



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИБРАЭ РАН)

Комплексная система гидрометеорологического прогноза: реализация для района Северного морского пути и верификация результатов расчётов.

Авторы: Бутаков Н.Ю., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю.
Научный руководитель: д.ф.-м.н., зав. лаб. ИБРАЭ РАН Рубинштейн К.Г.

Цель и задачи работы

Цель: реализация комплексной системы прогноза ледовой обстановки, состояния океана и атмосферы для области пролегания СМП.

Задачи:

- Расчёт параметров состояния атмосферы, океана и морского льда для Арктики.
- Верификация предварительных результатов расчёта.



Актуальность

❖ Гидрометеорологическое обеспечение судоходства на Северном морском пути.

Точные прогнозы ледовой обстановки, океанических и атмосферных параметров помогают предотвратить аварии, снизить транспортные расходы и обеспечить безопасность маршрутов атомных ледоколов.

❖ Решение существующих радиационно-экологических проблем арктической зоны.

В настоящее время на дне морей северо-западной Арктики находятся около 18 тысяч затопленных объектов различной степени радиационной опасности.

❖ Расчёт гидрометеорологических параметров для полярных АЭС.

За северным полярным кругом действуют Кольская и Билибинская АЭС, а также плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов».

Актуальность

- ❖ **Гидрометеорологическое обеспечение судоходства на Северном морском пути.**

Точные прогнозы ледовой обстановки, океанических и атмосферных параметров помогают предотвратить аварии, снизить транспортные расходы и обеспечить безопасность маршрутов атомных ледоколов.

- ❖ **Решение существующих радиационно-экологических проблем арктической зоны.**

В настоящее время на дне морей северо-западной Арктики находятся около 18 тысяч затопленных объектов различной степени радиационной опасности.

- ❖ **Расчёт гидрометеорологических параметров для полярных АЭС.**

За северным полярным кругом действуют Кольская и Билибинская АЭС, а также плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов».

Актуальность

- ❖ **Гидрометеорологическое обеспечение судоходства на Северном морском пути.**

Точные прогнозы ледовой обстановки, океанических и атмосферных параметров помогают предотвратить аварии, снизить транспортные расходы и обеспечить безопасность маршрутов атомных ледоколов.

- ❖ **Решение существующих радиационно-экологических проблем арктической зоны.**

В настоящее время на дне морей северо-западной Арктики находятся около 18 тысяч затопленных объектов различной степени радиационной опасности.

- ❖ **Расчёт гидрометеорологических параметров для полярных АЭС.**

За северным полярным кругом действуют Кольская и Билибинская АЭС, а также плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов».

Общая информация о моделях

WRF (Weather Research and Forecasting) – современная мезомасштабная модель численного прогноза погоды, предназначенная как для атмосферных исследований, так и для оперативного прогноза. Модель служит для широкого круга метеорологических задач в масштабах от десятков метров до тысяч километров [1].



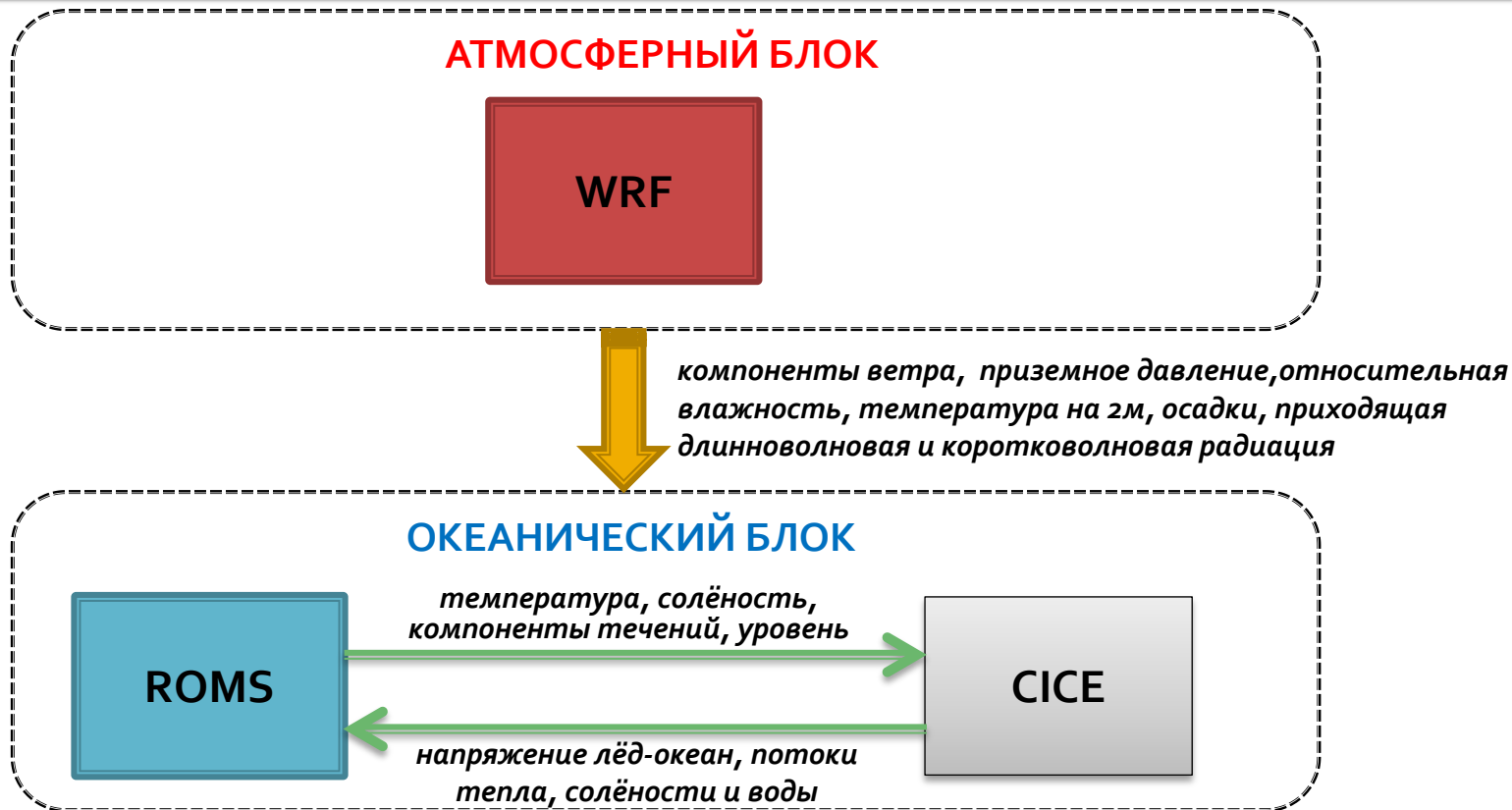
ROMS (Regional Ocean Modeling System) – трехмерная модель океана со свободной поверхностью, с вертикальными координатами в системе сигма, которые зависят от рельефа дна [2].



CICE (Community Ice CodE) – модель для прогноза роста, таяния и движения полярного морского льда [3].



Схема комплексной системы

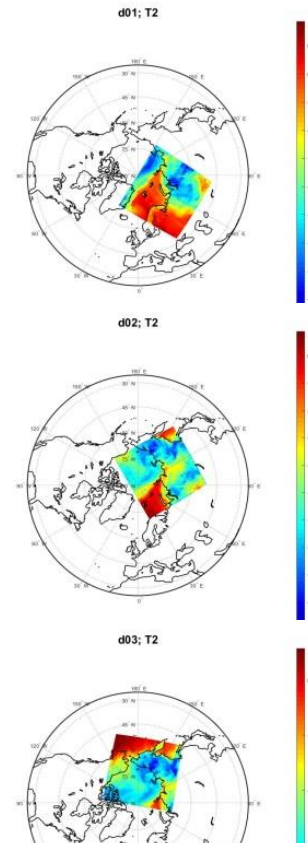


Конфигурация моделей

	WRF	ROMS	CICE
Шаг по времени	72 с	15 с	15 с
Расчётная сетка	3 домена 240x240	791x86	791x86
Шаг сетки	18x18 км	0.2x0.2°	0.2x0.2°
Заблаговременность	27 ч	31 день	31 день
НГУ	Прогноз глобальной модели GFS [4]	Прогноз глобальной модели HYCOM-CICE [5]	Прогноз глобальной модели HYCOM-CICE
Приливы	—	Рассчитывались по данным атласа TPXO [6]	—
Батиметрия	—	GEBCO [7]	GEBCO

Период моделирования с 01.01.2023 по 01.02.2023

- **На первом этапе** был произведён расчёт атмосферных параметров по модели WRF.
- **На втором этапе** с использованием результатов расчёта WRF в качестве атмосферного форсинга был произведён расчёт состояния океана и морского льда по связанной модели ROMS-CICE.



