

Оценка сплоченности морского льда в Карском море по данным численного моделирования и спутниковых измерений



Введение

Актуальность исследования ледовой обстановки в Карском море обусловлена потребностями безопасной навигации по Северному морскому пути (СМП). На фоне климатических изменений наблюдается устойчивое сокращение площади, толщины и сплоченности морского льда, что усиливает необходимость в надежных данных для прогнозирования.

Современный мониторинг основан на спутниковых наблюдениях и продуктах численного моделирования. Однако существующие модельные реанализы (TOPAZ, GLORYS, NEXTSIMF и др.) имеют различные ограничения в точности воспроизведения ледовых процессов, особенно в условиях сильной изменчивости Карского моря, на которую влияют ветра, циклоны и пресноводный сток рек.

Комплексных сравнительных исследований, оценивающих сразу несколько современных моделей для этого региона, недостаточно. В данной работе проводится сравнительный анализ точности воспроизведения сплоченности морского льда по данным ряда модельных продуктов (NEXTSIMF, TOPAZ, GLORYS и др.) в сравнении со спутниковыми наблюдениями за ноябрь-декабрь 2002 года.

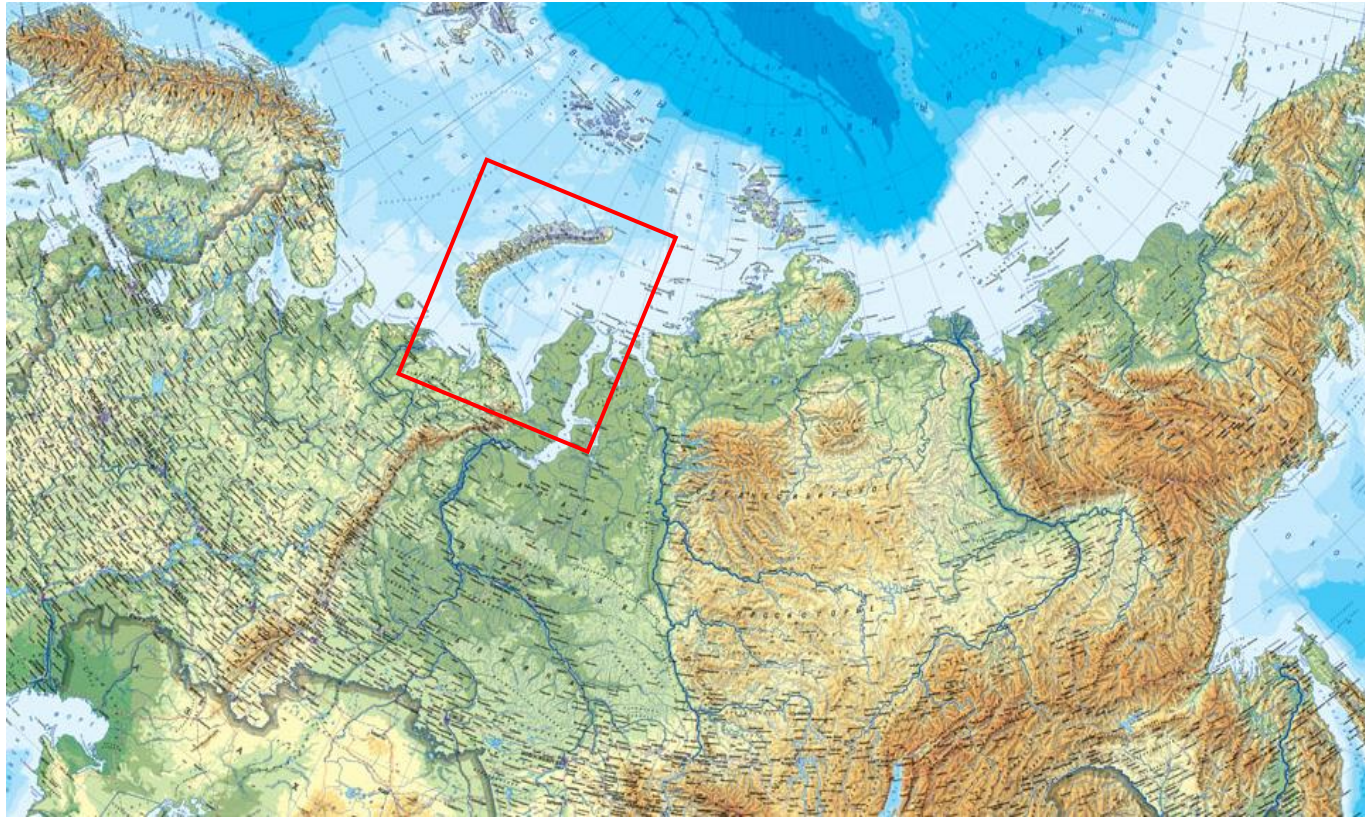
Цель: Оценить расхождения и выявить особенности поведения моделей с использованием статистических метрик (BIAS, RMSE, R^2).

Данные и методы

Использованы спутниковые данные AMSR2 и радиолокационные снимки, а также реанализы GLORYS12V1, TOPAZ4B, NEXTSIMF (TOPAZ5) и модель МГИ РАН. Все продукты приведены к единой сетке Карского моря для анализа сплоченности льда и верификации кромки льда с эталоном PCA.

