



Двадцать третья международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"



10 - 14 ноября 2025 г.

Сравнительный анализ качества прогноза траектории долгоживущего ПМЦ в Баренцевом и Карском морях в ноябре – декабре 2024 года по результатам моделирования и последующих расчетов по авторской методике локализации областей риска ПМЦ в режимах холодного старта и усвоения дополнительных синоптических и спутниковых данных

О.В. Калмыкова, к.ф.-м.н. (kov@feerc.ru),

С.В. Козлов (kozlov-sv@rpatyphoon.ru),

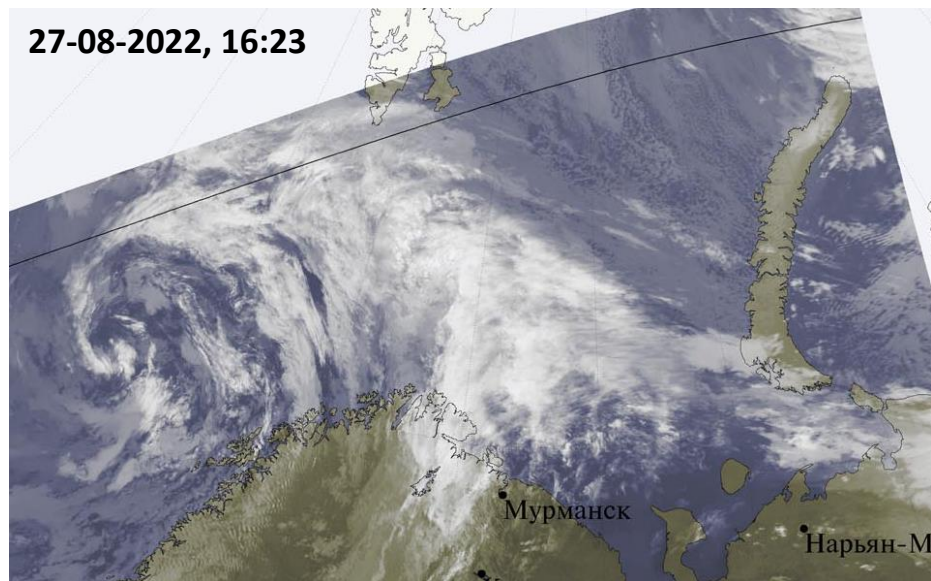
С.А. Петриченко, к.ф.-м.н. (psa@rpatyphoon.ru)

Научно-производственное объединение "Тайфун" Росгидромета, г. Обнинск

Общая информация

В 1994 году Рабочей группой по полярным депрессиям Европейского геофизического общества (*European Geophysical Society's Polar Lows Working Group*) для наименования облачных вихрей α и β мезомасштаба (от 20 до 2000 км), возникающих над морями к полюсу от полярного фронта, рекомендовано пользоваться термином «полярный мезоциклон» (*polar mesocyclone*) [[Rasmussen, Turner J. 2003](#)]. Термин же «полярная депрессия» (*polar low*) служит для наименования наиболее интенсивных полярных мезоциклонов со скоростью ветра, превышающей 15 м/с.

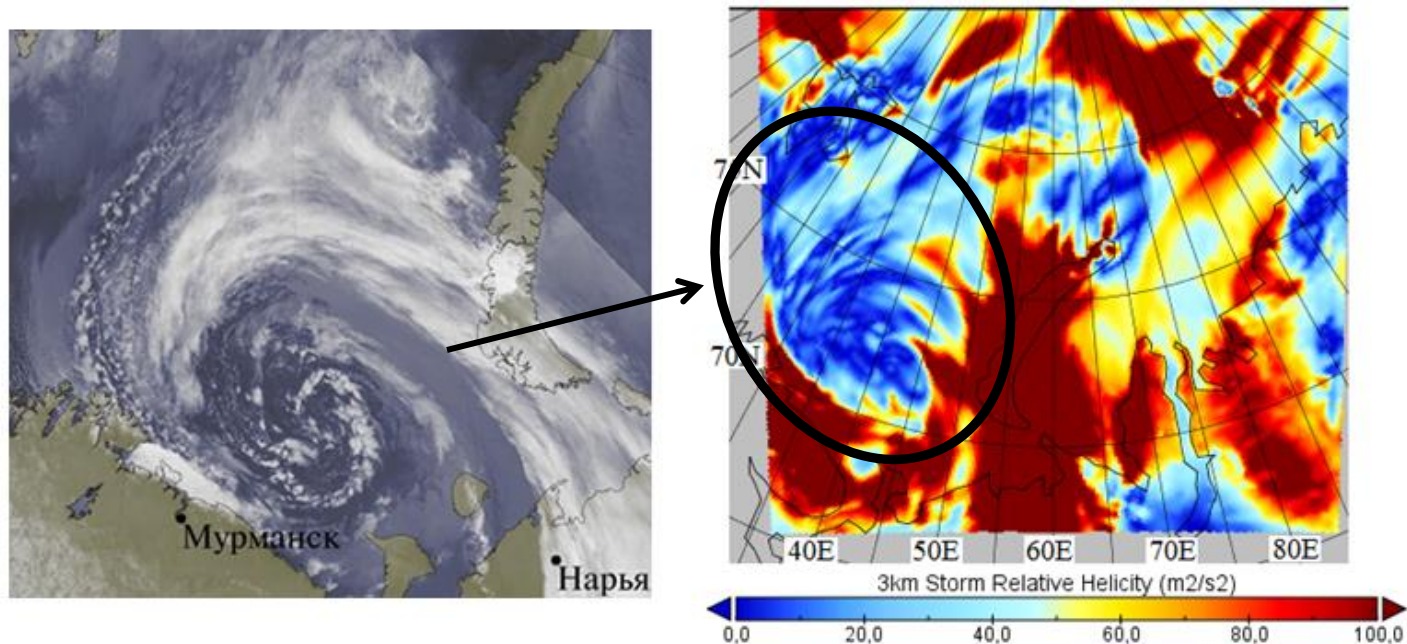
Под это определение попадает очень широкий спектр циклонических образований. От орографических вихрей до небольших фронтальных циклонов на арктическом фронте.



Методика прогноза ПМЦ

Прогноз зарождения и перемещения ПМЦ до настоящего времени остается актуальной проблемой, с которой связаны многочисленные исследования. Основная сложность – существование различных механизмов образования ПМЦ. Основные, по современной классификации, это бароклинные и конвективные типы мезоциклонов [Гончаров Р.И., Караваев Д.М., Колесов Б.Г., Лебедев А.Б. 2020].