Конфигурация моделей

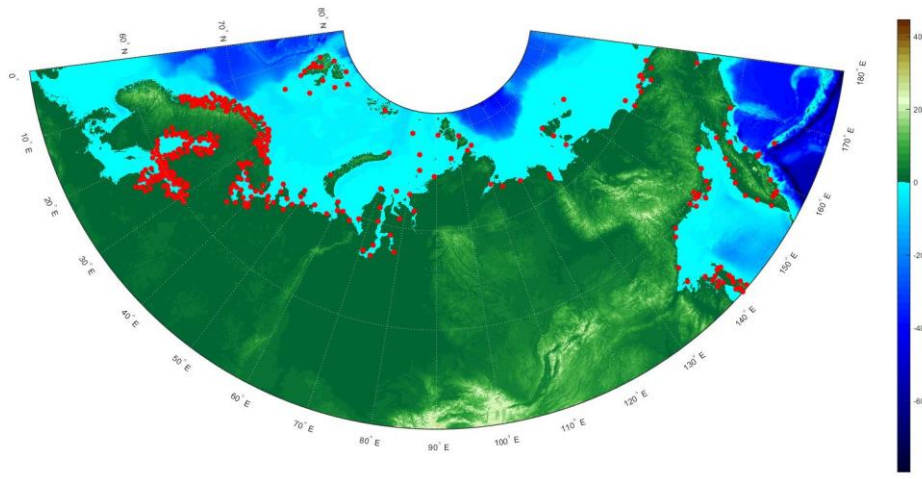
Модель	Физика	Название схемы	
WRF	Микрофизика	Thompson [8]	
	Радиация	RRTMG [9]	
	Пограничный слой	MYNN Level 2.5 [10]	
	Приземный слой	MYNN	
	Поверхностный слой земли	Noah-MP [11]	
	Конвекция	Kain–Fritsch [12]	
ROMS	Вертикальное турбулентное перемешивание	GLS [13]	
	Граничные условия на открытых границах (Север, Запад, Восток)	Уровень	Chapman bc [14]
		Компоненты скорости течений	Radiation bc [15]
		Температура	Radiation bc
		Солёность	Radiation bc
		Турбулентная кинетическая энергия	Gradient bc
CICE	Термодинамика	Bitz and Lipscomb model [16]	
	Температура замерзания воды	Линейная функция солёности	
	Граничные условия на открытых границах (Север, Запад, Восток)	Концентрация льда	Mixed radiation-nudging bc [17]
		Толщина льда	Mixed radiation-nudging bc
		Толщина снега	Mixed radiation-nudging bc
		Компоненты дрейфа льда	Radiation bc

Верификация результатов расчёта атмосферы

Оценки считались по данным наблюдений с прибрежных и островных метеостанций NOAA [4].

	Температура (°C)		Скорость ветра (м/с)		Направление ветра (°)		Осадки (мм/12 ч)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-1.90	-1.77	0.84	0.70	5.80	-	0.04	0.04
MAE	3.20	3.30	2.60	2.46	14.99	-	0.47	0.30
RMSE	4.35	4.31	3.42	3.25	-	-	0.82	0.54

- Прогноз температуры и скорости ветра для арктического региона имеет бóльшие ошибки, чем для умеренных широт, что обусловлено сложностью происходящих в Арктике метеорологических процессов, включая сильное влияние арктических морей на атмосферные процессы в данном регионе.
- Недооценка рассчитанной приземной температуры почвы на 2°C.



Верификация результатов расчёта атмосферы

Оценки считались по данным наблюдений с прибрежных и островных метеостанций NOAA [4].

	Температура (°C)		Скорость ветра (м/с)		Направление ветра (°)		Осадки (мм/12 ч)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-1.90	-1.77	0.84	0.70	5.80	-	0.04	0.04
MAE	3.20	3.30	2.60	2.46	14.99	-	0.47	0.30
RMSE	4.35	4.31	3.42	3.25	-	-	0.82	0.54

➤ Прогноз температуры и скорости ветра для арктического региона имеет бóльшие ошибки, чем для умеренных широт, что обусловлено сложностью происходящих в Арктике метеорологических процессов, включая сильное влияние арктических морей на атмосферные процессы в данном регионе.

➤ Недооценка рассчитанной приземной температуры почти на 2°C.

Верификация результатов расчёта атмосферы

Оценки считались по данным наблюдений с прибрежных и островных метеостанций NOAA [4].

	Температура (°C)		Скорость ветра (м/с)		Направление ветра (°)		Осадки (мм/12 ч)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-1.90	-1.77	0.84	0.70	5.80	-	0.04	0.04
MAE	3.20	3.30	2.60	2.46	14.99	-	0.47	0.30
RMSE	4.35	4.31	3.42	3.25	-	-	0.82	0.54

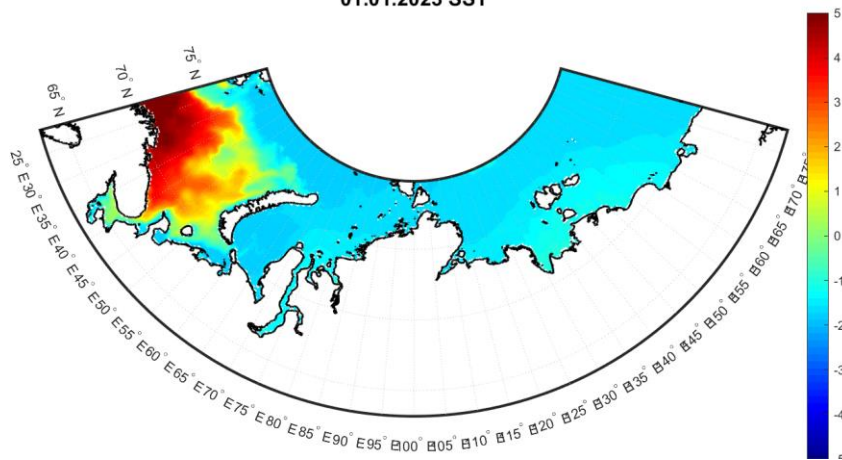
➤ Прогноз температуры и скорости ветра для арктического региона имеет бóльшие ошибки, чем для умеренных широт, что обусловлено сложностью происходящих в Арктике метеорологических процессов, включая сильное влияние арктических морей на атмосферные процессы в данном регионе.

➤ Недооценка рассчитанной приземной температуры почти на 2°C.