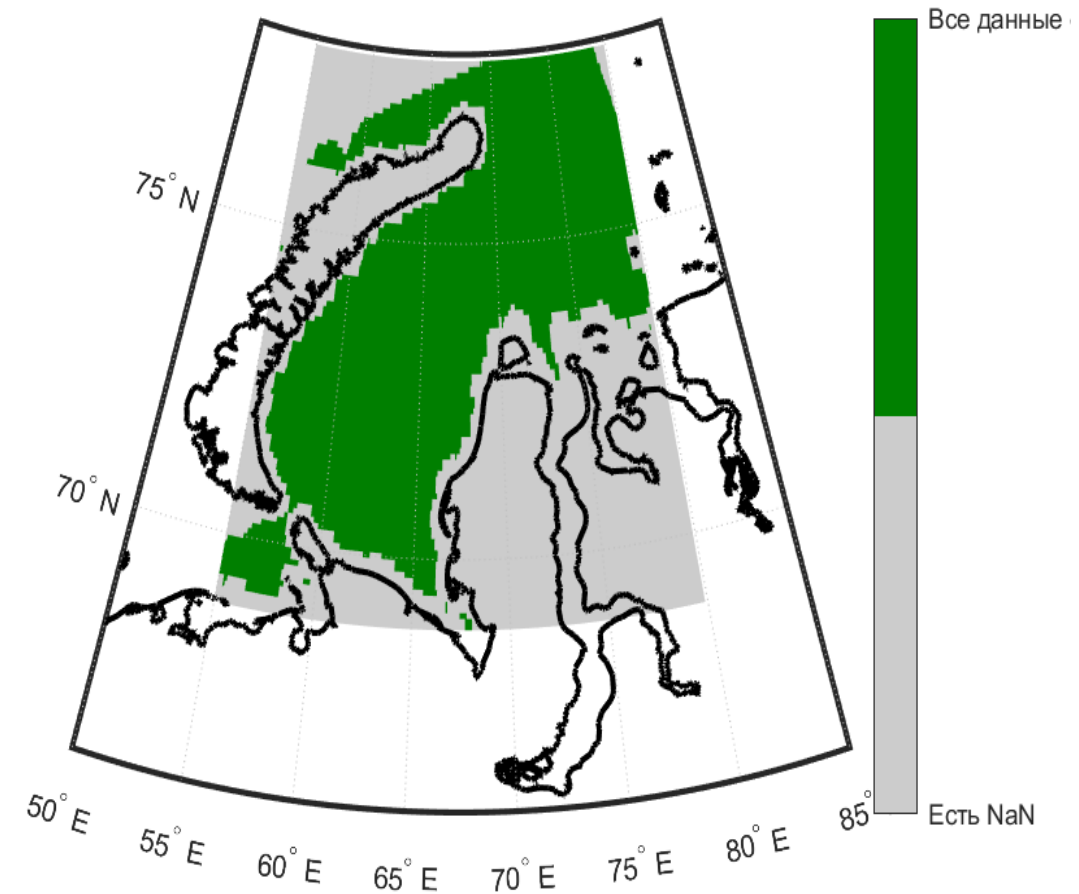
Продукт / Спутник	Источник	Пространственное разрешение	Временное разрешение
GLORYS12V1 (NEMO)	Mercator Ocean	~4.5 км	1 день
TOPAZ4B (HYCOM)	NERSC (Норвегия)	12.5 км	1 день
NEXTSIMF (TOPAZ5)	NERSC (Норвегия)	3 км	1 час
Модель МГИ РАН (MIZ)	ФИЦ МГИ РАН	3.1 км	1 день
AMSR2	JAXA	3.1 км	1 день

Регион исследования и маска для сравнения данных



Область исследования на карте (отмечена красным квадратом)

