

**Сергей А. Лебедев**  
**Андрей Г. Костяной**  
**Евгения А. Костяная**  
**Илья Д. Третьяк**



*Геофизический Центр РАН*



*Майкопский государственный  
технологический университет*



*Национальный исследовательский  
университет «МИЭТ»*



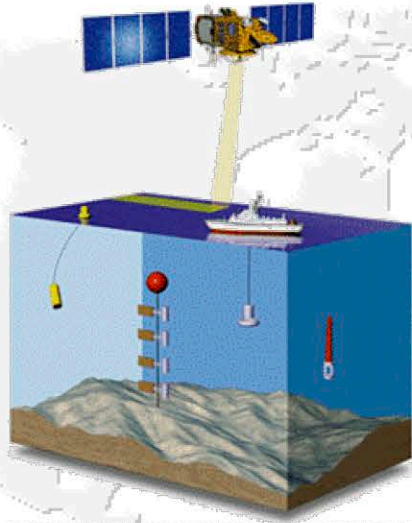
*Институт океанологии  
им. П.П.Ширшова РАН*

# **ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННОЙ И МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА БАРЕНЦЕВ МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ**





# Аннотация



Спутниковая альтиметрия является очень полезным инструментом для мониторинга как уровня, так и волнового режима Баренцева моря благодаря своей способности получать данные в облачных условиях и в отсутствие света (полярная ночь).

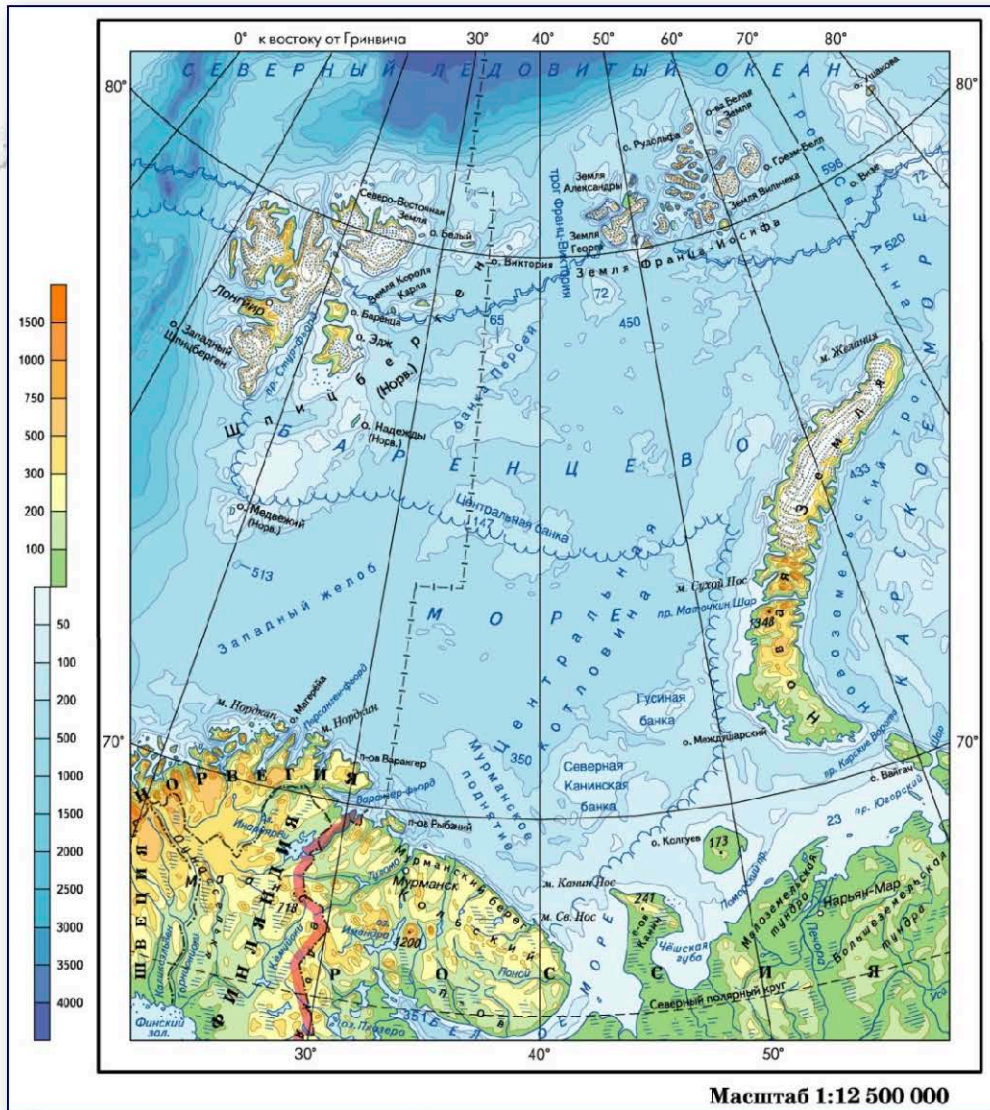
На основе данных, полученных со спутников ERS-1/2, EnviSat, CryoSat-2, SARAL/AltiKa и Sentinel-3A/3B, были исследованы сезонная и межгодовая изменчивости значимых высот волн (Significant Wave Height – SWH), на акватории моря в период отсутствия ледяного покрова за период 1992-2020 гг.