Результаты расчёта океана

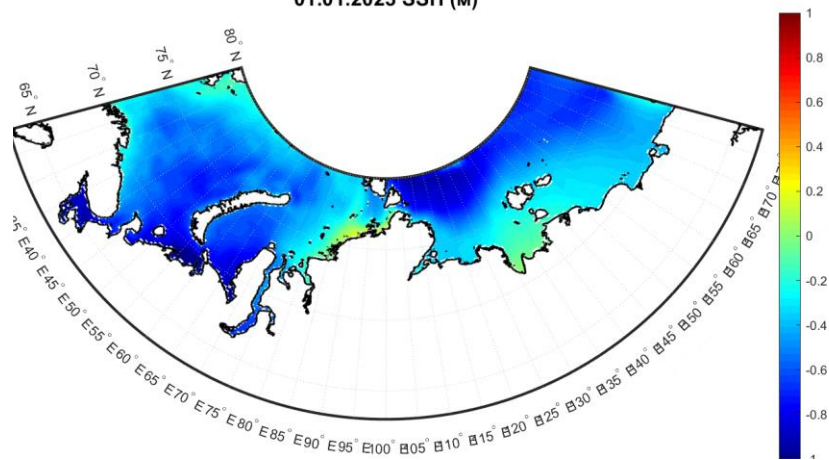
Температура поверхности моря (°C)

01.01.2023 SST



Уровень (м)

01.01.2023 SSH (м)

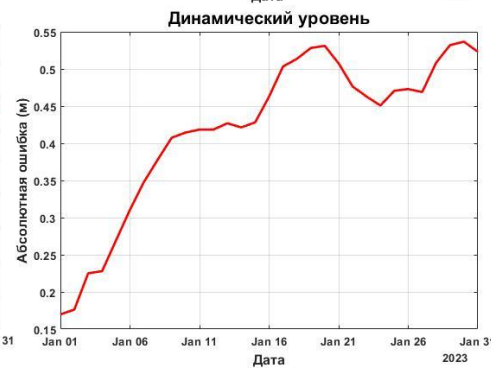
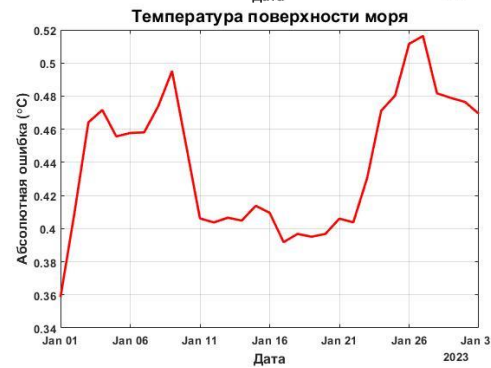
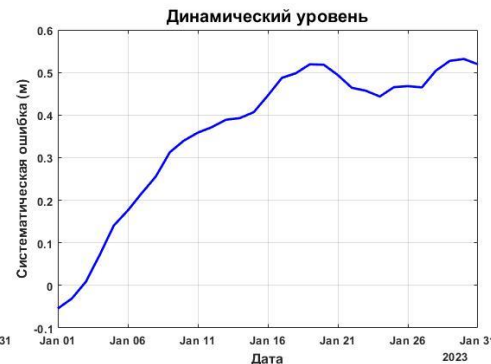


Верификация результатов расчёта океана

Оценки качества прогноза температуры поверхности моря считались по данным реанализа OISST [18].
Оценки качества прогноза уровня моря считались по данным реанализа GLORYS12V1 [19].

	Температура поверхности моря (°C)		Уровень (м)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-0.42	-0.44	0.36	0.44
MAE	0.44	0.45	0.42	0.45

- Абсолютная ошибка прогноза температуры поверхности моря меньше 0.5°C , что для Арктики является хорошим показателем.
- Рассчитанная температура поверхности моря ниже, температуры из реанализа, что связано с недооценкой рассчитанной при помощи WRF приземной температуры.
- Систематическое завышение рассчитанного уровня на 36 см.
- Рост ошибок прогноза уровня с увеличением заблаговременности.

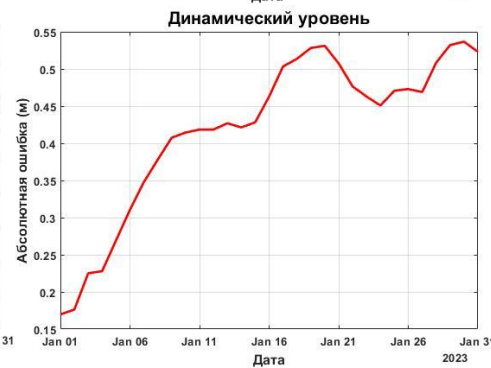
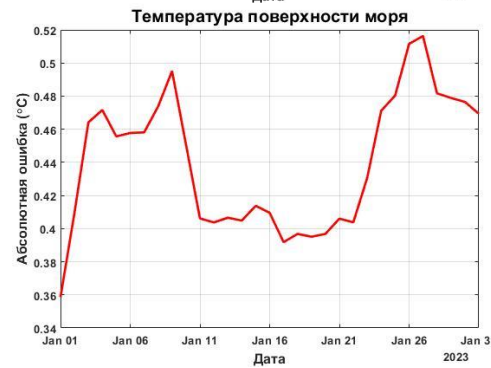
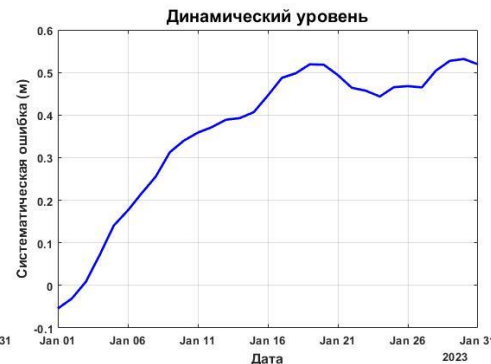


Верификация результатов расчёта океана

Оценки качества прогноза температуры поверхности моря считались по данным реанализа OISST [18].
Оценки качества прогноза уровня моря считались по данным реанализа GLORYS12V1 [19].

	Температура поверхности моря (°C)		Уровень (м)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-0.42	-0.44	0.36	0.44
MAE	0.44	0.45	0.42	0.45

- Абсолютная ошибка прогноза температуры поверхности моря меньше 0.5°C , что для Арктики является хорошим показателем.
- Рассчитанная температура поверхности моря ниже, температуры из реанализа, что связано с недооценкой рассчитанной при помощи WRF приземной температуры.
- Систематическое завышение рассчитанного уровня на 36 см.
- Рост ошибок прогноза уровня с увеличением заблаговременности.



Верификация результатов расчёта океана

Оценки качества прогноза температуры поверхности моря считались по данным реанализа OISST [18].
Оценки качества прогноза уровня моря считались по данным реанализа GLORYS12V1 [19].

	Температура поверхности моря (°C)		Уровень (м)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-0.42	-0.44	0.36	0.44
MAE	0.44	0.45	0.42	0.45

➤ Абсолютная ошибка прогноза температуры поверхности моря меньше 0.5°C, что для Арктики является хорошим показателем.

➤ **Рассчитанная температура поверхности моря ниже, температуры из реанализа, что связано с недооценкой рассчитанной при помощи WRF приземной температуры.**

	Температура воздуха (°C)	
	Среднее	Медиана
BIAS	-1.90	-1.77

➤ Систематическое завышение рассчитанного уровня на 36 см.

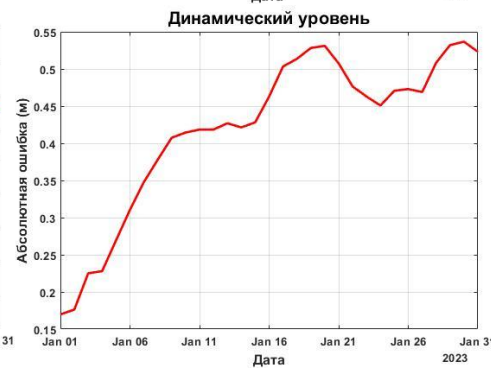
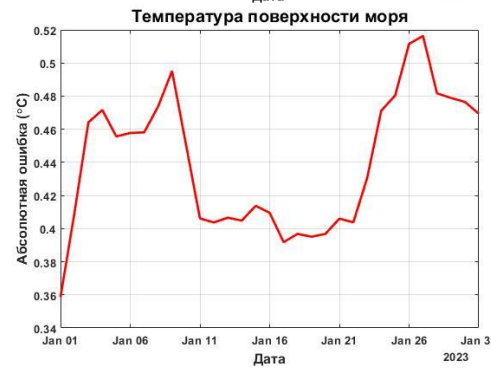
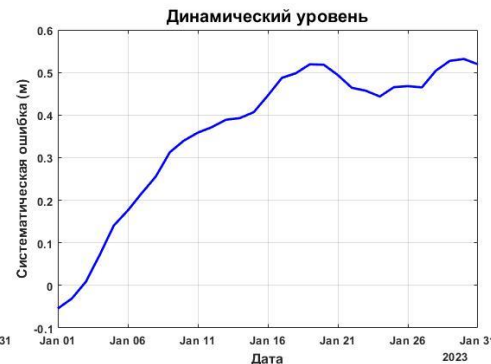
➤ Рост ошибок прогноза уровня с увеличением заблаговременности.