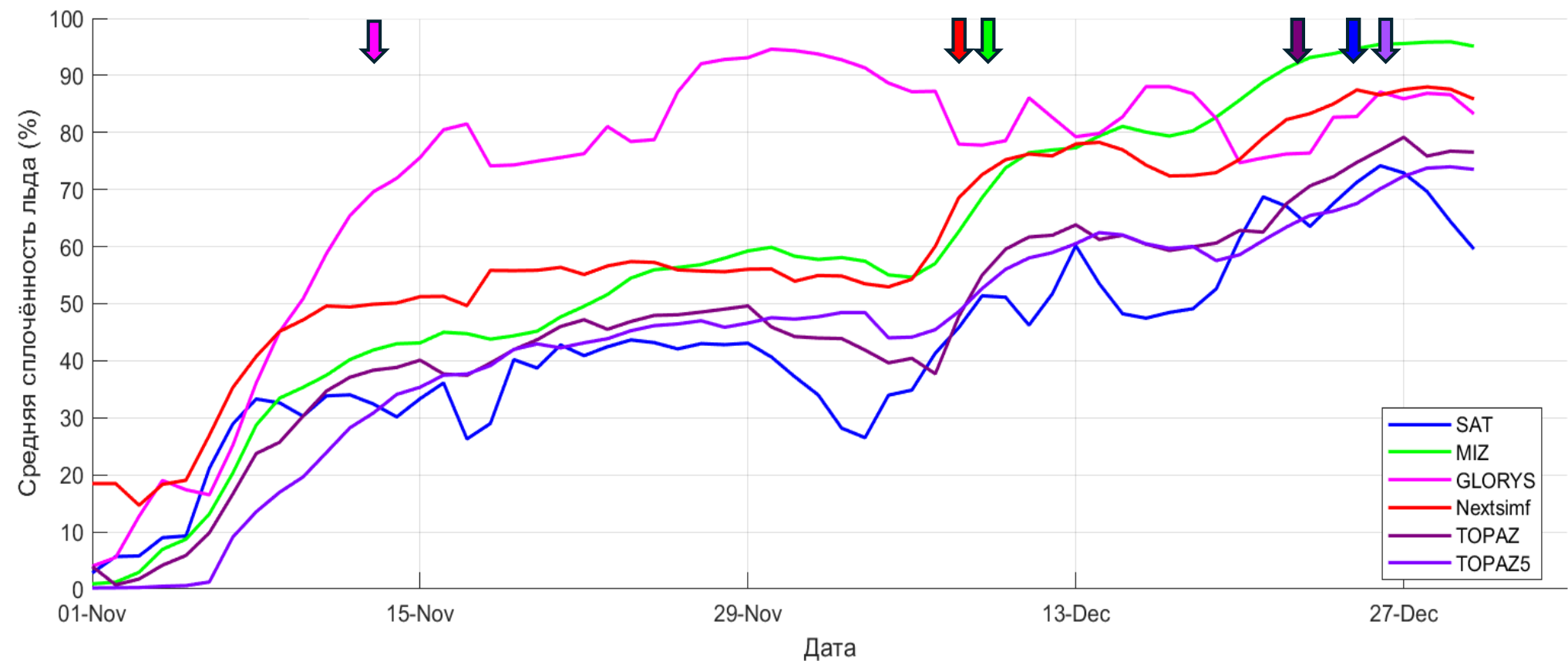
Все данные интерполированы на единую сетку Карского моря (68° – 78° с.ш., 55° – 80° в.д.). Для анализа использовалась область, где присутствуют данные всех продуктов, отстоящая от береговой линии в среднем на 10 км.



Результаты

В ноябре–декабре 2022 г. все продукты фиксируют рост сплочённости льда, однако с разной динамикой: MIZ, GLORYS и Nextsimf переоценивают, а TOPAZ (4b) и TOPAZ5 наиболее близки к спутниковым наблюдениям.

График временной изменчивости средней по пространству сплочённости льда в Карском море