На первом этапе для того, чтобы исключить систематические ошибки в данных проводилось сравнение альтиметрических измерений с результатами модельных расчетов, представленных в волновом реанализе ARCTIC\_MULTICYEAR\_WAV\_002\_013, в котором представлены результаты расчетов по модели WAM с пространственным разрешением  $\sim 3$  км временным шагом 1 час начиная с 1999 года по настоящее время. В качестве атмосферного форсинга использовался реанализ атмосферы ERA-5 ECMWF.

Общая климатическая тенденция снижения значимых высот волн в Баренцевом море имеет тенденция к снижению  $-0,001$  м/год.



# Баренцево море



Баренцево море расположено на северо-европейском шельфе, почти открытое к Центральному арктическому бассейну и открытое к морям Норвежскому и Гренландскому, оно относится к типу материковых окраинных морей.

Это одно из самых больших по площади морей.

Его площадь — 1 424 000 км<sup>2</sup>, объём — 316 000 км<sup>3</sup>, средняя глубина — 222 м, наибольшая глубина — 513 м.



# Моделирование волнового режима

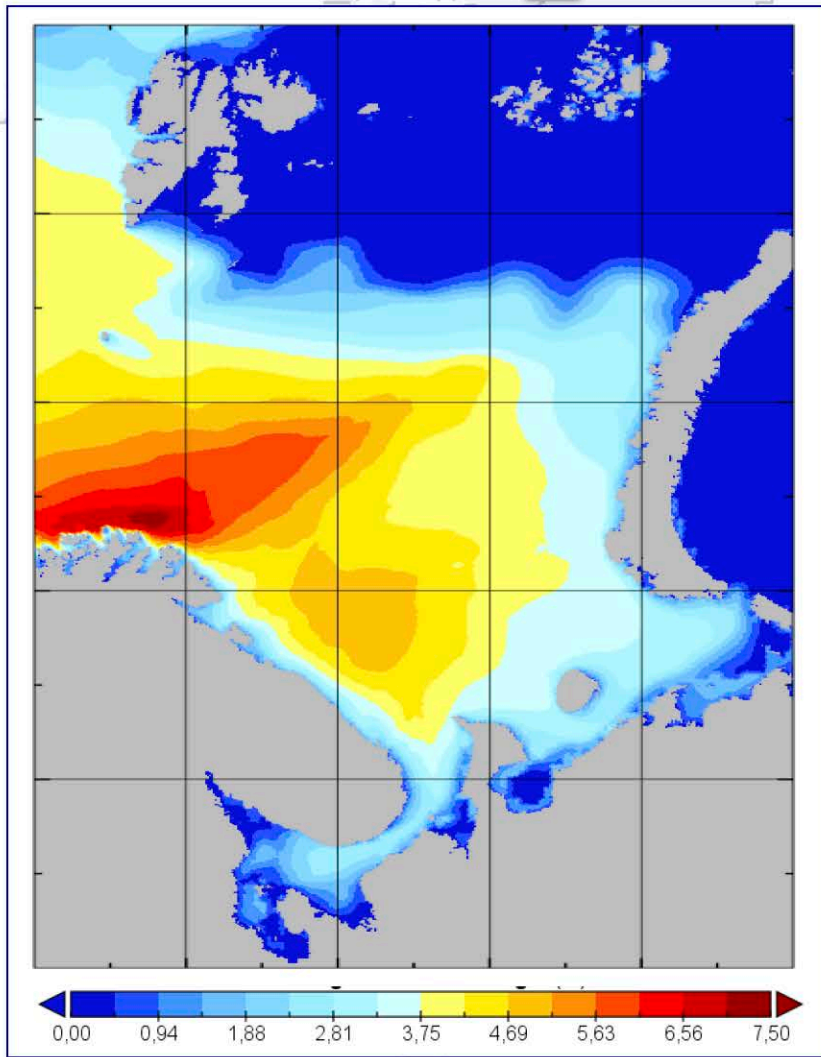
В настоящее время существует большое количество различных моделей волнения Черного моря, которые представляют собой адаптацию основных дискретных спектральных моделей.