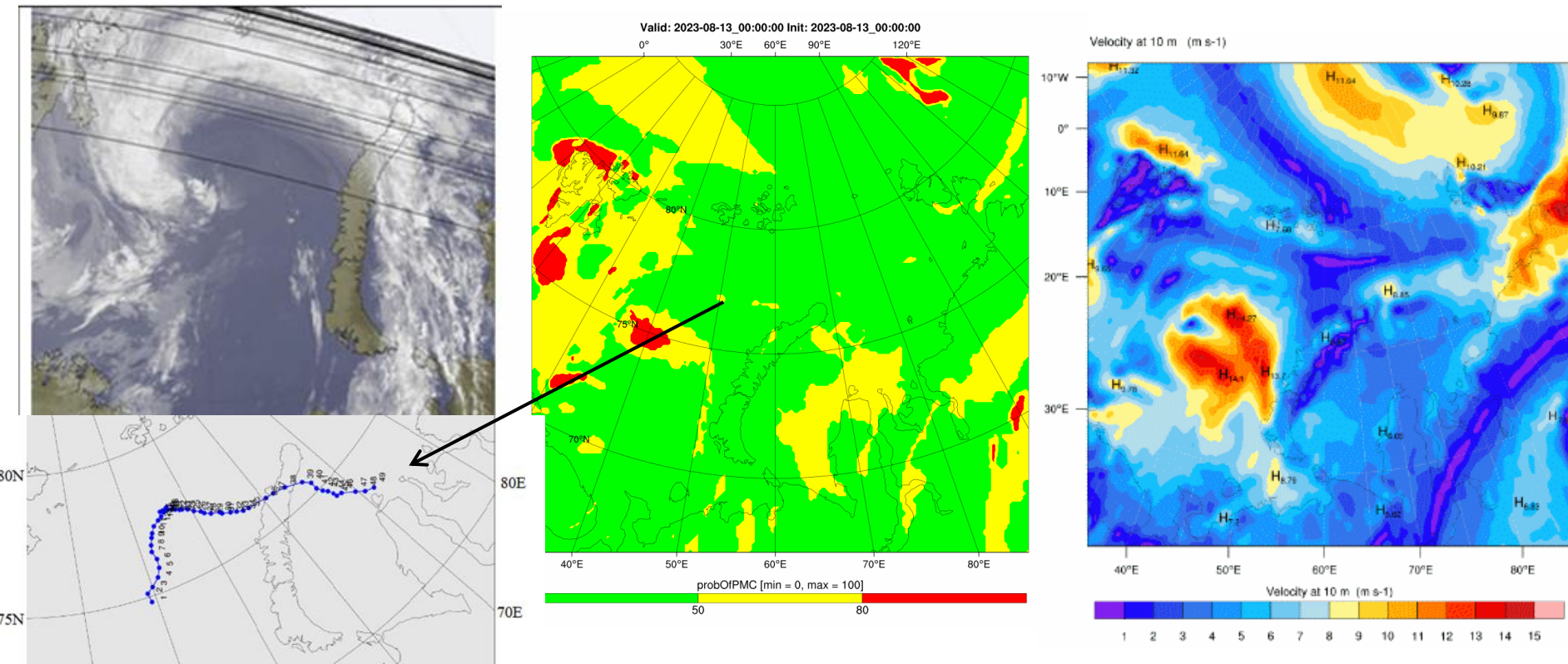
Для прогноза ПМЦ нами было предложено использовать индексы конвективной неустойчивости, расчет которых ведется по выходным данным численного моделирования атмосферы. Поля разных конвективных индексов могут иметь особенности в областях мезоциклонов, возникающих при различных синоптических ситуациях, поскольку связаны как с термическими, так и с динамическими характеристиками атмосферных процессов.



Методика прогноза ПМЦ

Был сформирован набор потенциальных предикторов полярного циклогенеза из числа рассчитываемых индексов, имевших особенности в районах развития ПМЦ. Для каждого индекса были определены региональные пороговые значения с учетом их направленности на распознавание угроз возникновения ПМЦ.

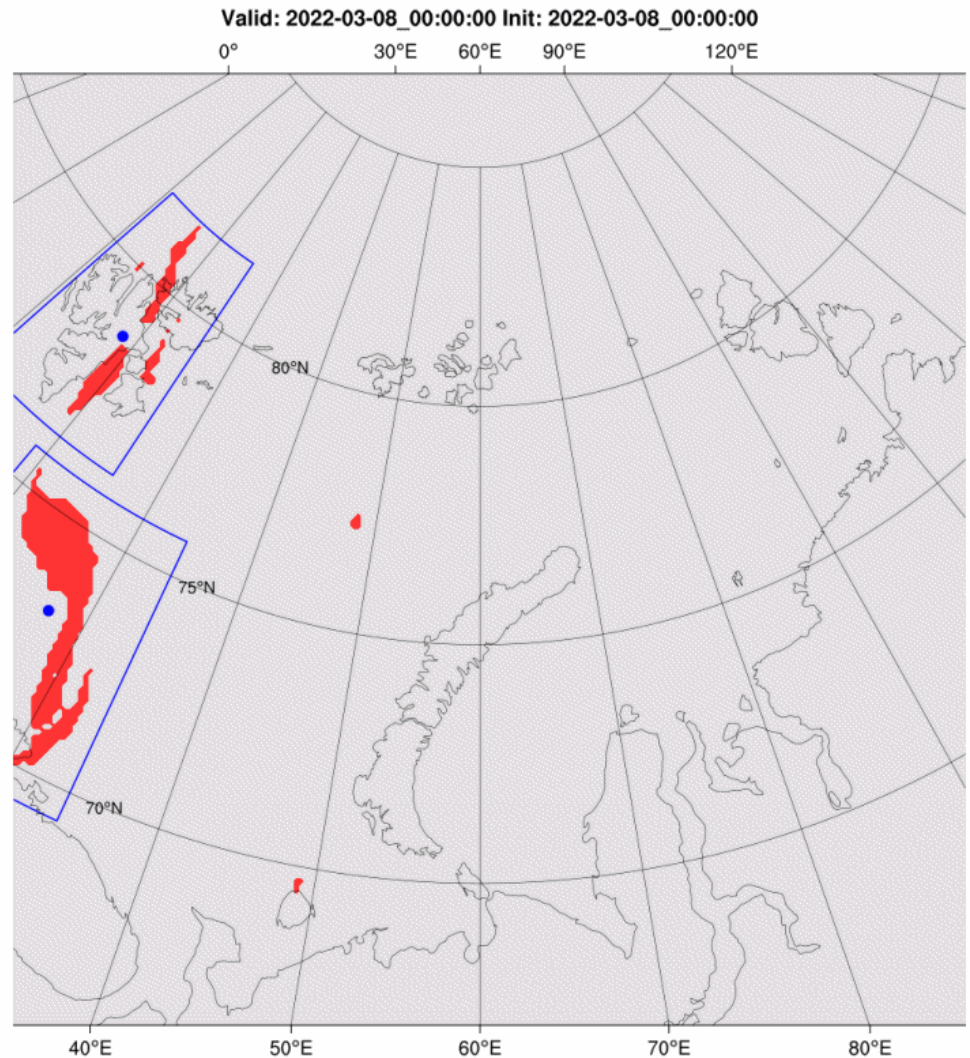
Суперпозиции полей отобранных индексов дают возможность вероятностного прогнозирования областей риска зарождения и существования ПМЦ, а также построения прогностических траекторий их перемещения.



Прогноз траектории перемещения ПМЦ

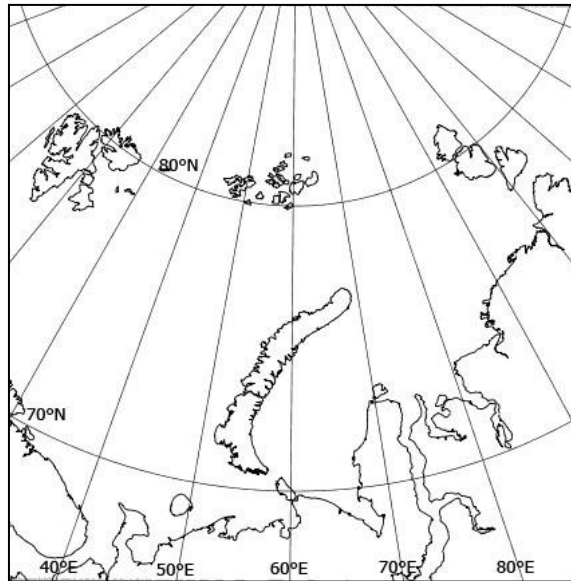
Для построения траектории перемещения прогнозируемых ПМЦ был разработан алгоритм расчета центра мезоциклона.

В выделенных зонах с 80% вероятностью возникновения ПМЦ на комплексной пространственной картине рассчитываются геометрические центры масс предполагаемых ПМЦ. Расчеты проводятся для каждого момента времени исходного прогноза.