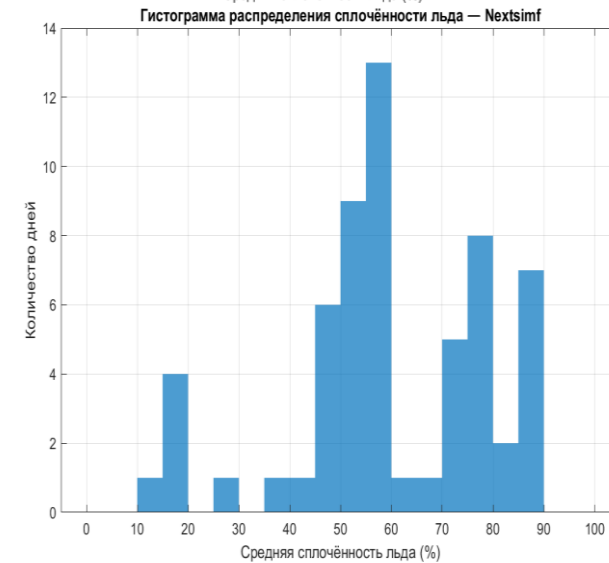
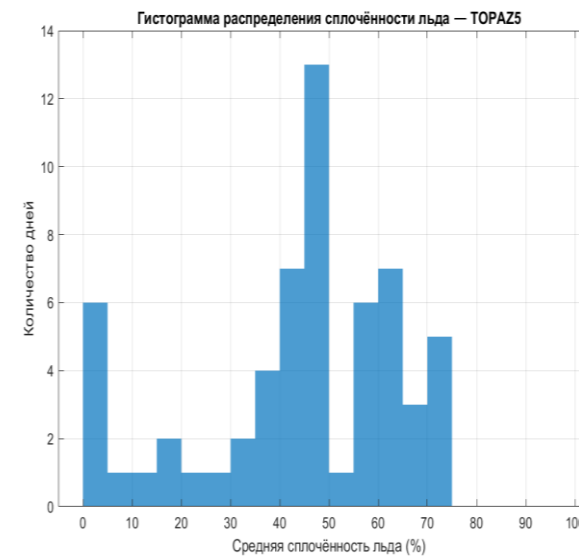
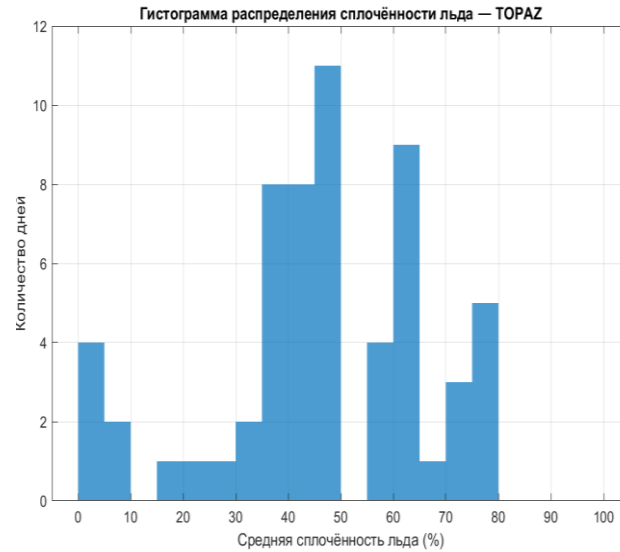
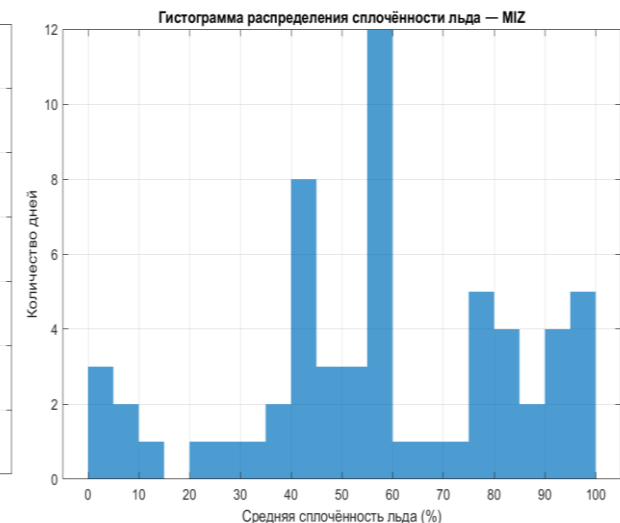
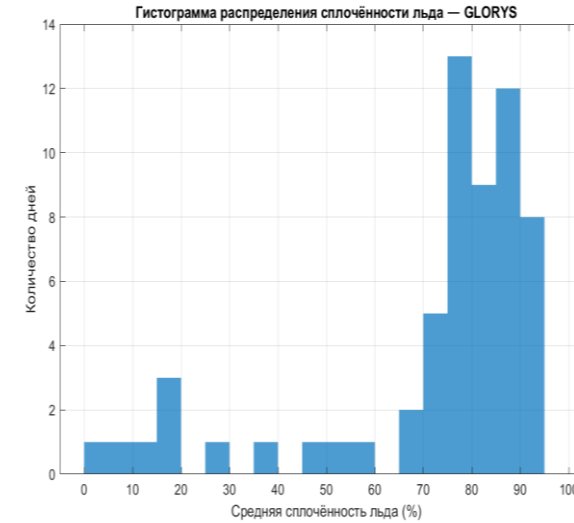
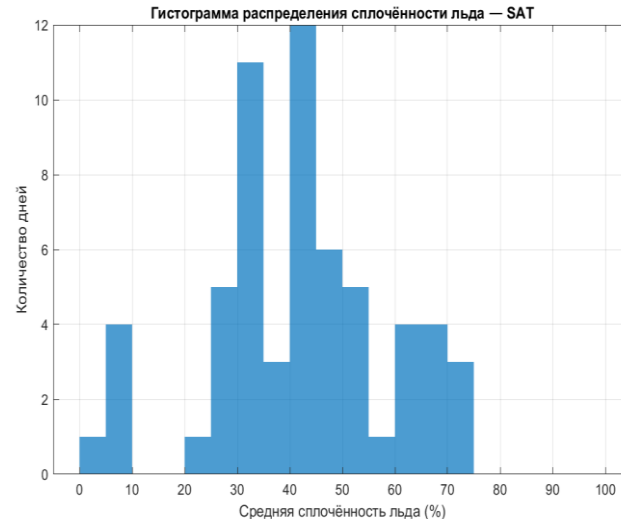


↓ - Стрелка обозначает точку , где продукты достигают 70% средней сплочённости льда.

