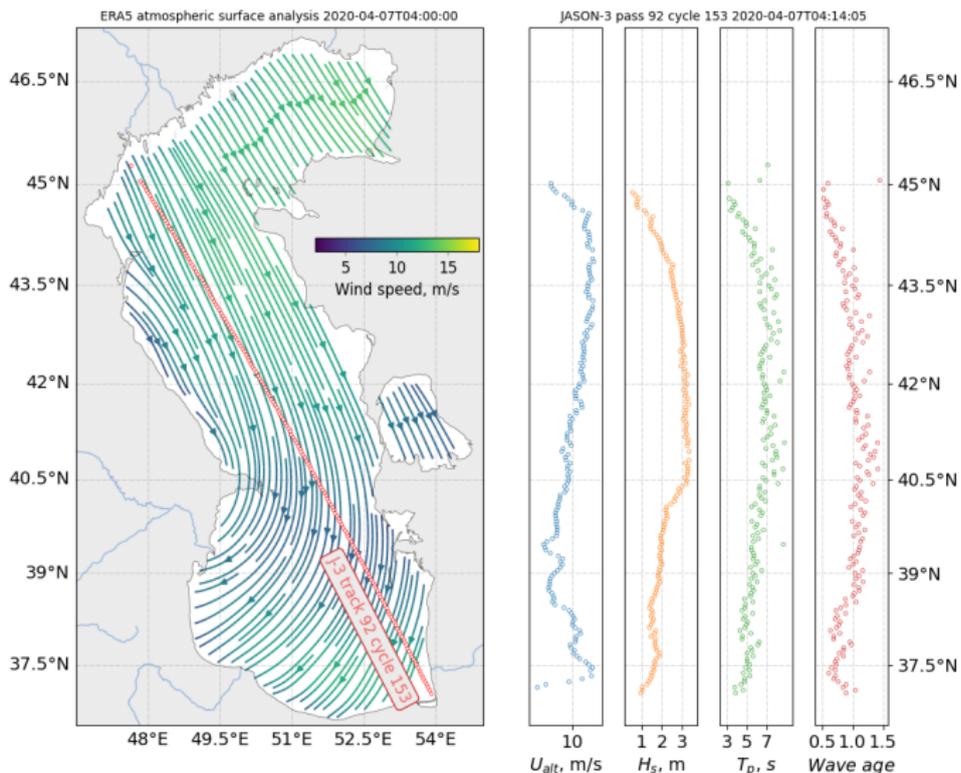
С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary





# Parameters of the wind sea during the events of NW winds in the Caspian Sea captured by Jason-3

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С. И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

Date	Fetch, km	$\max(H_s)$ , m	$U_{alt}$ , m/s	$a$	$\chi \times 10^{-4}$
20-May-2016	11 – 903	1.9	5.3 – 10.3	0.6 – 1.4	0.7 – 29.2
15-Oct-2016	13.3 – 360	2.5	7.0 – 10.2	0.6 – 1.2	0.7 – 13.7
14-Dec-2016	46 – 291	3.3	7.2 – 12.9	0.6 – 1.3	1.2 – 14.0
26-Dec-2017	203 – 794	3.7	5.7 – 17.5	0.5 – 1.1	0.4 – 27.7
07-Apr-2020	19 – 490	3.4	7.0 – 11.8	0.5 – 1.4	0.5 – 16.7

- Вдоль главной оси Каспийского моря мы имеем широчайший диапазон условий развития волнения близкий к океанским в почти идеальной конфигурации направлений ветра и волн;
- Современная морская техника позволяет проводить фундаментальные и прикладные исследования морского волнения в этих условиях



# Summary

Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

- Каспийское море – **полномасштабный ветро-волновой канал** оснащенный готовой системой измерений (спутниковые альтиметры);
- **Теория подобия Китайгородского** неплохо работает при описании динамики волнения;
- **Теория слаботурбулентного автомодельного волнения Захарова** дает удовлетворительное количественное описание растущего волнения;
- **Эксперименты в Каспийском море** могут послужить продолжением волнового эксперимента **JONSWAP**.



Школа-семинар,  
Таруса  
26.05.2025

С.И.  
Бадулин и  
др.

Ветер и  
волны в  
Каспийском  
море

Китайгородский

Захаров

Summary

*С П А С И Б О*