Среди таких моделей наиболее широкое распространение получили следующие:

- WAM (Wave Model) разработана международной группой ученых WAMDI (Wave Modeling Group) в 1988 г. Применяется в оперативной практике Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF).
- WaveWatch разработана в Национальном центре прогнозирования окружающей среды США (National Centers for Environmental Prediction – NCEP) и используется для диагноза и прогноза волнения в центре прогнозов Национальной службы погоды США (National Weather Service – NWS).
- SWAN (Simulating Waves Near Shore) создана в Дельфтском технологическом институте (Нидерланды) и предназначена для расчета волн в мелководных прибрежных районах.



# Волновой реанализ ARCTIC\_MULTIYEAR\_WAV\_002\_013



В волновом реанализе ARCTIC\_MULTIYEAR\_WAV\_002\_013 представлены результаты расчетов по модели WAM с пространственным разрешением ~ 3 км временным шагом 1 час начиная с 1999 года по настоящее время. В качестве атмосферного форсинга использовался реанализ атмосферы ERA-5 ECMWF.

*Значимые высоты волн по данным волнового реанализа на 1 января 1993 00:00.*



# Основы статистического анализа результатов калибровки значимых высот волн

Анализ результатов калибровки SWH выполнялся на основе следующих статистических характеристик разностей между данными спутниковой альтиметрии и измеренными значениями волномерными буями или результатам модельных расчетов:

- средние высоты волн, измеренными значениями волномерными буями или рассчитанные по модели:

$$MH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i,$$

- средние высоты волн, рассчитанные по данным альтиметрических измерений:

$$Mh_{swh} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{swh_i},$$

- среднее отклонение разницы измерений (*Mean Estimate – ME* или *bias*):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - h_{swh_i}),$$

- стандартное отклонение (*Standard Deviation – SD*) разницы измерений:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_i - h_{swh_i} - ME)^2},$$

# ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ КАЛИБРОВКИ ЗНАЧИМЫХ ВЫСОТ ВОЛН

- среднеквадратичная ошибка (*Root Mean Square Error – RSME*):

$$RMSE = \sqrt{ME^2 + SD^2},$$

- индекс рассеяния или индекс дисперсии (*Scatter Index – SI*):

$$SI = RMSE / Mh_{swh},$$

- коэффициент корреляции:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (H_i - MH)(h_{swh_i} - Mh_{swh})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (H_i - MH)^2 (h_{swh_i} - Mh_{swh})^2}},$$

- коэффициенты линейной регрессии:

$$h_{swh\_model} = b + a \cdot h_{swh\_alt},$$

- коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_{swh} - f(h_{swh}))^2}{\sum_{i=1}^N (h_{swh} - \bar{h}_{swh})^2},$$

где  $f(h_{swh})$  – значение SWH, рассчитанной по линии регрессии. В случае двух переменных коэффициент детерминации равен квадрату коэффициента корреляции.





# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников

Комплексный анализ показывает, что расчеты по модели WAM реанализа волнового поля хорошо согласуются с альтиметрическими измерениями. Это позволяет провести калибровку SWH по данным альтиметрических измерений спутников ERS-1/2, EnviSat, CryoSat-2, SARAL/AltiKa и Sentinel-3A/3B. Для этого первоначально была проведена фильтрация данных альтиметрических измерений SWH.

1. Использовались данные односекундного осреднения, которые формируются на основе 0,1 или 0,05 секундных данных
2. Отбрасывались данные в случае проведения измерений над сушей и льдом с использованием соответствующего флага в исходных данных. Дополнительно использовалась маска «вода–суша», построенная по цифровой модели рельефа ETOPO1 с учетом параметров модели волнения, которая использовалась при создании волнового реанализа .
3. Отбрасывались данные измерений на расстоянии менее 10 км от береговой линии.





# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников

4. Для двухчастотных альтиметров отбраковывались данные не удовлетворяющие условию  $|h_{swh\_band\_1} - h_{swh\_band\_2}| < 1$ .
5. Значимые высоты волн отвечающие условию  $h_{swh} < 0,2$  отбраковывались.
6. Данные альтиметрических измерений отбраковываются если:

$$|h_{swh} - \bar{h}_{swh}| / \sigma_{h_{swh}} > 2,$$

где  $\bar{h}_{swh}$  – среднее значение SWH на участке трека, который отобран для калибровки,  $\sigma_{h_{swh}}$  – среднеквадратичное отклонение значимых высот волн на этом же интервале осреднения.