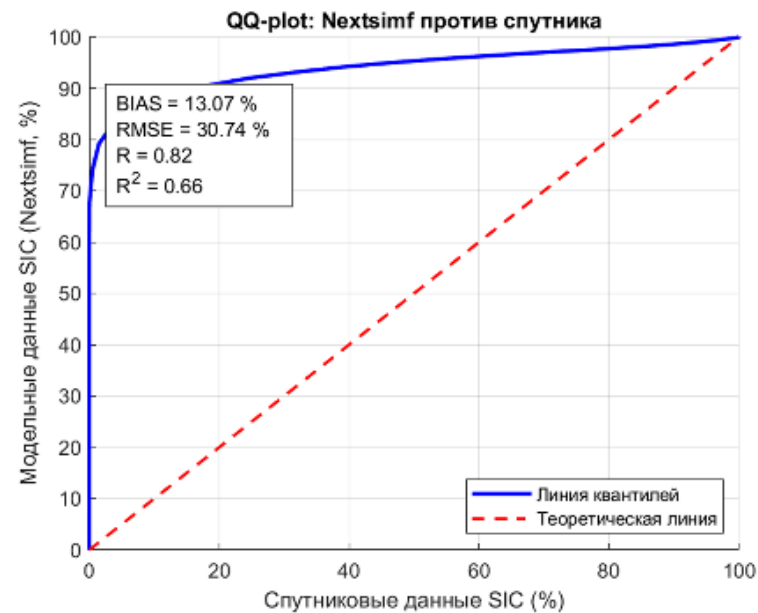
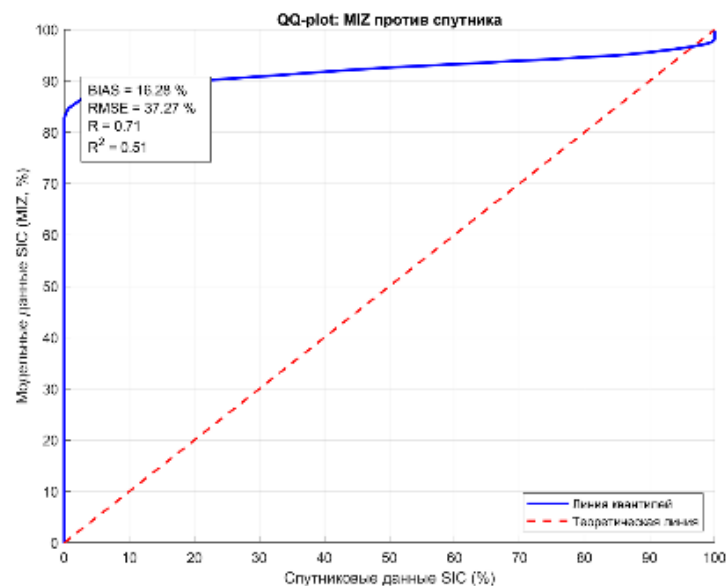
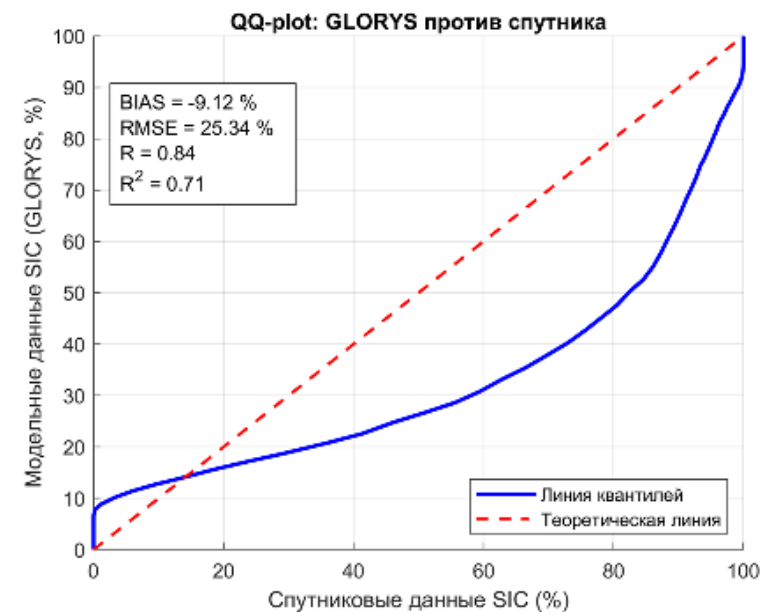
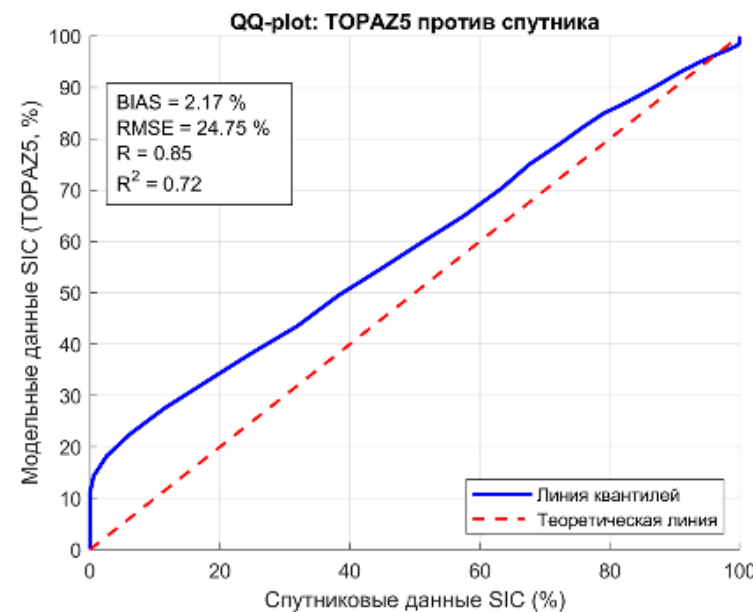
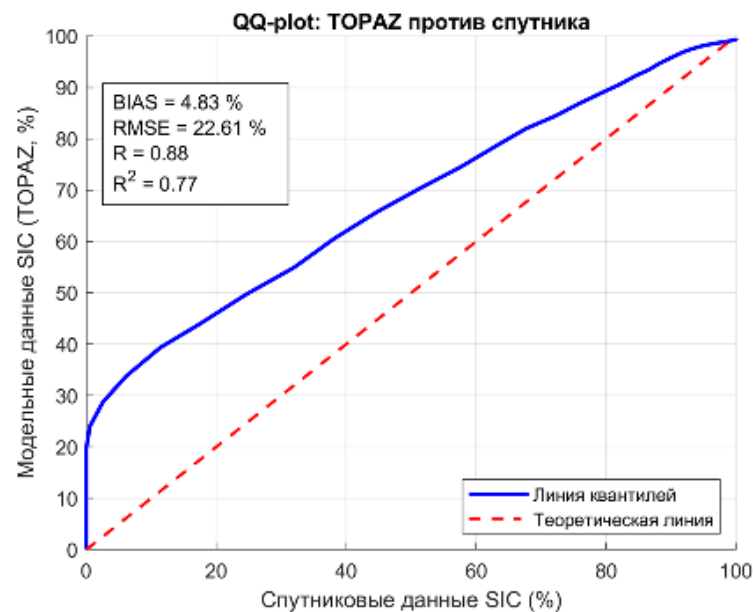
Гистограммы распределения средней сплочённости льда в Карском море