Технология прогноза ПМЦ

Расчетная область



Параметр

Используемое значение

Размер расчетной области

187 x 187 узлов

Шаг сетки

12 км

Число вертикальных уровней

50

Временной шаг вывода данных

1 ч

Разрешение статических данных

30 с

Проекция карты

polar

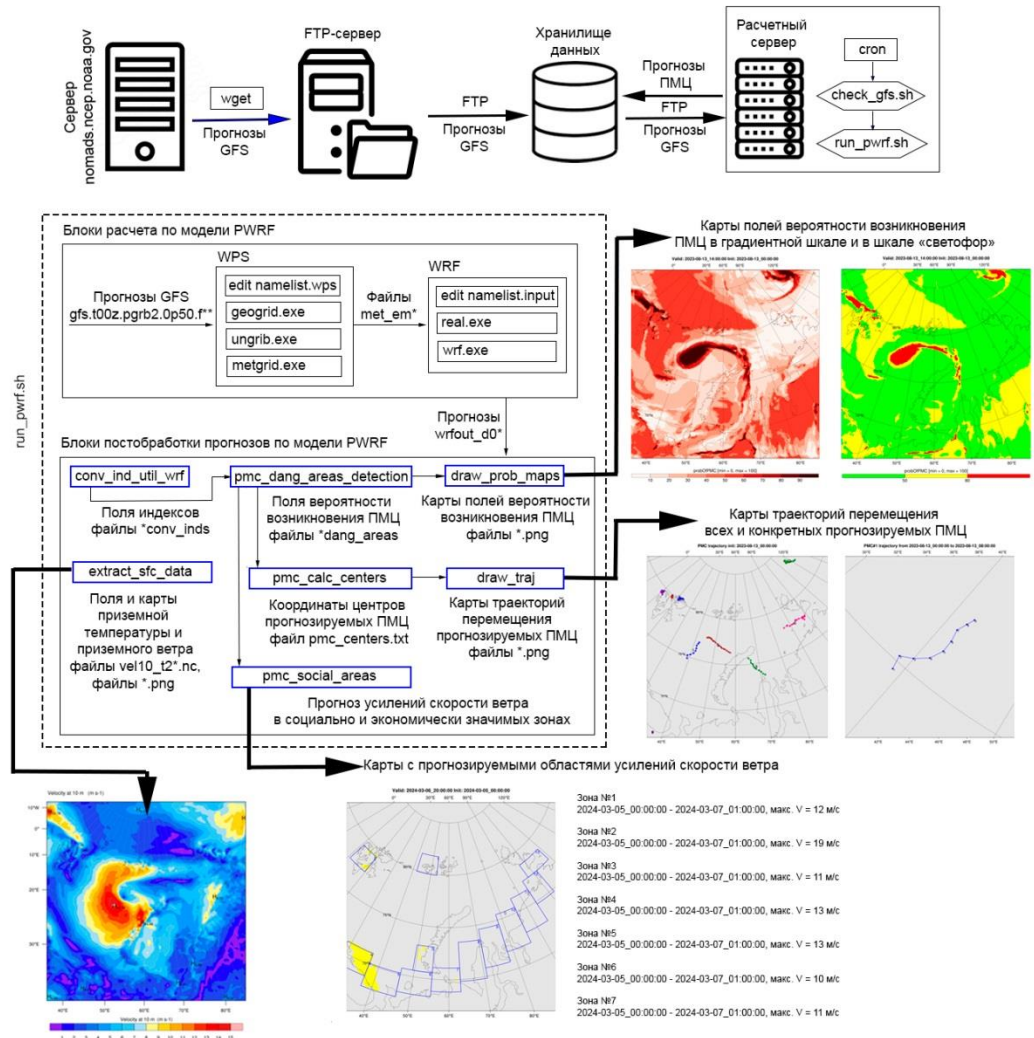
Координаты центра

60°E, 77°N

Период моделирования

48 ч

Оперативно функционирует на базе НПО Тайфун с ноября 2021 г.



Петриченко С.А., Калмыкова О.В., Козлов С.В., Кулижникова Л.К. Использование композиции индексов конвективной неустойчивости для прогноза перемещения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России // Российская Арктика. 2024. Т. 6. № 4. С. 60-71.

Авторские и независимые испытания технологии

В 2023 году были проведены авторские испытания разработанной технологии, которые позволили оценить качество прогноза возможного зарождения и перемещения ПМЦ в пределах исследуемой акватории и внести дополнительные корректировки в рабочие блоки программного комплекса.

В 2024 году были проведены настройка основных блоков расчета прогностических траекторий и производственные испытания технологии. Были подготовлены методические рекомендации по ее использованию.

Результаты независимых испытаний:

- общая оправдываемость прогноза - 75%
- доля ложных прогнозов – 5%
- пропуск ПМЦ – 19%
- неверифицируемые прогнозы – 1%

Основной проблемой, требующей решения, остается снижение числа пропусков ПМЦ (повышение предупредительности ПМЦ).



Акт

Проведения производственных испытаний автоматизированной технологии прогноза зарождения и перемещения полярных мезомасштабных циклонов для Арктического региона РФ в ФГБУ «ААНИИ»

Работа проводилась в соответствии с календарным планом работ по теме 5.1.1 НИТР НИУ Росгидромета на 2020 – 2024 гг. раздел ФГБУ НПО «Тайфун» «Разработка автоматизированной технологии прогноза зарождения и перемещения полярных мезоциклонов для Арктического региона РФ». Программа и методика испытаний были разработаны в НПО «Тайфун» и согласованы с ФГБУ «ААНИИ» до начала первого этапа испытаний. Производственные испытания проводились в ОЛРиП и ЦЛГМИ ФГБУ «ААНИИ».

Описание и состав производственных испытаний

1. Производственные испытания технологии проводились в ФГБУ «ААНИИ» Росгидромета в три этапа: с 01.04.2024 г. по 15.05.2024 г., с 01.07.2024 г. по 15.08.2024 г. и с 01.10.2024 г. по 15.11.2024 г.

2. Для проведения производственных испытаний НПО «Тайфун» предоставляло ежедневные прогностические расчеты на 48 часов возможного зарождения и перемещения полярных мезомасштабных циклонов в пределах выделенной акватории, выбранной в качестве испытательного полигона (Баренцево и Карское моря). Расчеты включали в себя карты траекторий движения полярных мезомасштабных циклонов, карты усиления ветра от 10 м/с и более по 13 районам испытательного полигона. Результаты прогностических расчетов передавались в ААНИИ на ежедневной основе через FTP-сервер НПО «Тайфун».

3. Верификация прогнозов производилась в ААНИИ на базе спутниковых изображений с сайта Метео-Сибирь (Арктика-М №1 и №2) и фактических данных о скорости ветра на 34 метеорологических станциях в пределах испытательного полигона.

4. Результаты оценок качества прогнозов ежедневно заносятся в контрольные журналы.

Результаты производственных испытаний и заключение

1. По итогам трех периодов производственных испытаний общая оправдываемость прогнозов ПМЦ составила 76%, прогнозов усиления ветра – 83%.

2. Проведенные испытания показали, что выбранные подходы по построению прогнозов зарождения и перемещения ПМЦ дают положительный эффект, технология работоспособна и может быть востребована в оперативной практике.

3. Необходимо дальнейшее развитие технологии для повышения качества прогноза полярных мезомасштабных циклонов с размерами менее 1000 км.

М.п.с. ОЛРиП Ильющенкова И.А.

Инженер ЦЛГМИ Саркисов Д.А.

Заведующий ОЛРиП Мионов Е.У.

Вычислительные эксперименты с усвоением данных

Для повышения качества прогноза ПМЦ предложено включить в состав разработанной технологии новые модули, связанные с работой со спутниковыми данными и данными приземных наблюдений - их усвоение в модели PWRP стандартными средствами пакета WRFDA по схеме 3D-VAR.

Шаг сетки: 12 км, 8 км

Начальные и граничные условия: поля GFS

Начало моделирования: 0ч, 18ч, 12ч

Источник спутниковых данных: GDAS

Усваиваемые данные: SYNOP+ASCAT, AMSU-A, ATMS, HIRS, MHS

Режим усвоения: весь комплекс, по отдельности

	ASCAT	AMSU-A	ATMS	MHS	HIRS4
Спутники	MetOp B/C	NOAA-15/16/18	JPSS-0 (Suomi NPP)	NOAA 18/19 MetOp B	NOAA 18/19
Тип радиометра	Микроволновый скаттерометр (v)	Микроволновый (t)	Микроволновый (t, q)	Микроволновый (q)	Инфракрасный (t, q)
Кол-во каналов		15	22	5	19
Разрешение	25 км	48 км	16/32/75 км	17 км	10 км