7. При наличии существенных выбросов в ряде измерений вдоль трека. Данные со всего трека отбрасывались если  $\sigma_{h_{swh}} / h_{swh} > 0,5$ .
8. Сглаживание данных вдоль трека фильтром Гаусса

$$h_{swh}(i) = \sum_{l=-n}^n h_{swh}(i-l) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{l^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $l = 1$  – радиус размытия и  $\sigma = 2,0$  – стандартное отклонение распределения Гаусса.

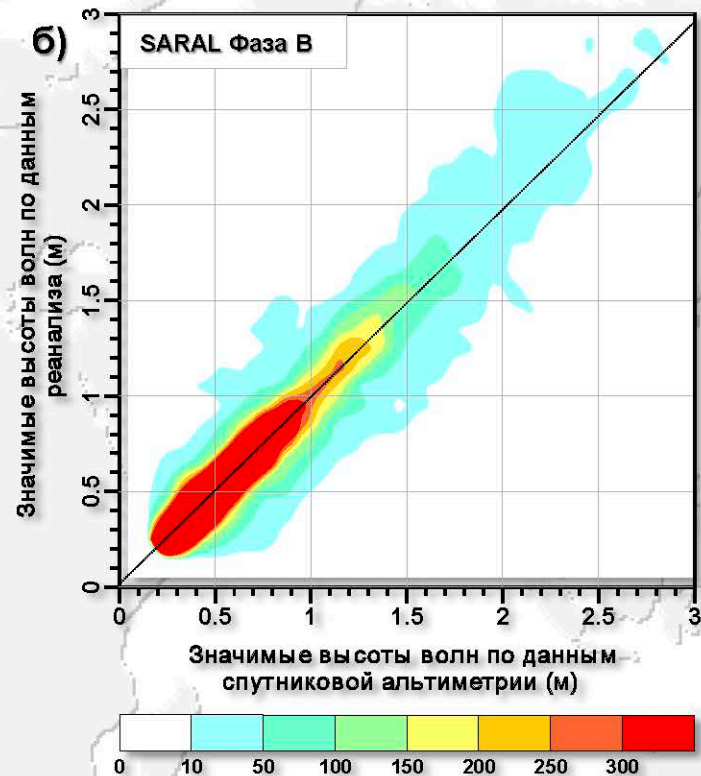
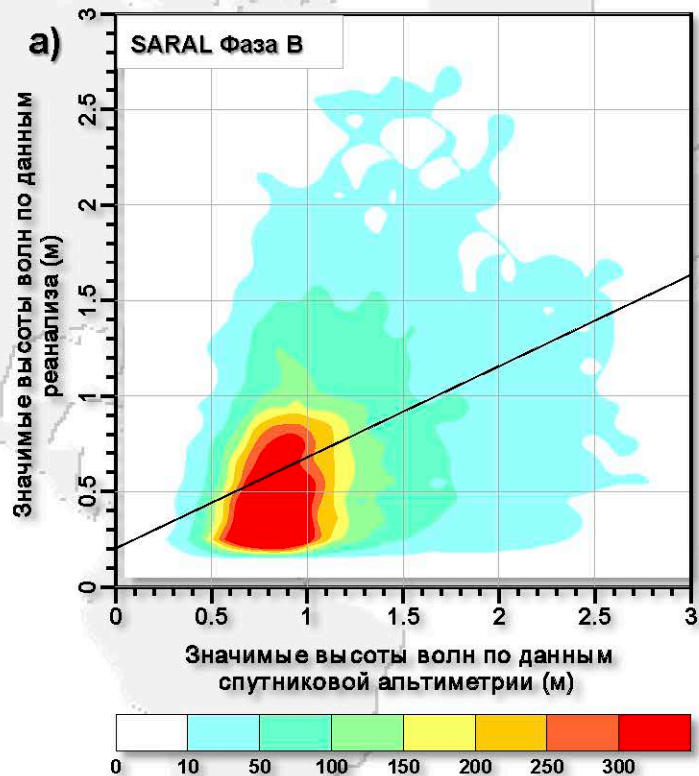


# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников

Спутник	Число измерений	Коэффициенты линии регрессии		ME	SD	RMS E	SI	R	R <sup>2</sup>
		b	a						
ERS-1	810795	0,0090	0,9878	0,0025	0,1651	0,1652	0,1694	0,9544	0,9893
ERS-2	744835	0,1149	0,9736	0,0044	0,1747	0,1748	0,1913	0,9498	0,9680
ENVISAT	2070973	0,2612	0,9800	0,0034	0,1695	0,1696	0,1809	0,9533	0,9934
CRYOSAT-2	731464	0,1066	0,9478	0,0087	0,1782	0,1784	0,2206	0,9459	0,9994
SARAL	1964669	0,1878	0,9597	0,0050	0,2175	0,2175	0,2602	0,9134	0,9950
Sentinel-3A	1739116	0,1458	0,9584	0,0057	0,2165	0,2166	0,2522	0,9132	0,9933



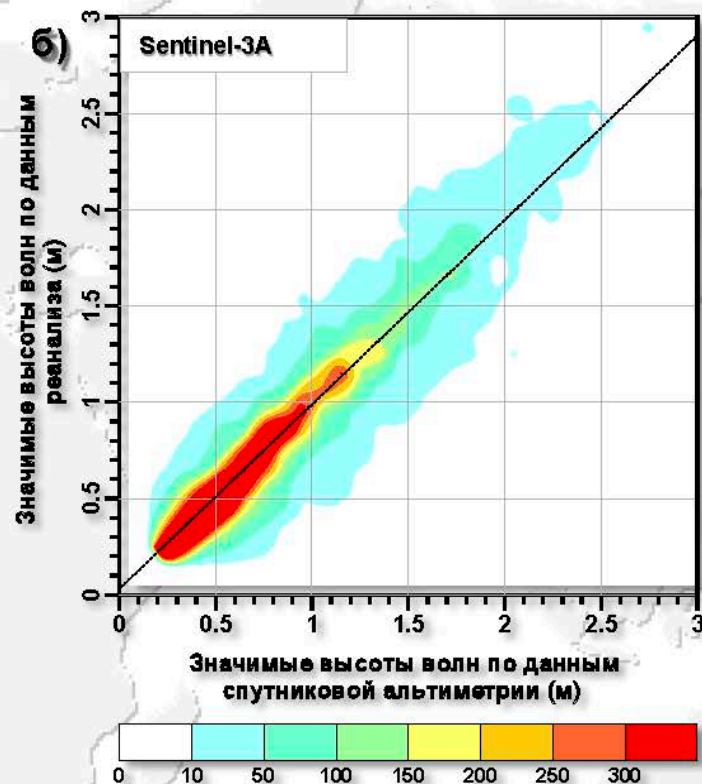
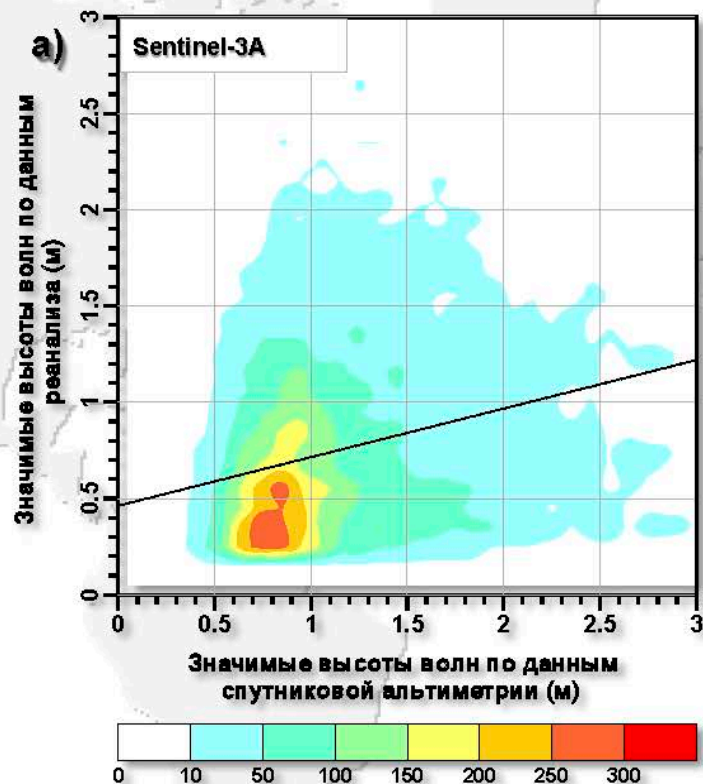
# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутника SARAL/AltiKa



Диаграммы рассеивания альтиметрических измерений SWH спутника SARAL Фаза В за июля 2016 г. – декабрь 2020 г. до (а) и после (б) отбраковки данных и данных реанализа волнового поля .