Верификация результатов расчёта океана

Оценки качества прогноза температуры поверхности моря считались по данным реанализа OISST [18].
Оценки качества прогноза уровня моря считались по данным реанализа GLORYS12V1 [19].

	Температура поверхности моря (°C)		Уровень (м)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-0.42	-0.44	0.36	0.44
MAE	0.44	0.45	0.42	0.45

- Абсолютная ошибка прогноза температуры поверхности моря меньше 0.5°C , что для Арктики является хорошим показателем.
- Рассчитанная температура поверхности моря ниже, температуры из реанализа, что связано с недооценкой рассчитанной при помощи WRF приземной температуры.
- **Систематическое завышение рассчитанного уровня на 36 см.**
- Рост ошибок прогноза уровня с увеличением заблаговременности.

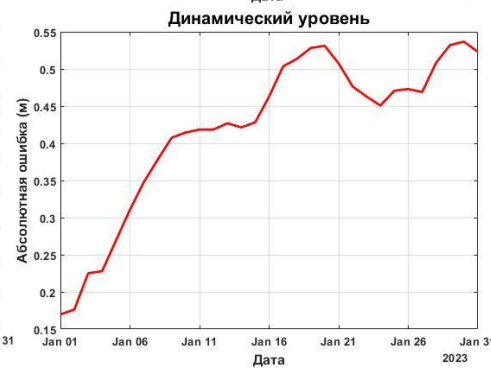
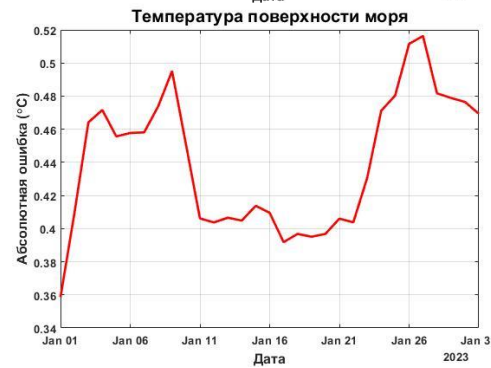
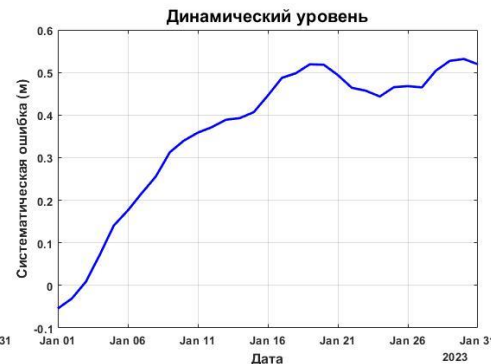


Верификация результатов расчёта океана

Оценки качества прогноза температуры поверхности моря считались по данным реанализа OISST [18].
Оценки качества прогноза уровня моря считались по данным реанализа GLORYS12V1 [19].

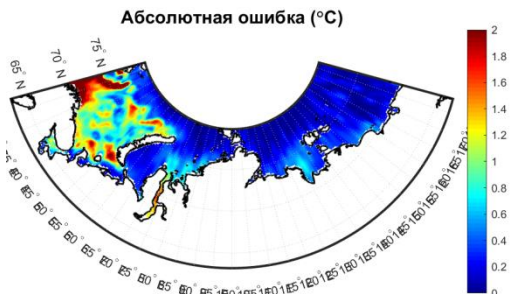
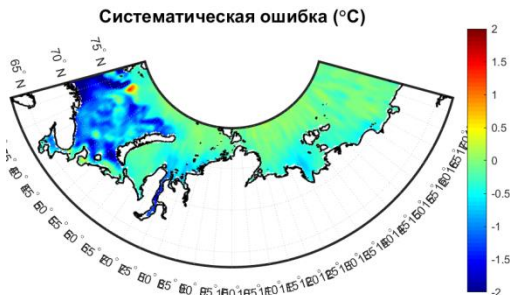
	Температура поверхности моря (°C)		Уровень (м)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-0.42	-0.44	0.36	0.44
MAE	0.44	0.45	0.42	0.45

- Абсолютная ошибка прогноза температуры поверхности моря меньше 0.5°C , что для Арктики является хорошим показателем.
- Рассчитанная температура поверхности моря ниже, температуры из реанализа, что связано с недооценкой рассчитанной при помощи WRF приземной температуры.
- Систематическое завышение рассчитанного уровня на 36 см.
- Рост ошибок прогноза уровня с увеличением заблаговременности.

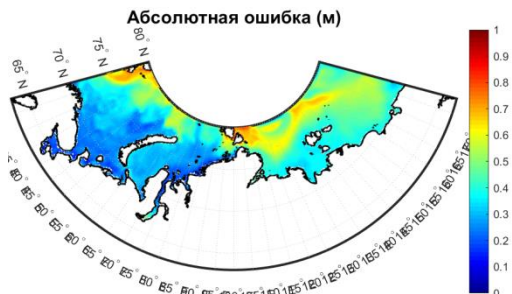
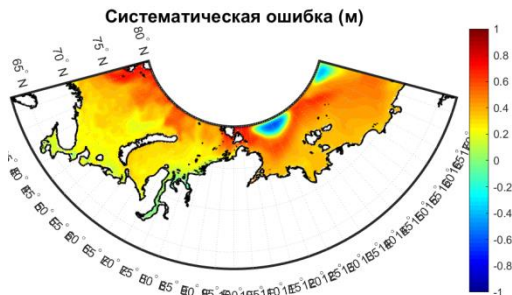


Верификация результатов расчёта океана

Температура поверхности моря (°C)



Уровень (м)

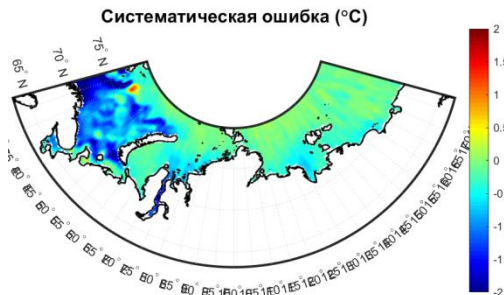


➤ Наибольшие ошибки прогноза температуры поверхности моря наблюдались в западной части расчётной области (особенно на западной границе), где рассчитанная температура поверхности моря ниже температуры по данным реанализа OISST на 2 °C.

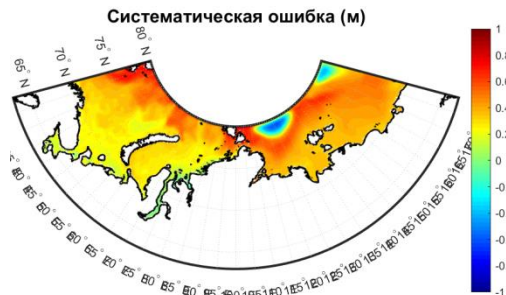
➤ Наибольшие ошибки прогноза уровня наблюдались на севере и северо-западе расчётной области вблизи открытых границ (MAE=0.7 м).