ASCAT - Advanced Scatterometer

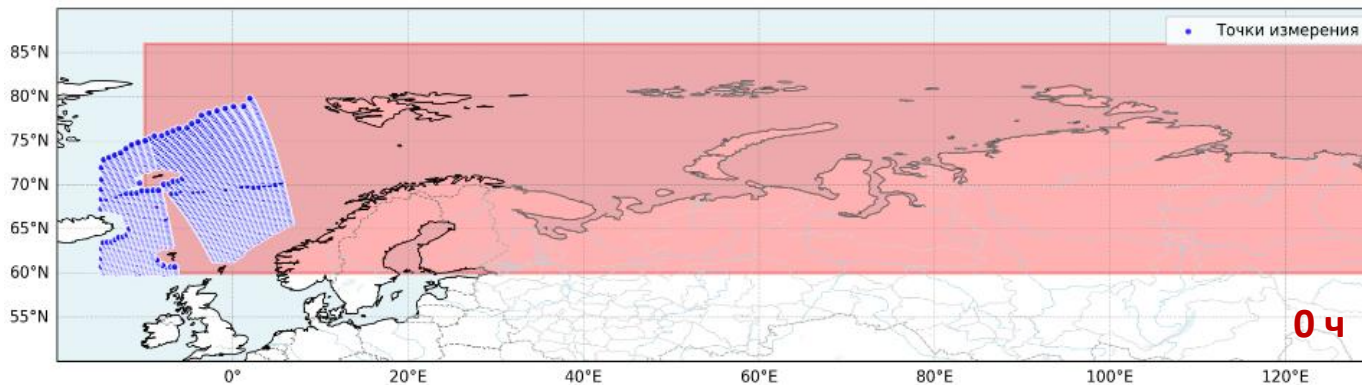
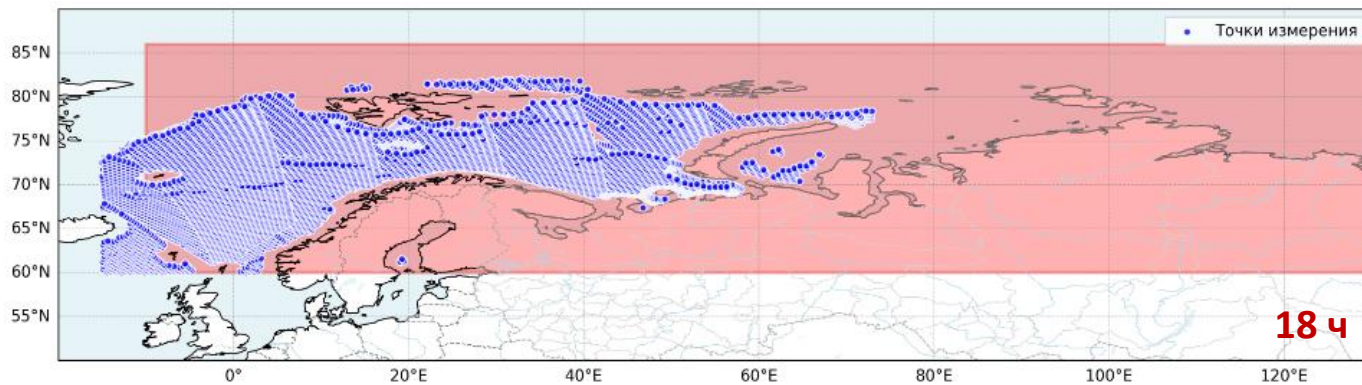
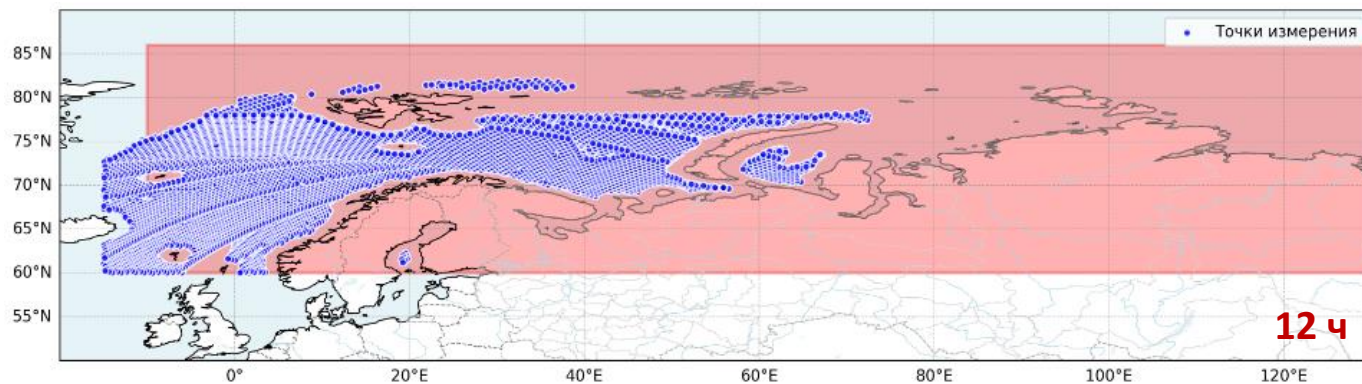
AMSU-A - Advanced Microwave Sounding Unit - A

ATMS - Advanced Technology Microwave Sounder

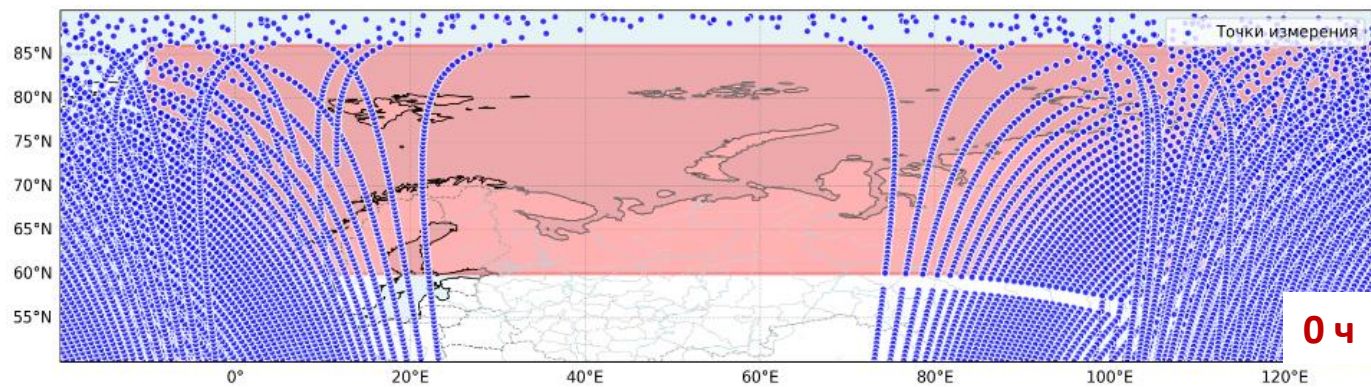
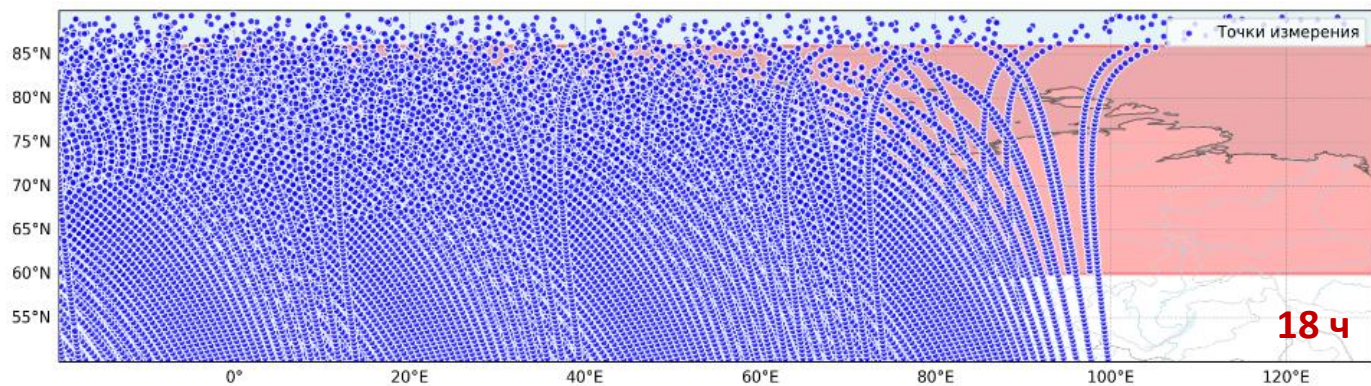
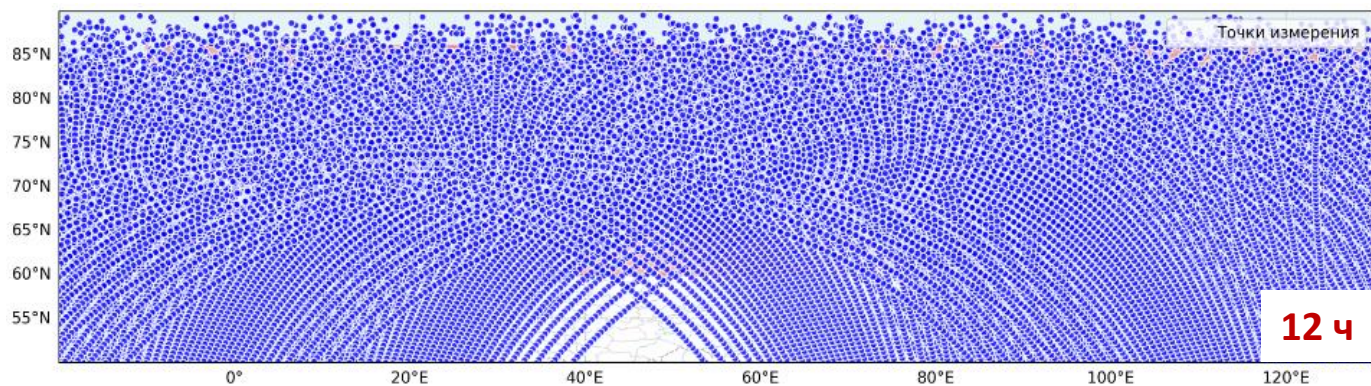
MHS - Microwave Humidity Sounder