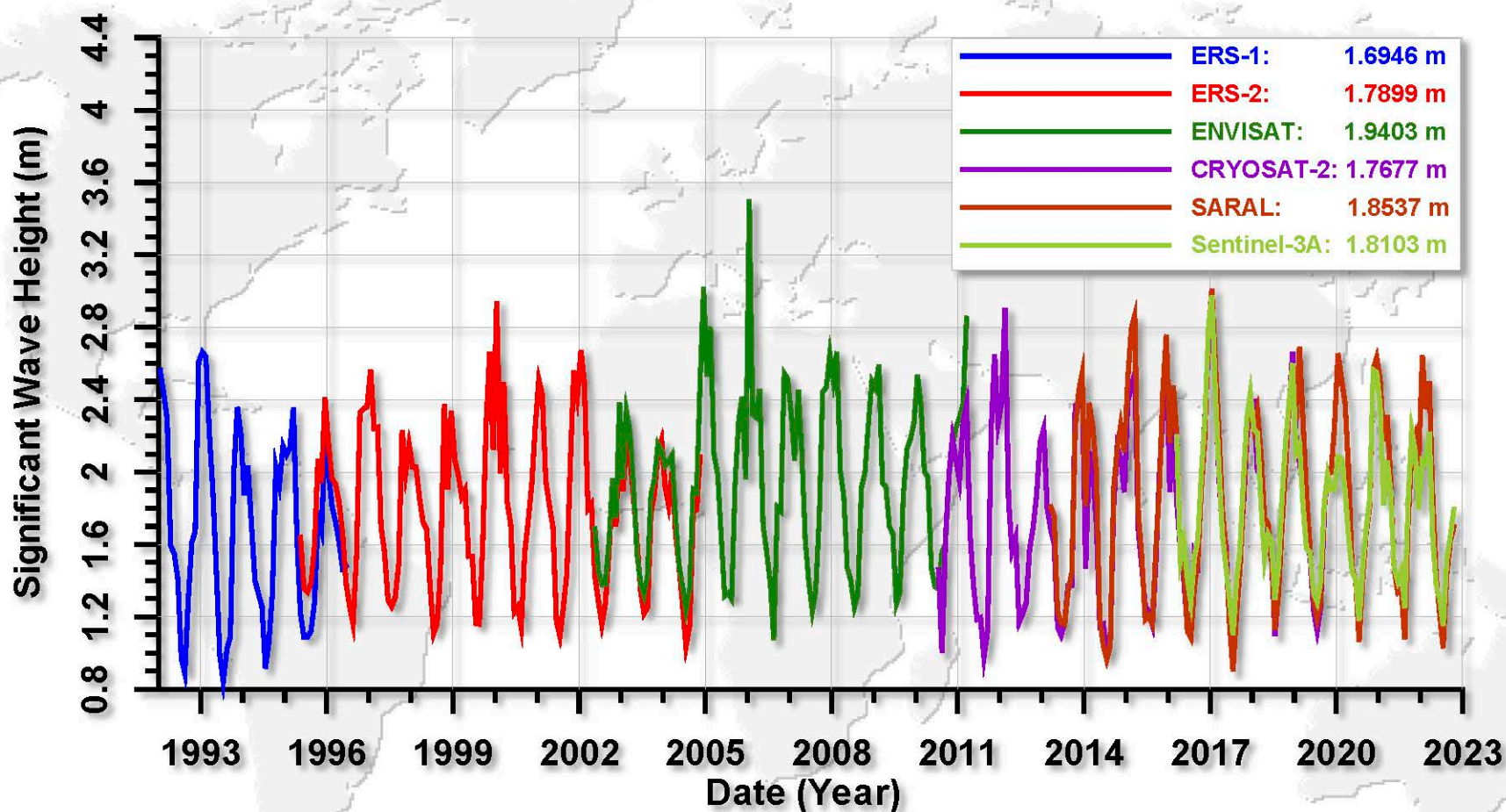
# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутника Sentinel-3A



Диаграммы рассеивания альтиметрических измерений SWH спутника Sentinel-3A за март 2016 г. – декабрь 2020 г. до (а) и после (б) отбраковки данных и данных реанализа волнового поля .