Верификация результатов расчёта океана

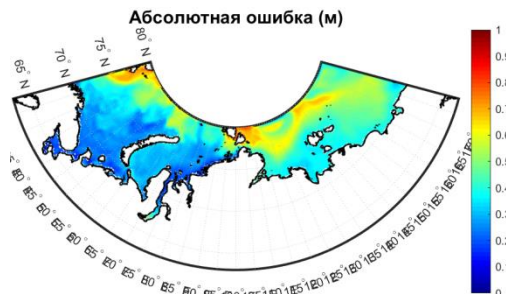
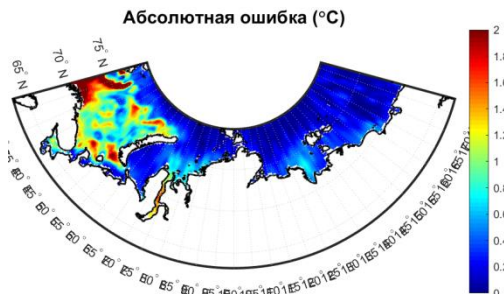
Температура поверхности моря (°C)



Уровень (м)



➤ Наибольшие ошибки прогноза температуры поверхности моря наблюдались в западной части расчётной области (особенно на западной границе), где рассчитанная температура поверхности моря ниже температуры по данным реанализа OISST на 2 °C.

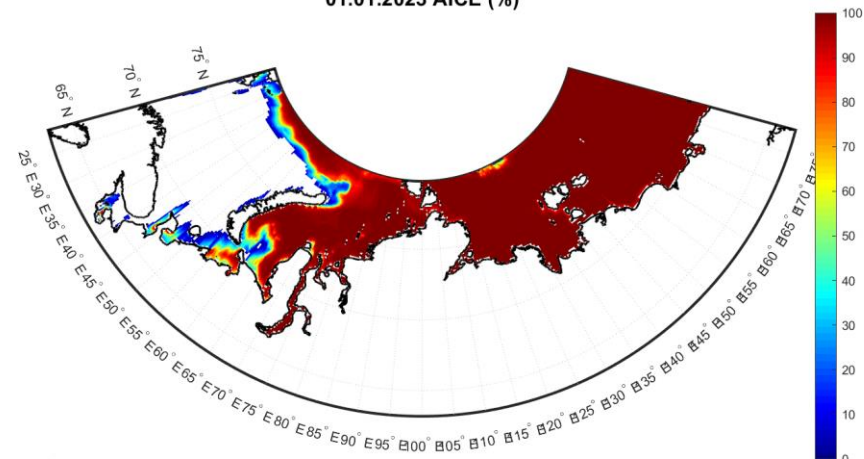


➤ Наибольшие ошибки прогноза уровня наблюдались на севере и северо-западе расчётной области вблизи открытых границ (MAE=0.7 м).

Результаты расчёта морского льда

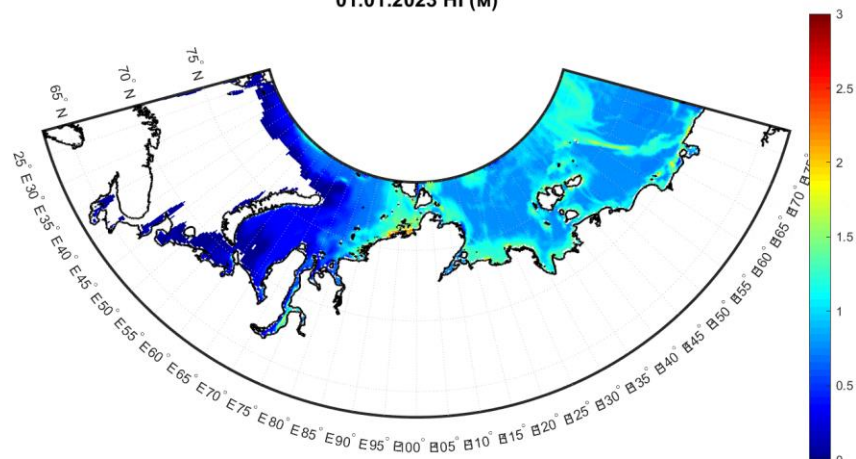
Сплочённость льда (%)

01.01.2023 AICE (%)



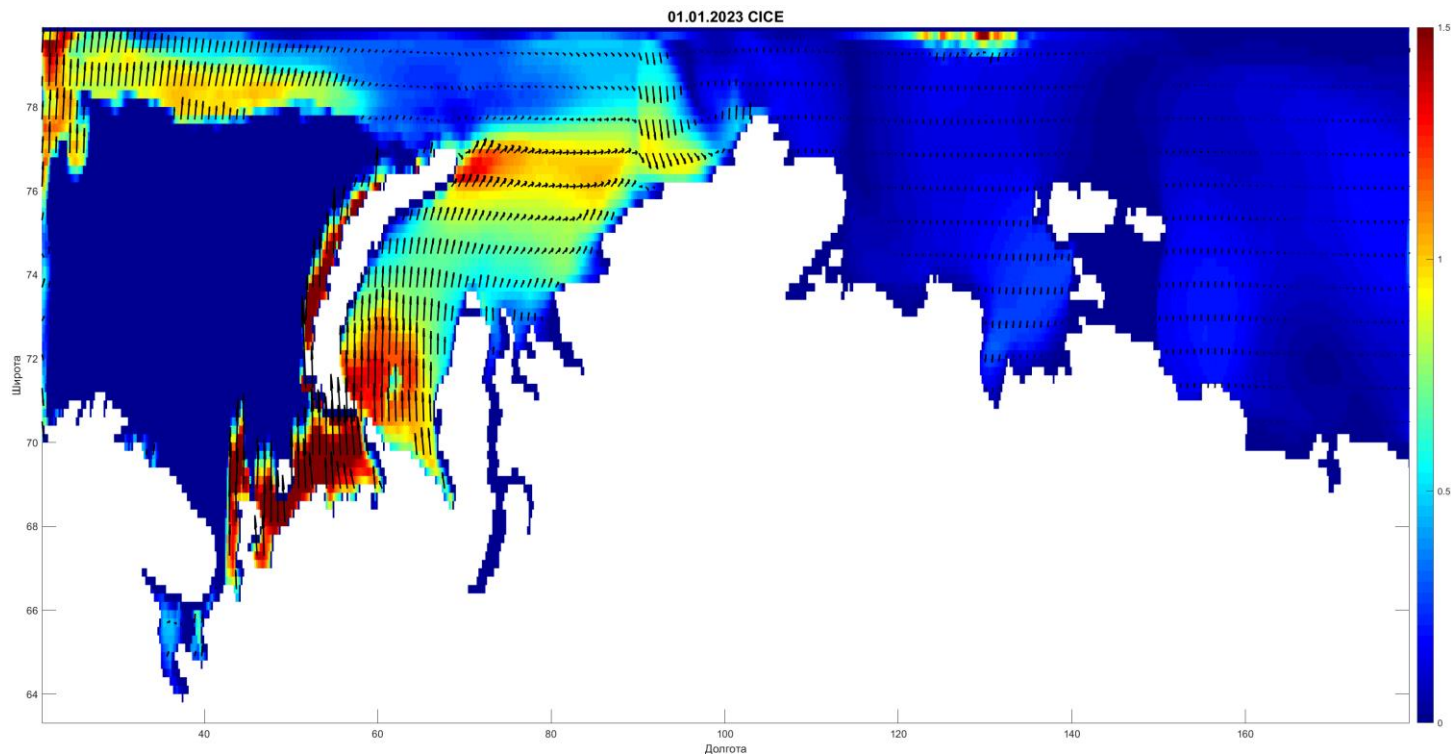
Толщина льда (м)

01.01.2023 HI (м)



Результаты расчёта морского льда

Скорость и направление дрейфа льда



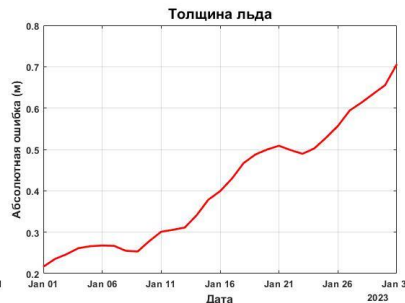
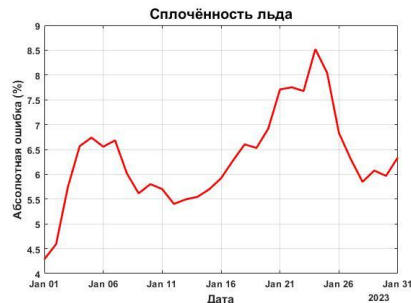
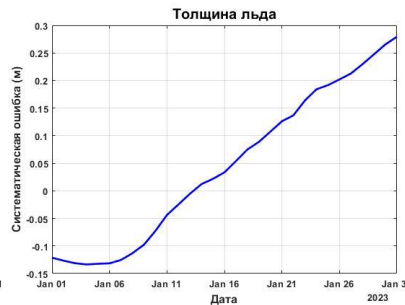
Верификация результатов расчёта морского льда

Оценки качества прогноза сплочённости считались по данным реанализа OISST.