Анализ распределения сплочённости льда в Карском море (ноябрь-декабрь 2022 г.) показал:

TOPAZ5 и TOPAZ демонстрируют преобладание средней сплочённости (40-60%). GLORYS систематически завышает показатели (70-100%). Nextsimf показывает умеренные значения (55-65%) с дополнительными пиками. MIZ имеет двухмодальное распределение с зонами умеренного (50-60%) и сплошного льда (90-100%). Спутниковые данные фиксируют наименьшую сплочённость (30-50%). Наиболее реалистичную картину дают TOPAZ и Nextsimf, в то время как GLORYS переоценивает, а спутник недооценивает ледовый покров.



Квантиль–квантильные (Q–Q) диаграммы сравнения данных продуктов со спутниковыми данными AMSR2



Glorys

BIAS = -9.12 %
RMSE = 25.34 %
R = 0.84
 $R^2 = 0.71$

Модель GLORYS12v1 систематически занижает сплоченность (BIAS = -9.12%). При этом она имеет хорошие точность (RMSE = 25.34%) и корреляцию (R = 0.84), что позволяет использовать её в крупномасштабных исследованиях с поправкой на смещение.

Topaz 4b

BIAS = 4.83 %
RMSE = 22.61 %
R = 0.88
 $R^2 = 0.77$

Модель TOPAZ4b показала наилучший результат с минимальной ошибкой (RMSE = 22.61%) и высочайшей корреляцией (R = 0.88). При умеренном завышении (BIAS = +4.83%) она является оптимальной для климатических оценок, требующих точных абсолютных значений.

Topaz 5

BIAS = 2.17 %
RMSE = 24.75 %
R = 0.85
 $R^2 = 0.72$

Модель TOPAZ5 отличается минимальным смещением (BIAS = +2.17%) при сохранении высокой точности (RMSE = 24.75%) и хорошей корреляции (R = 0.85). Это делает её наиболее предпочтительным выбором для анализа сплоченности.