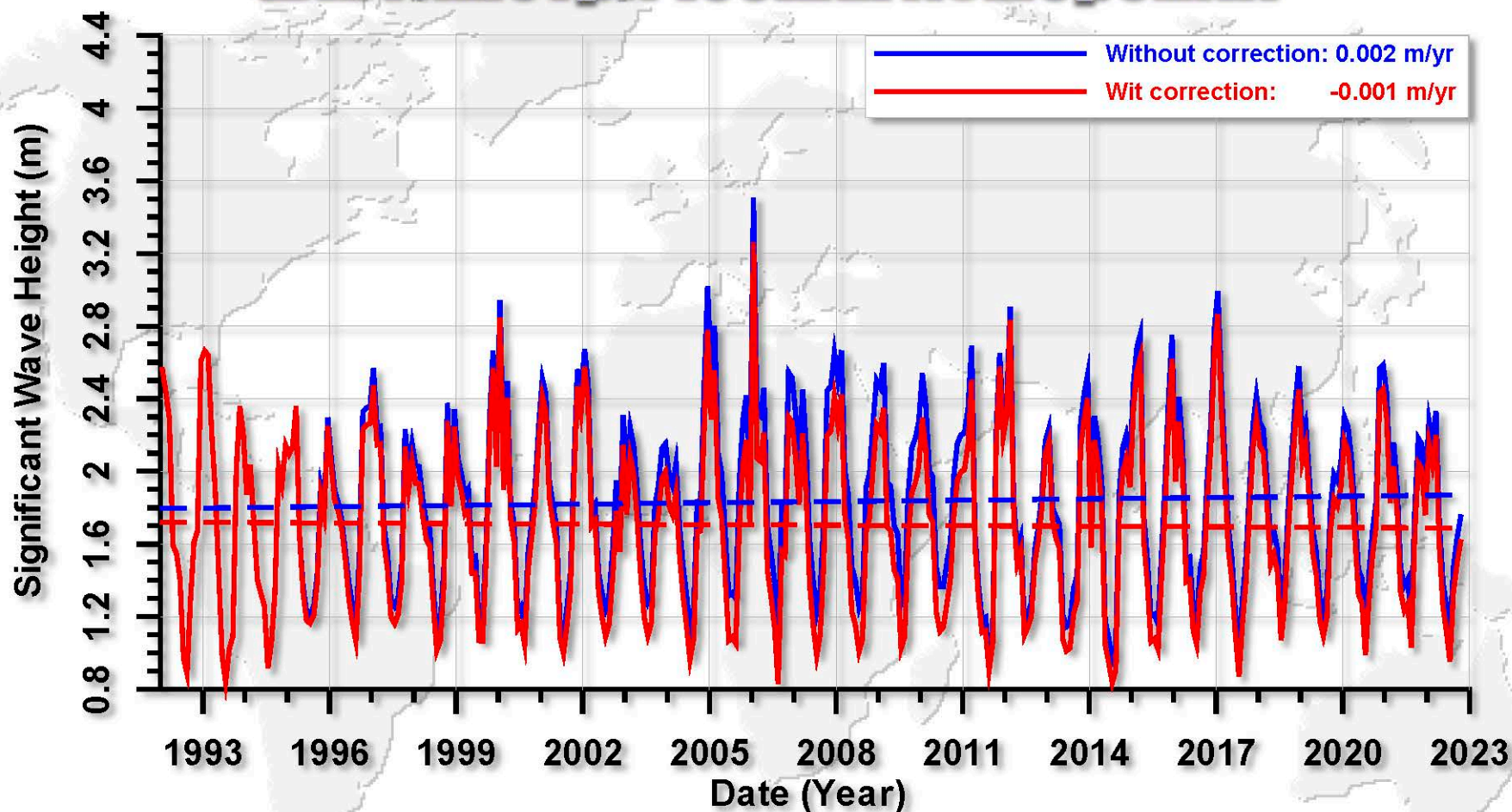
# Межгодовая изменчивость SWH по данным альтиметрических измерений



Временной ход SWH по данным спутников ERS-1/2, EnviSat, CryoSat-2, SARAL/AltiKa и Sentinel-3A/3B до приведения их к единой системе отсчета