Оценки качества прогноза толщины, скорости и направления дрейфа льда считались по данным реанализа GLORYS12V1.

	Сплочённость (%)		Толщина (м)		Скорость дрейфа (м/с)		Направление (°)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-1	-1	0.04	0.03	0.24	0.23	-24	-23
MAE	6	6	0.41	0.40	0.26	0.25	51	49

- Наблюдалась небольшая систематическая недооценка рассчитанной сплочённости морского льда и переоценка скорости дрейфа льда.
- Переоценку толщины морского льда можно объяснить недооценкой приземной температуры и температуры поверхности моря в атмосферной и океанической моделях.
- Качество прогноза толщины морского льда сильно зависит от заблаговременности.



Верификация результатов расчёта морского льда

Оценки качества прогноза сплочённости считались по данным реанализа OISST.

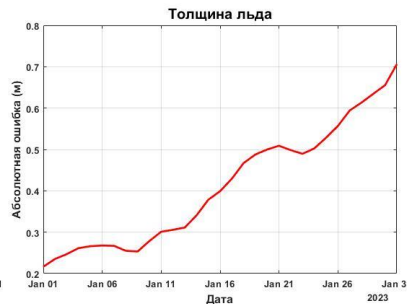
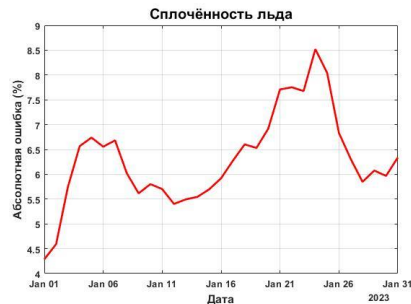
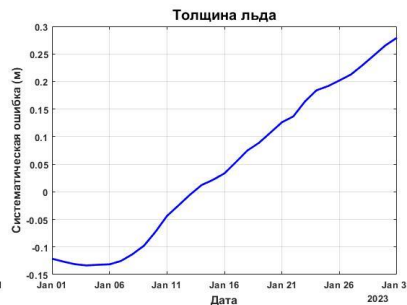
Оценки качества прогноза толщины, скорости и направления дрейфа льда считались по данным реанализа GLORYS12V1.

	Сплочённость (%)		Толщина (м)		Скорость дрейфа (м/с)		Направление (°)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-1	-1	0.04	0.03	0.24	0.23	-24	-23
MAE	6	6	0.41	0.40	0.26	0.25	51	49

➤ Наблюдалась небольшая систематическая недооценка рассчитанной сплочённости морского льда и переоценка скорости дрейфа льда.

➤ Переоценку толщины морского льда можно объяснить недооценкой приземной температуры и температуры поверхности моря в атмосферной и океанической моделях.

➤ Качество прогноза толщины морского льда сильно зависит от заблаговременности.

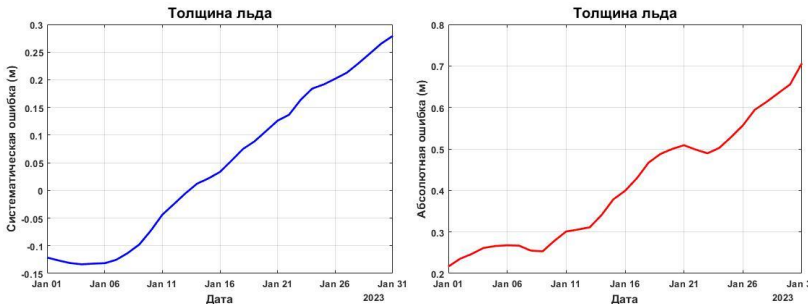


Верификация результатов расчёта морского льда

Оценки качества прогноза сплочённости считались по данным реанализа OISST.
Оценки качества прогноза толщины, скорости и направления дрейфа льда считались по данным реанализа GLORYS12V1.

	Сплочённость (%)		Толщина (м)		Скорость дрейфа (м/с)		Направление (°)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-1	-1	0.04	0.03	0.24	0.23	-24	-23
MAE	6	6	0.41	0.40	0.26	0.25	51	49

- Наблюдалась небольшая систематическая недооценка рассчитанной сплочённости морского льда и переоценка скорости дрейфа льда.
- **Переоценку толщины морского льда можно объяснить недооценкой приземной температуры и температуры поверхности моря в атмосферной и океанической моделях.**
- Качество прогноза толщины морского льда сильно зависит от заблаговременности.



	Температура воздуха (°C)		Температура поверхности моря (°C)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-1.90	-1.77	-0.42	-0.44

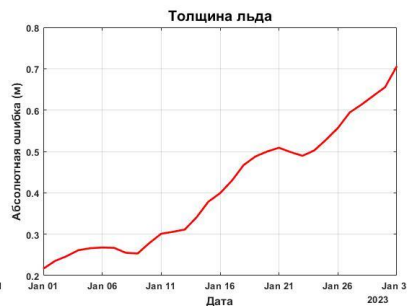
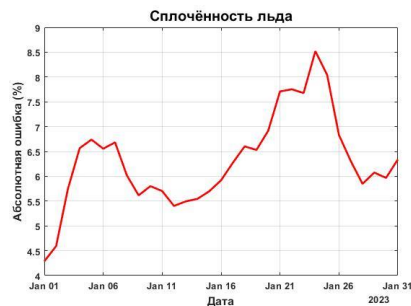
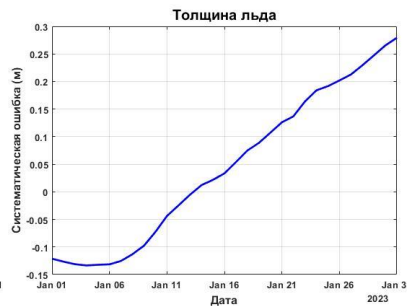
Верификация результатов расчёта морского льда

Оценки качества прогноза сплочённости считались по данным реанализа OISST.

Оценки качества прогноза толщины, скорости и направления дрейфа льда считались по данным реанализа GLORYS12V1.