MIZ

BIAS = 16.28 %
RMSE = 37.27 %
R = 0.71
 $R^2 = 0.51$

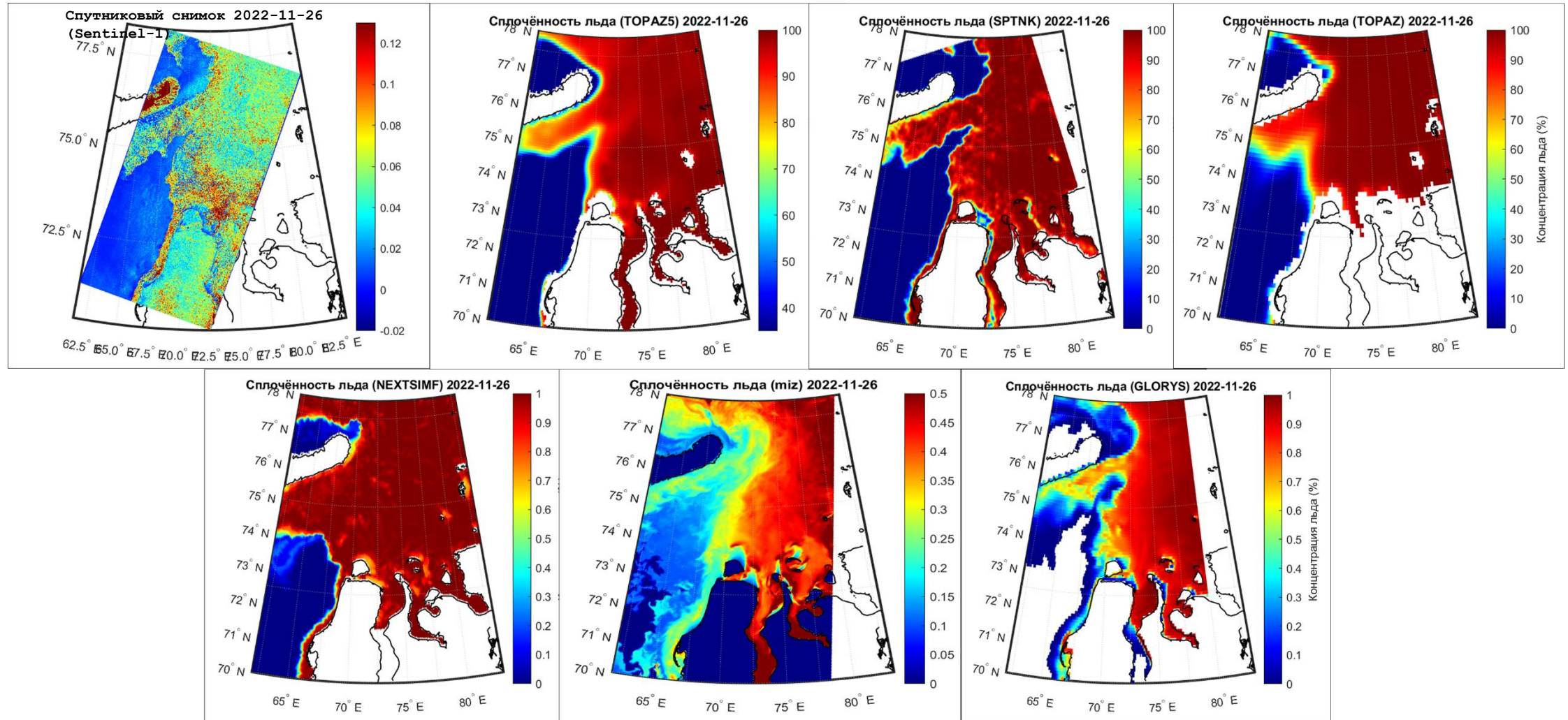
Модель MIZ имеет значительное систематическое завышение сплоченности (BIAS = +16.28%) и самую высокую ошибку (RMSE = 37.27%). Несмотря на удовлетворительную корреляцию (R=0.71), модель требует существенной доработки.

Nextsimf

BIAS = 13.07 %
RMSE = 30.74 %
R = 0.82
 $R^2 = 0.66$

Модель NEXTSIMF демонстрирует сильное завышение (BIAS = +17.94%) и высокую ошибку (RMSE = 35.27%). Её способность объяснять изменчивость данных ограничена ($R^2 = 0.60$), что указывает на необходимость кардинальной доработки параметризации.

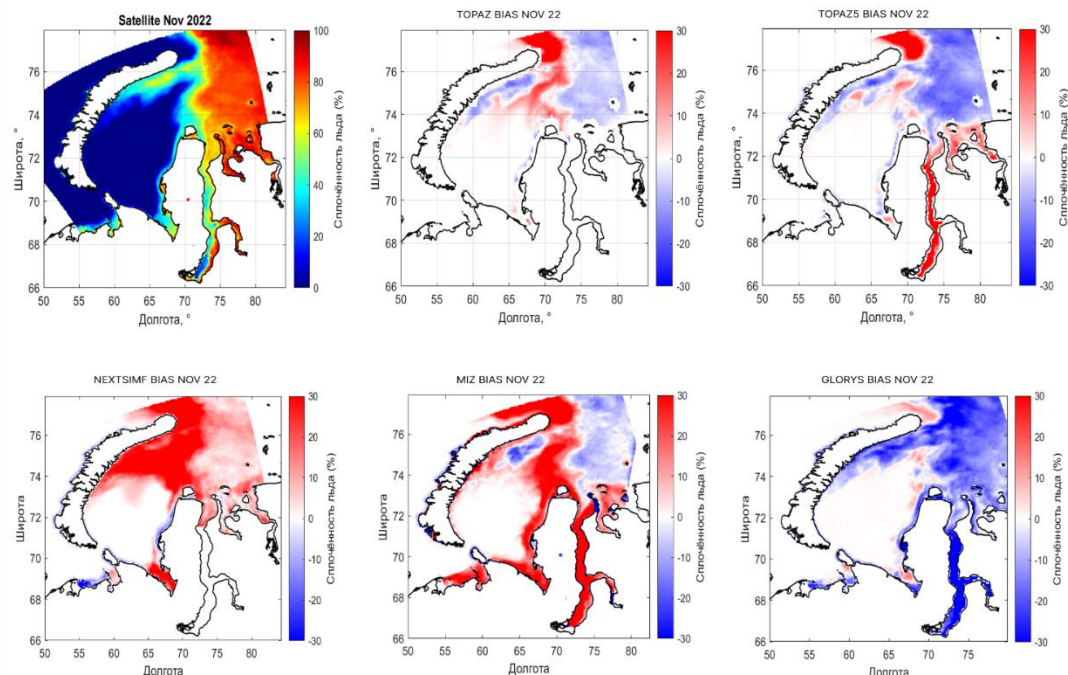
Сравнение продуктов со снимками спутника