HIRS4 - High-Resolution Infrared Radiation Sounder, Model 4

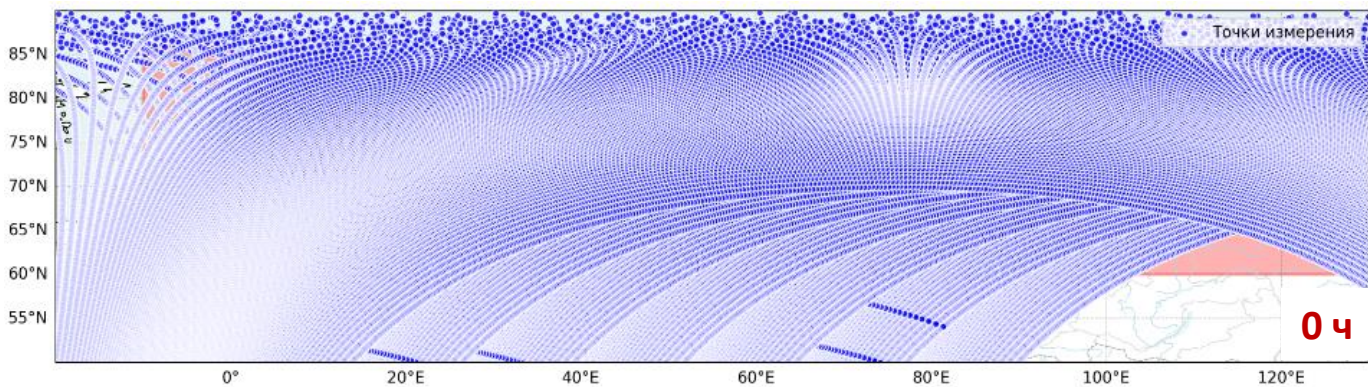
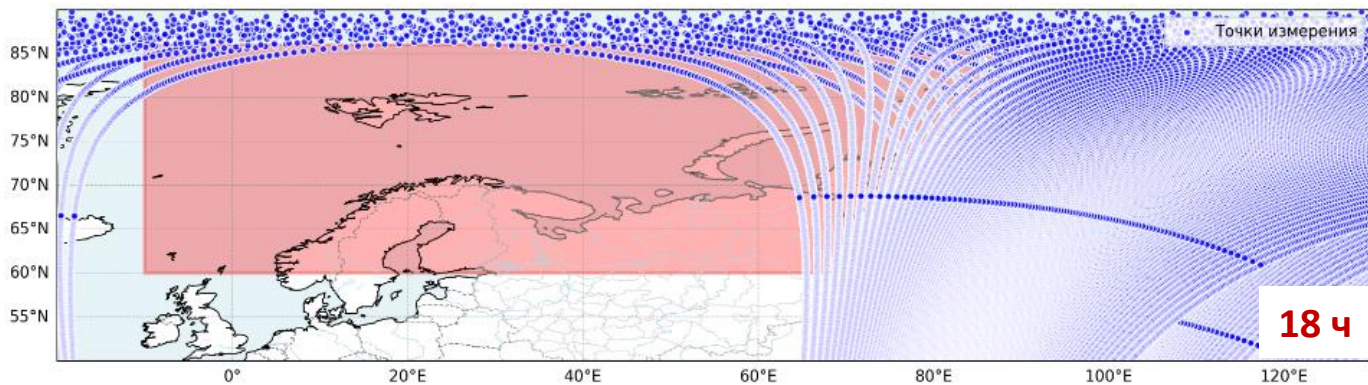
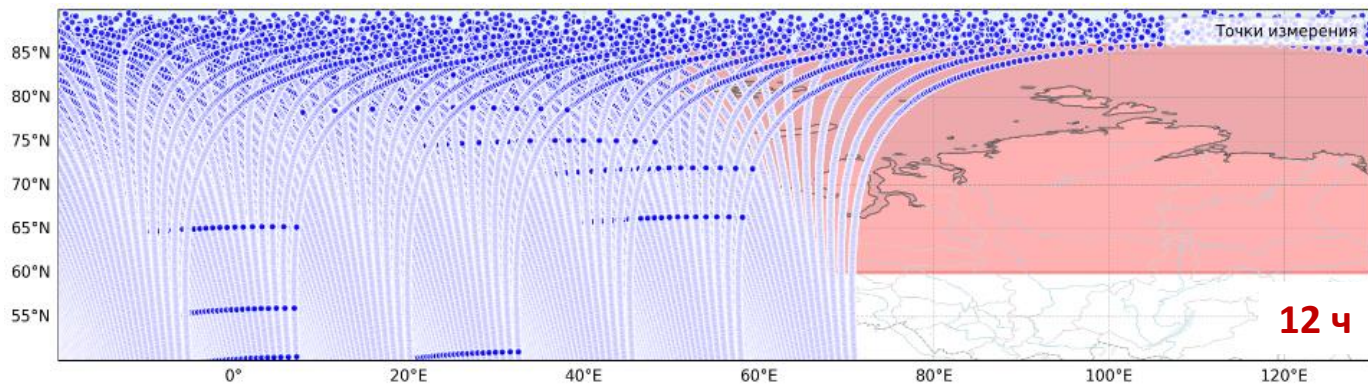
Охват данными ASCAT