	Сплочённость (%)		Толщина (м)		Скорость дрейфа (м/с)		Направление (°)	
	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
BIAS	-1	-1	0.04	0.03	0.24	0.23	-24	-23
MAE	6	6	0.41	0.40	0.26	0.25	51	49

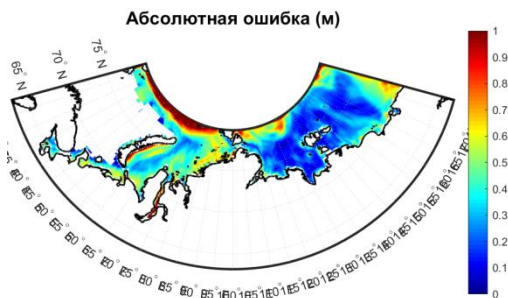
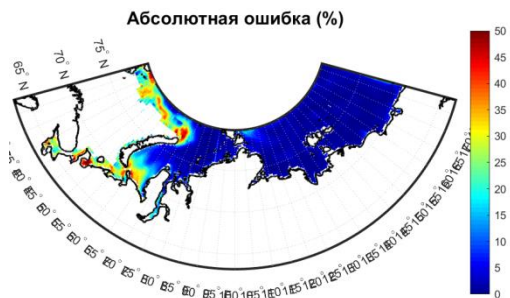
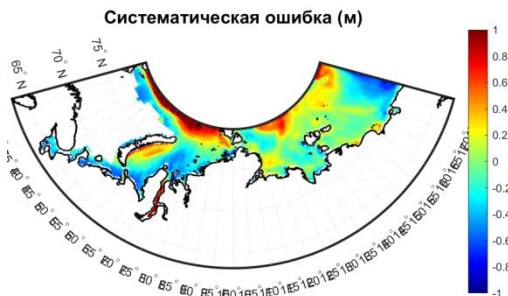
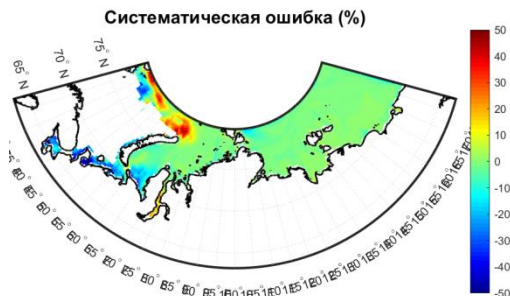
- Наблюдалась небольшая систематическая недооценка рассчитанной сплочённости морского льда и переоценка скорости дрейфа льда.
- Переоценку толщины морского льда можно объяснить недооценкой приземной температуры и температуры поверхности моря в атмосферной и океанической моделях.
- **Качество прогноза толщины морского льда сильно зависит от заблаговременности.**



Верификация результатов расчёта морского льда

Сплочённость льда (%)

Толщина льда (м)

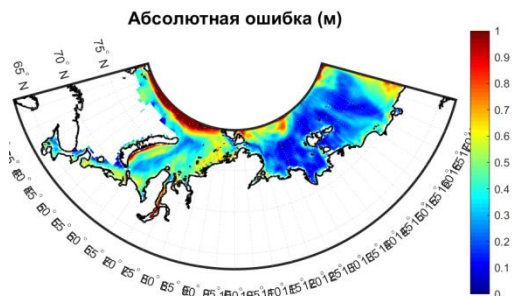
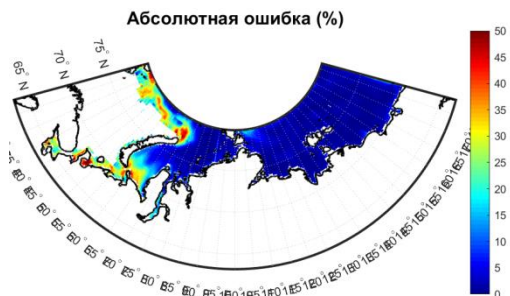
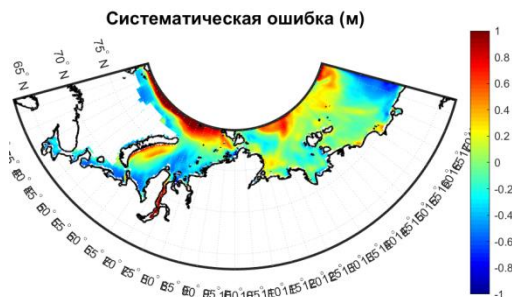
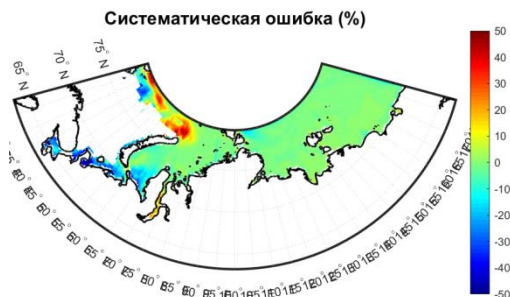


- **Наименьшие ошибки прогноза сплочённости и толщины льда наблюдались на востоке расчётной области.**
- Наибольшие ошибки прогноза сплочённости морского льда (до 50 %) наблюдались в западной части расчётной области, а именно для северной части Баренцева моря, Чешской губы и пролива Карские ворота.
- Для Чешской губы и пролива Карские ворота наблюдалось систематическое занижение спрогнозированной сплочённости морского льда. Для остальных районов расчётной области ошибки близки к нулю.
- Наибольшие ошибки толщины морского льда наблюдались на северо-западе расчётной области вблизи открытой границы и у восточного берега архипелага Новая Земля.

Верификация результатов расчёта морского льда

Сплочённость льда (%)

Толщина льда (м)

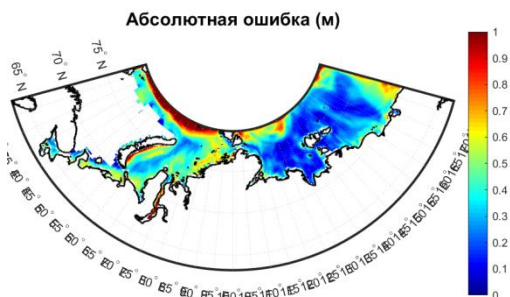
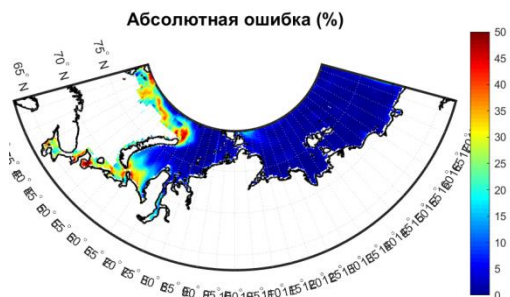
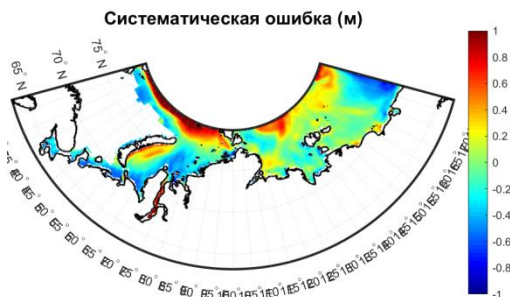
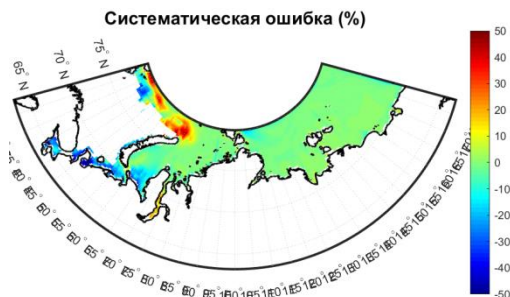


- Наименьшие ошибки прогноза сплочённости и толщины льда наблюдались на востоке расчётной области.
- **Наибольшие ошибки прогноза сплочённости морского льда (до 50 %) наблюдались в западной части расчётной области, а именно для северной части Баренцева моря, Чешской губы и пролива Карские ворота.**
- Для Чешской губы и пролива Карские ворота наблюдалось систематическое занижение спрогнозированной сплочённости морского льда. Для остальных районов расчётной области ошибки близки к нулю.
- Наибольшие ошибки толщины морского льда наблюдались на северо-западе расчётной области вблизи открытой границы и у восточного берега архипелага Новая Земля.