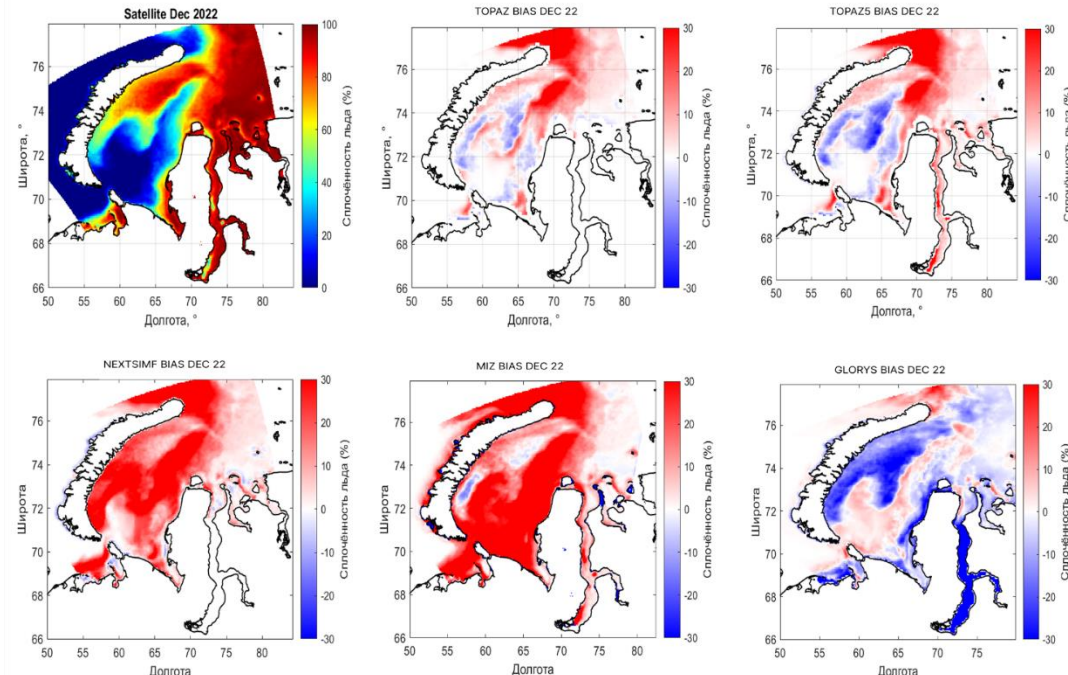
AMSR2 точнее всего повторяет спутниковые данные. **ТОPAZ4** среднее соответствие с плохой детализацией у берегов. **GLORYS** хорошо передаёт общую структуру льда. **MIZ** точна в районе дрейфа льдов у Шпицбергена. **Nextsimf** показал плохое сходство с снимками PCA, но лучше всего работает в южной части моря. **ТОPAZ5** значительно улучшила отображение прибрежных зон по сравнению с **ТОPAZ4**, и имеет наилучшее визуальное соответствие с PCA снимками.

Среднемесечные карты льда и Bias

Среднемесечные карты льда Bias за ноябрь



Среднемесечные карты льда Bias за декабрь



- Модель **NEXTSIMF** систематически завышает сплочённость льда в южной части Карского моря. Основные причины — неточности в учёте механических процессов и ветрового воздействия. Требуется улучшения параметризации для повышения точности.
- Модель **MIZ** в Карском море систематически недооценивает сплочённость льда в центральных районах, но переоценивает её у кромки льда. При этом она точнее других моделей воспроизводит динамику ледяного покрова в юго-западной части моря.
- Модель **GLORYS** в целом корректно воспроизводит сезонный рост сплочённости льда в Карском море. Однако в ноябре 2022 года она систематически занижает концентрацию льда в южных районах и вдоль кромки льда. В декабре эта тенденция сохраняется, хотя и проявляется локально, наряду с участками небольшой переоценки. Основные ошибки модели наблюдаются в переходных зонах между сплошным льдом и открытой водой.
- Модель **TOPAZ4B** систематически занижает сплочённость льда в Карском море, особенно в южных и прибрежных районах.
- Модель **TOPAZ5** систематически занижает сплочённость льда в южных районах Карского моря и завышает её у кромки льда. Хотя модель верно отражает сезонное расширение ледяного покрова, эти ошибки сохраняются в течение ноября-декабря.

Выводы

Проведенный сравнительный анализ пяти моделей морского льда в Карском море показал, что модели семейства TOPAZ демонстрируют наибольшую точность. TOPAZ4B показала минимальную ошибку (22.61%) при умеренном завышении показателей (+4.83%), а TOPAZ5 - наименьшее систематическое смещение (+2.17%). Модель GLORYS также показала хорошие результаты на локальном уровне. Наименее точными оказались модели NEXTSIMF и MIZ, требующие существенной доработки.

Спутниковые данные остаются наиболее точным источником информации, но их оперативное использование ограничено сложностью обработки. Оптимальным подходом является комбинация модельных прогнозов с верификацией по спутниковым снимкам. Для повышения точности необходимо совершенствовать методы ассимиляции спутниковых данных, развивать алгоритмы автоматической обработки и улучшать параметризацию прибрежных процессов.

Эти меры позволят повысить точность мониторинга ледовой обстановки, что критически важно для безопасной навигации по СМП и изучения климатических изменений в Арктике.