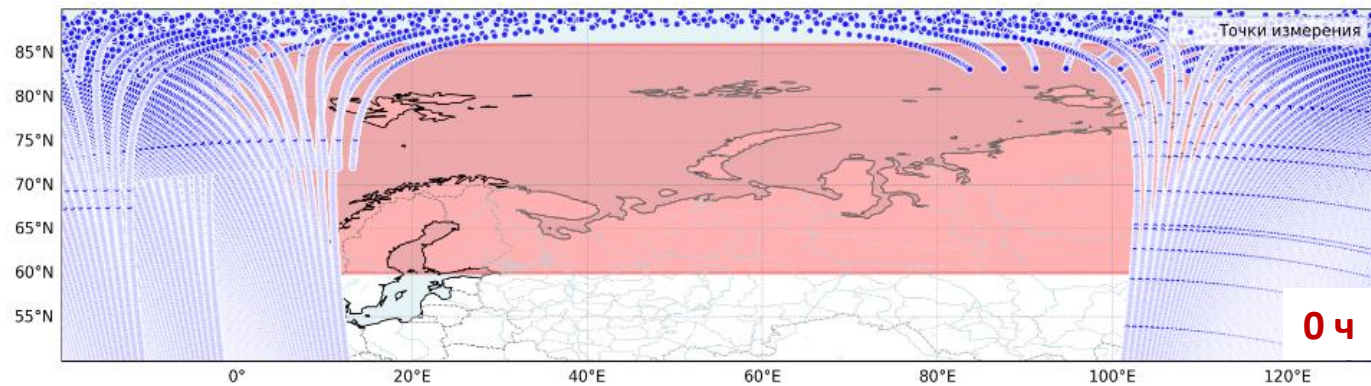
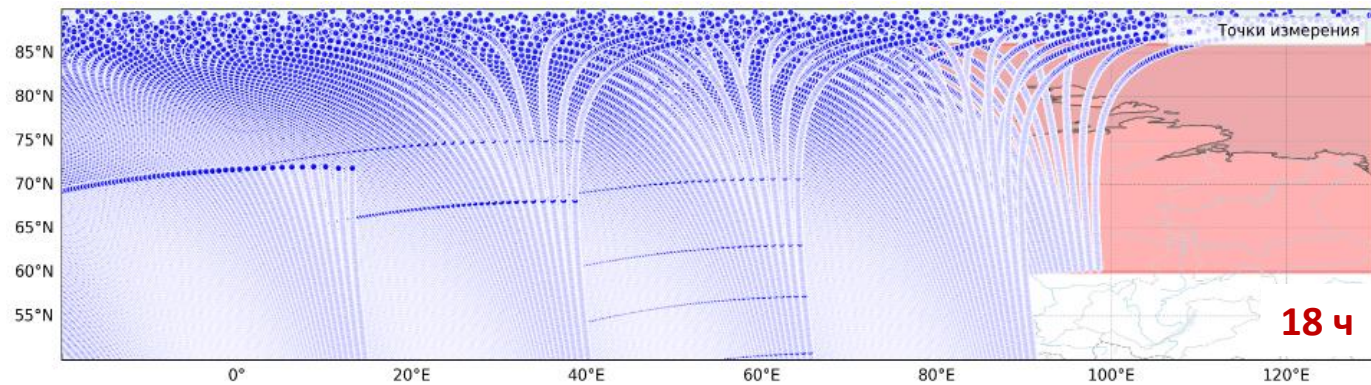
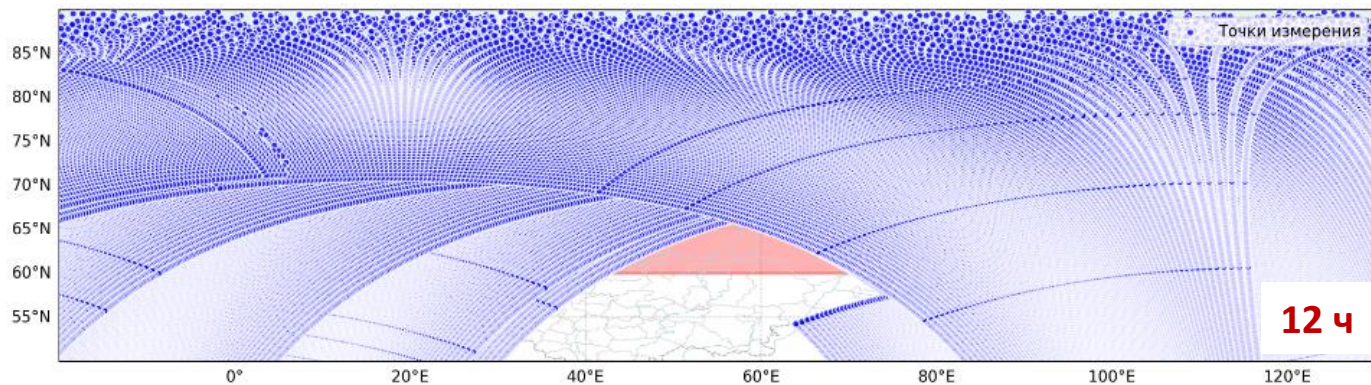
Охват данными AMSU-A



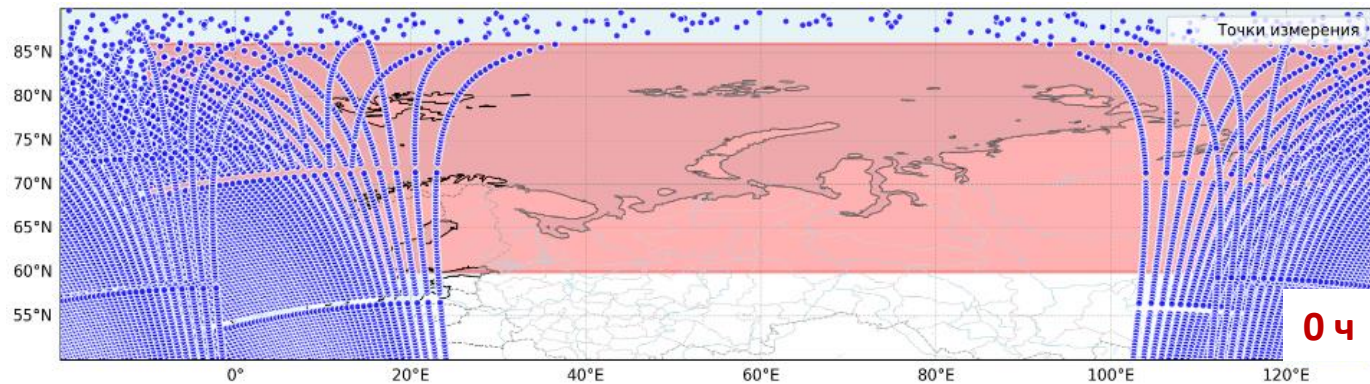
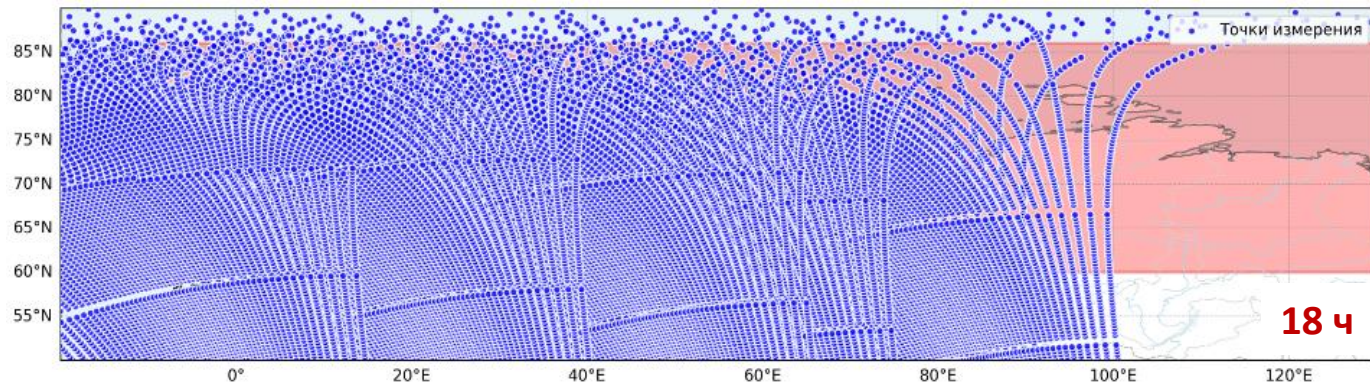
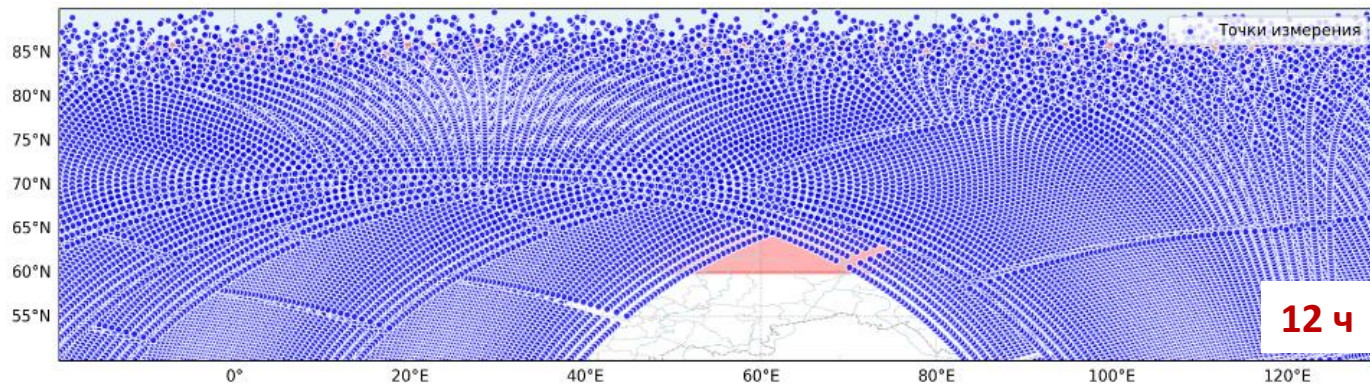
Охват данными ATMS