Верификация результатов расчёта морского льда

Сплочённость льда (%)

Толщина льда (м)

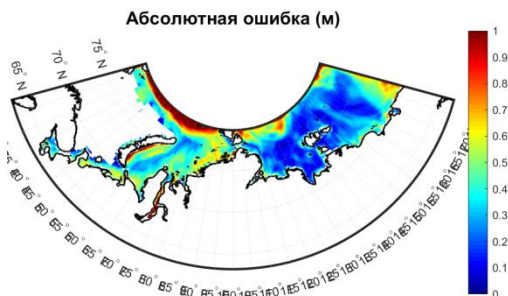
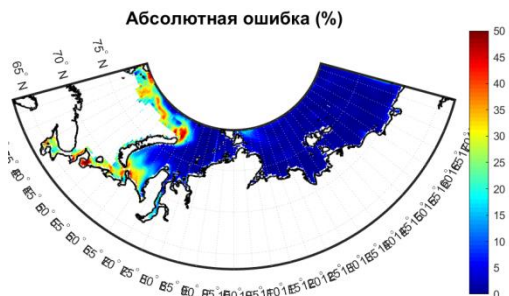
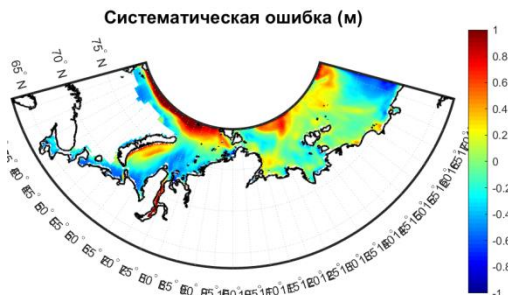
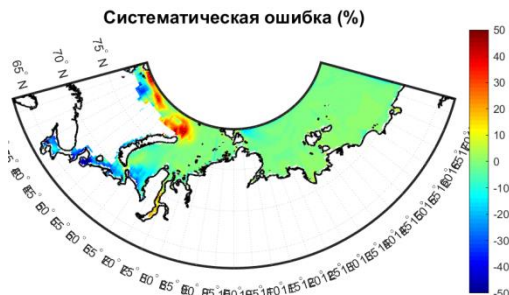


- Наименьшие ошибки прогноза сплочённости и толщины льда наблюдались на востоке расчётной области.
- Наибольшие ошибки прогноза сплочённости морского льда (до 50 %) наблюдались в западной части расчётной области, а именно для северной части Баренцева моря, Чешской губы и пролива Карские ворота.
- Для Чешской губы и пролива Карские ворота наблюдалось систематическое занижение спрогнозированной сплочённости морского льда. Для остальных районов расчётной области ошибки близки к нулю.
- Наибольшие ошибки толщины морского льда наблюдались на северо-западе расчётной области вблизи открытой границы и у восточного берега архипелага Новая Земля.

Верификация результатов расчёта морского льда

Сплочённость льда (%)

Толщина льда (м)



➤ Наименьшие ошибки прогноза сплочённости и толщины льда наблюдались на востоке расчётной области.

➤ Наибольшие ошибки прогноза сплочённости морского льда (до 50 %) наблюдались в западной части расчётной области, а именно для северной части Баренцева моря, Чешской губы и пролива Карские ворота.

➤ Для Чешской губы и пролива Карские ворота наблюдалось систематическое занижение спрогнозированной сплочённости морского льда. Для остальных районов расчётной области ошибки близки к нулю.

➤ **Наибольшие ошибки толщины морского льда наблюдались на северо-западе расчётной области вблизи открытой границы и у восточного берега архипелага Новая Земля.**

Выводы

- ❖ В ходе работы для Северного морского пути была реализована комплексная система гидрометеорологического прогноза, включающая в себя атмосферную, океаническую модели и модель морского льда.
- ❖ Верификация результатов прогноза показала, что, учитывая сложность арктического региона для численного моделирования, результаты расчёта гидрометеорологических характеристик в целом удовлетворительно согласуются с эмпирическими данными. Однако стоит отметить довольно большие ошибки в прогнозе приземной температуры воздуха и, как одно из следствий этого, большие ошибки прогноза температуры поверхности моря на западе расчётной области. Возможные решения – учёт двухстороннего взаимодействия между океаном и атмосферой путём связывания атмосферной модели с моделями океана и льда в единую систему WRF-ROMS-CICE и увеличение пространственного разрешения моделей.
- ❖ Увеличению качества прогноза температуры поверхности моря может также способствовать расширение расчётной области на запад для того, чтобы обеспечить лучшее описание притока тёплых вод из северной Атлантики в акваторию Баренцева моря.

Выводы

- ❖ В ходе работы для Северного морского пути была реализована комплексная система гидрометеорологического прогноза, включающая в себя атмосферную, океаническую модели и модель морского льда.
- ❖ В верификация результатов прогноза показала, что, учитывая сложность арктического региона для численного моделирования, результаты расчёта гидрометеорологических характеристик в целом удовлетворительно согласуются с эмпирическими данными. Однако стоит отметить довольно большие ошибки в прогнозе приземной температуры воздуха и, как одно из следствий этого, большие ошибки прогноза температуры поверхности моря на западе расчётной области. Возможные решения – учёт двухстороннего взаимодействия между океаном и атмосферой путём связывания атмосферной модели с моделями океана и льда в единую систему WRF-ROMS-CICE и увеличение пространственного разрешения моделей.
- ❖ Увеличению качества прогноза температуры поверхности моря может также способствовать расширение расчётной области на запад для того, чтобы обеспечить лучшее описание притока тёплых вод из северной Атлантики в акваторию Баренцева моря.

Выводы

- ❖ В ходе работы для Северного морского пути была реализована комплексная система гидрометеорологического прогноза, включающая в себя атмосферную, океаническую модели и модель морского льда.
- ❖ Верификация предварительных результатов прогноза показала, что, учитывая сложность арктического региона для численного моделирования, результаты расчёта гидрометеорологических характеристик в целом удовлетворительно согласуются с эмпирическими данными. Однако стоит отметить довольно большие ошибки в прогнозе приземной температуры воздуха и, как одно из следствий этого, большие ошибки прогноза температуры поверхности моря на западе расчётной области. Возможные решения – учёт двухстороннего взаимодействия между океаном и атмосферой путём связывания атмосферной модели с моделями океана и льда в единую систему WRF-ROMS-CICE и увеличение пространственного разрешения моделей.
- ❖ **Увеличению качества прогноза температуры поверхности моря может также способствовать расширение расчётной области на запад для того, чтобы обеспечить лучшее описание притока тёплых вод из северной Атлантики в акваторию Баренцева моря.**

Список использованных источников

1. <https://www.mmm.ucar.edu/>
2. <https://www.myroms.org/>
3. <https://climatemodeling.science.energy.gov/>
4. <https://www.ncei.noaa.gov/>
5. <https://www.hycom.org/>
6. <https://www.tpxo.net/>
7. <https://www.gebco.net/>
8. Thompson, Gregory, Paul R. Field, Roy M. Rasmussen, William D. Hall, 2008: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5095–5115.
9. Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, **113**.
10. Nakanishi, M., and H. Niino, 2006: An improved Mellor–Yamada level 3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advecting fog. *Bound. Layer Meteor.* **119**, 397–407.
11. Niu, Guo–Yue, Zong–Liang Yang, Kenneth E. Mitchell, Fei Chen, Michael B. Ek, Michael Barlage, Anil Kumar, Kevin Manning, Dev Niyogi, Enrique Rosero, Mukul Tewari, Youlong Xia, 2011: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah–MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.*, **116**.
12. Kain, John S., 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170–181.
13. Warner, J. C., C. R. Sherwood, H. G. Arango, and R. P. Signell, 2005a: Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method, *Ocean Modelling*, **8**, 81–113.
14. Chapman, D. C., 1985: Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model, *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1060–1075.
15. Orlanski, I., 1976: A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *J. Comp. Sci.*, **21**(3), 251–269.
16. C.M. Bitz and W.H. Lipscomb. An energy-conserving thermodynamic sea ice model for climate study. *J. Geophys. Res. Oceans*, **104**(C7):15669–15677, 1999.
17. Marchesiello, P., J. C. McWilliams, A. F. Shchepetkin, 2001: Open boundary conditions for long-term integration of regional ocean models, *Ocean Modelling*, **3**, 1–20.
18. <https://psl.noaa.gov/>
19. <https://data.marine.copernicus.eu/>



Спасибо за внимание!
¡Gracias por su atención!