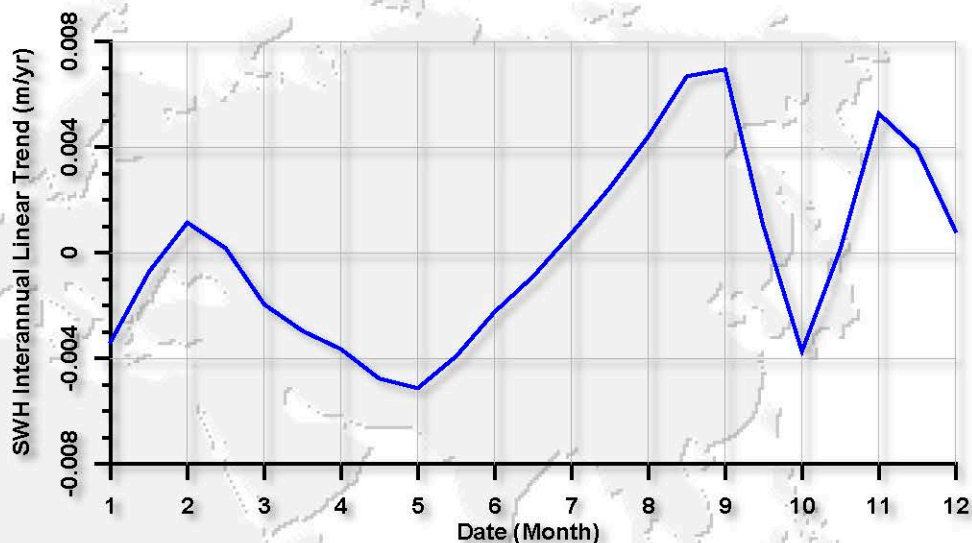
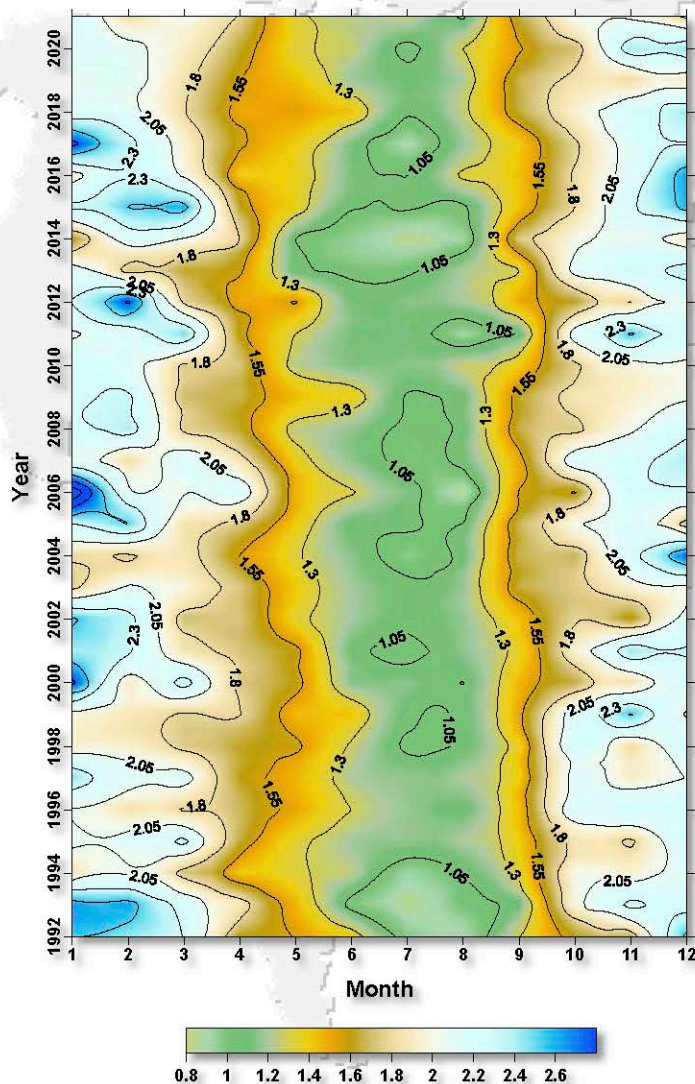
# Межгодовая изменчивость SWH по данным альтиметрических измерений



Временной ход SWH по данным спутников ERS-1/2, EnviSat, CryoSat-2, SARAL/AltiKa и Sentinel-3A/3B до приведения их к единой системе отсчета



# Сезонная изменчивость SWH по данным альтиметрических измерений



Межгодовой тренд SWH по данным спутниковой альтиметрии

Сезонный ход SWH по данным спутников ERS-1/2, EnviSat, CryoSat-2, SARAL/AltiKa и Sentinel-3A/3B до приведения их к единой системе отсчета



# Заключение

- Общая климатическая тенденция снижения значимых высот волн в Баренцевом море имеет тенденция к снижению  $-0,001$  м/год
- Максимальная скорость значимых высот волн наблюдается более  $0,001$  м/год, а минимальная в мае  $-0,005$  м/год.
- В целом можно сказать, что значительной межгодовой тенденции изменчивости значимых высот волн на акватории Баренцева моря не изменяется.

*Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 21–77–30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта»*



An aerial photograph of a forest with a road winding through it. The text "Спасибо за внимание" is overlaid in the center.

**Спасибо за внимание**