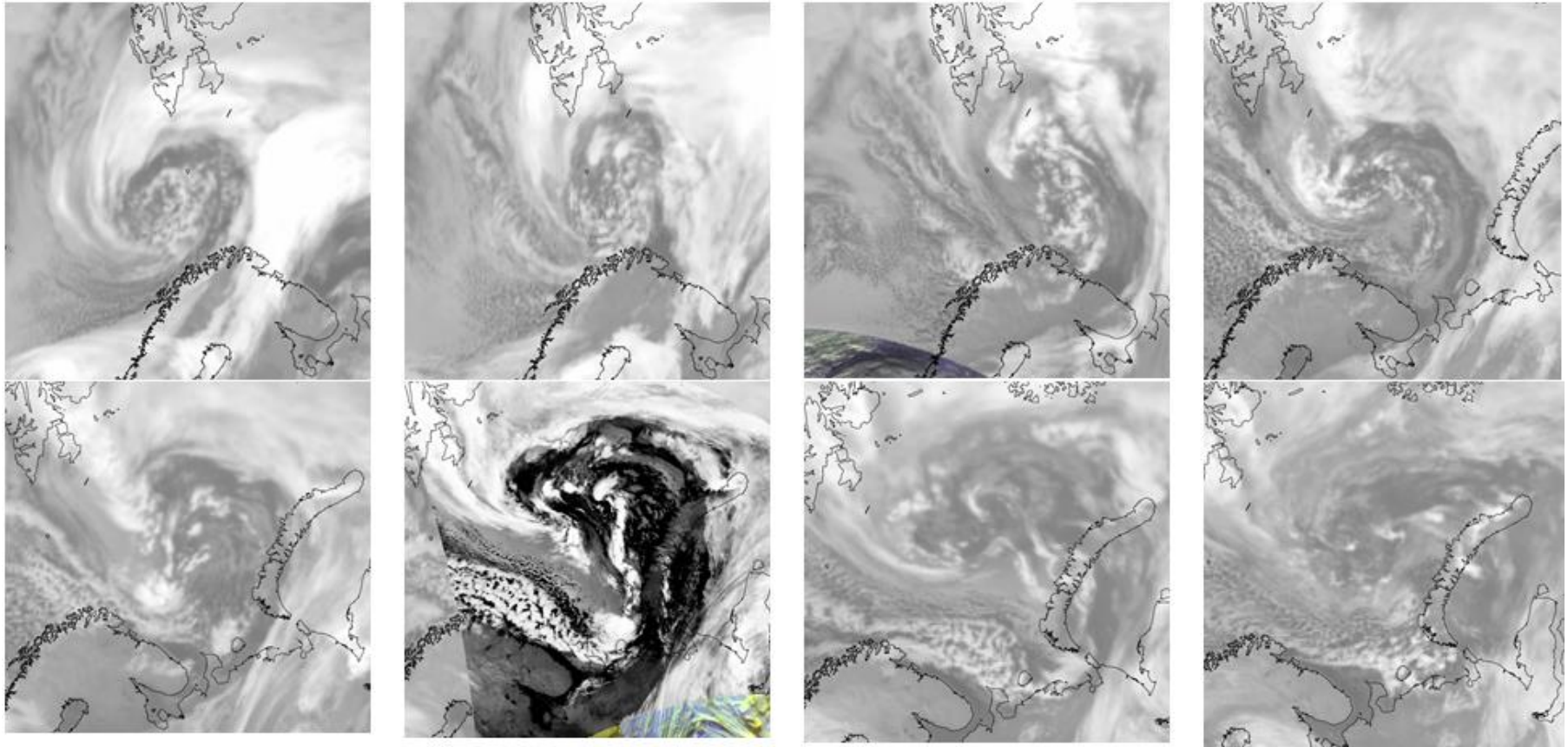
Охват данными MHS



Охват данными HIRS4



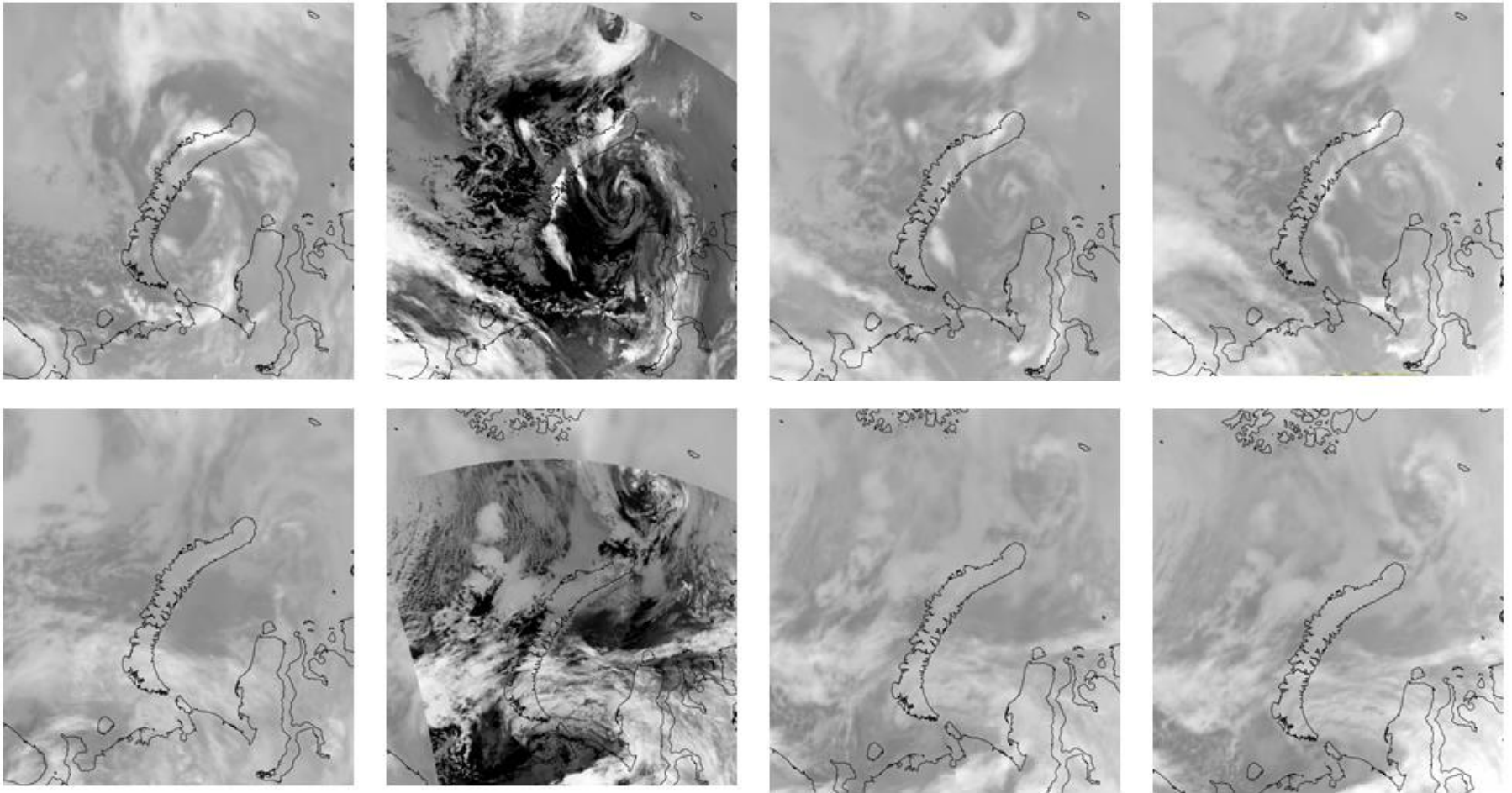
Исследуемый объект



Спутниковые изображения с ПМЦ (Арктика-М №1 и №2, NOAA-18 и 19) за период с 0 ч ВСВ 29.11.2024 г. по 18 ч ВСВ 30.11.2024 г. с шагом 6 ч

ПМЦ возник в Норвежском море, двигался на северо-восток вдоль Скандинавского полуострова и к началу суток 29 ноября 2024 г. вошел в расчетную область. После вхождения в Баренцево море ПМЦ продолжил движение к архипелагу Новая Земля.

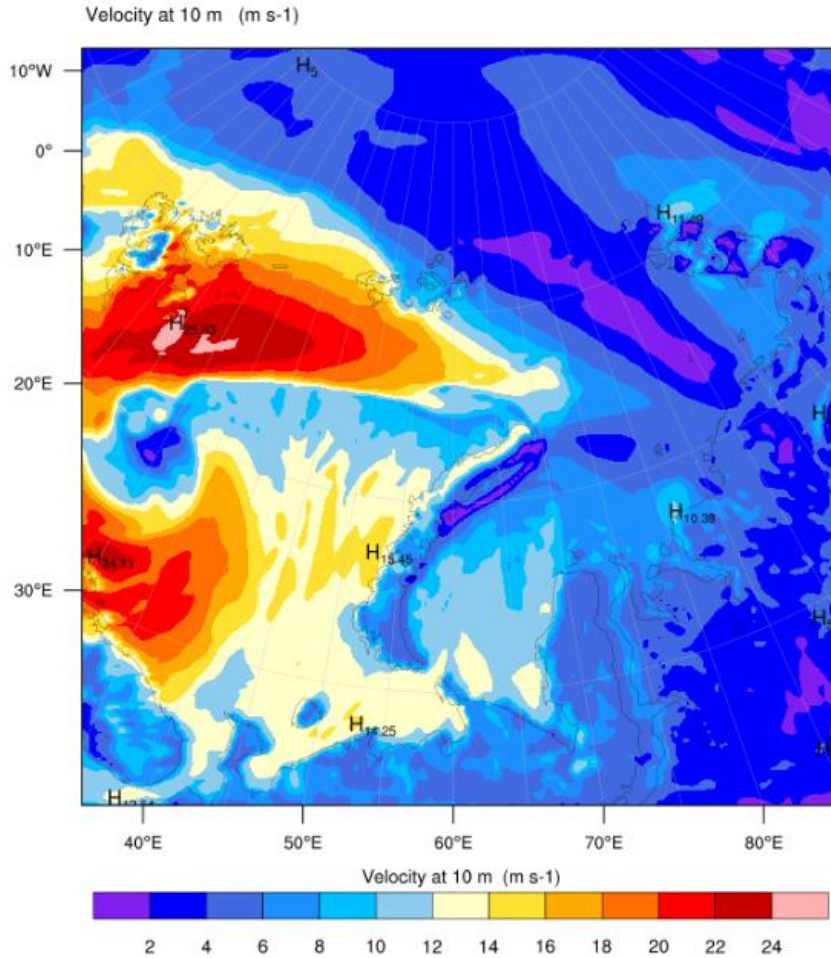
Исследуемый объект



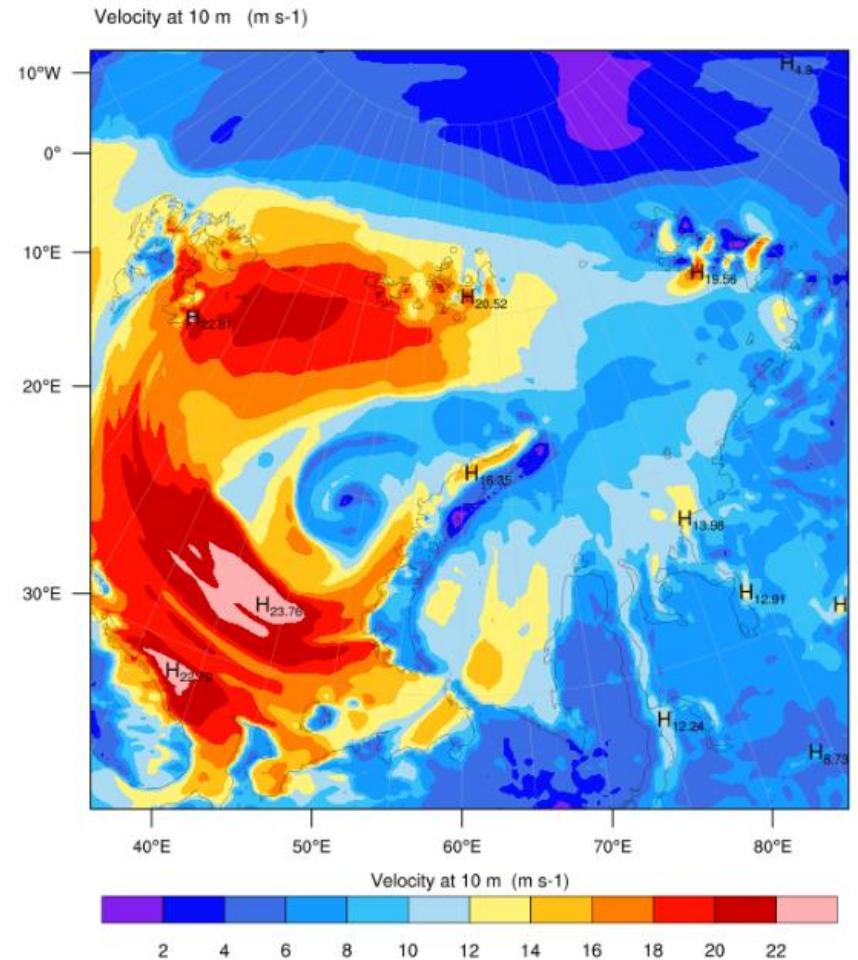
Спутниковые изображения с ПМЦ (Арктика-М №1 и №2, NOAA-18 и 19) за период с 18 ч ВСВ 01.12.2024 г. по 12 ч ВСВ 03.12.2024 г. с шагом 6 ч

После того как циклон пересек Новую Землю (к середине дня 1 декабря) он стал ослабевать, немного уменьшился в размерах и дойдя до Обской губы продолжил движение уже на север.

Исследуемый объект

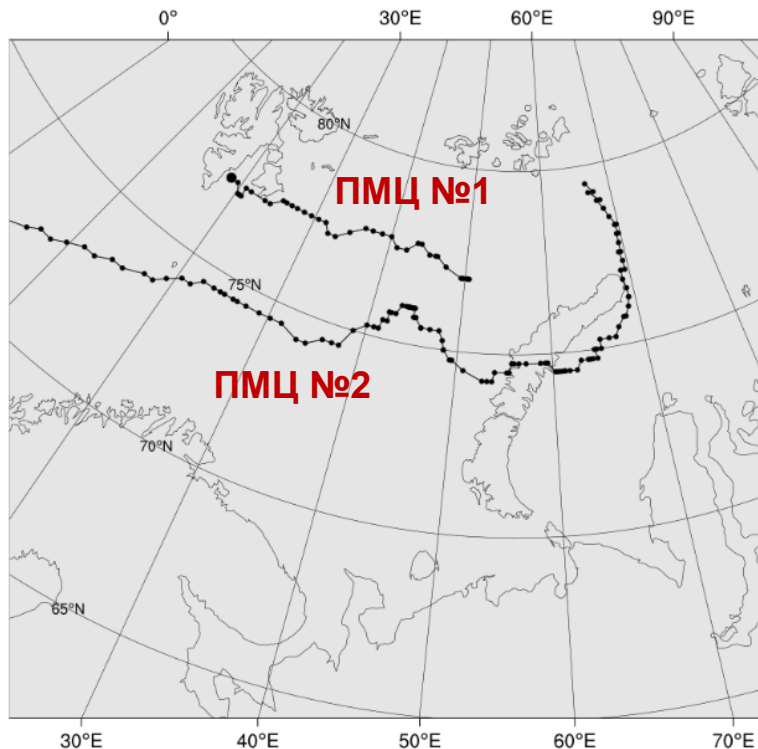


Карта приземного ветра на 12 ч ВСВ
29.11.2024 г. (прогноз от 0 ч ВСВ
28.11.2024 г.)



Карта приземного ветра на 12 ч ВСВ
30.11.2024 г. (прогноз от 0 ч ВСВ
29.11.2024 г.)

Квазиреальные траектории ПМЦ по данным ERA5

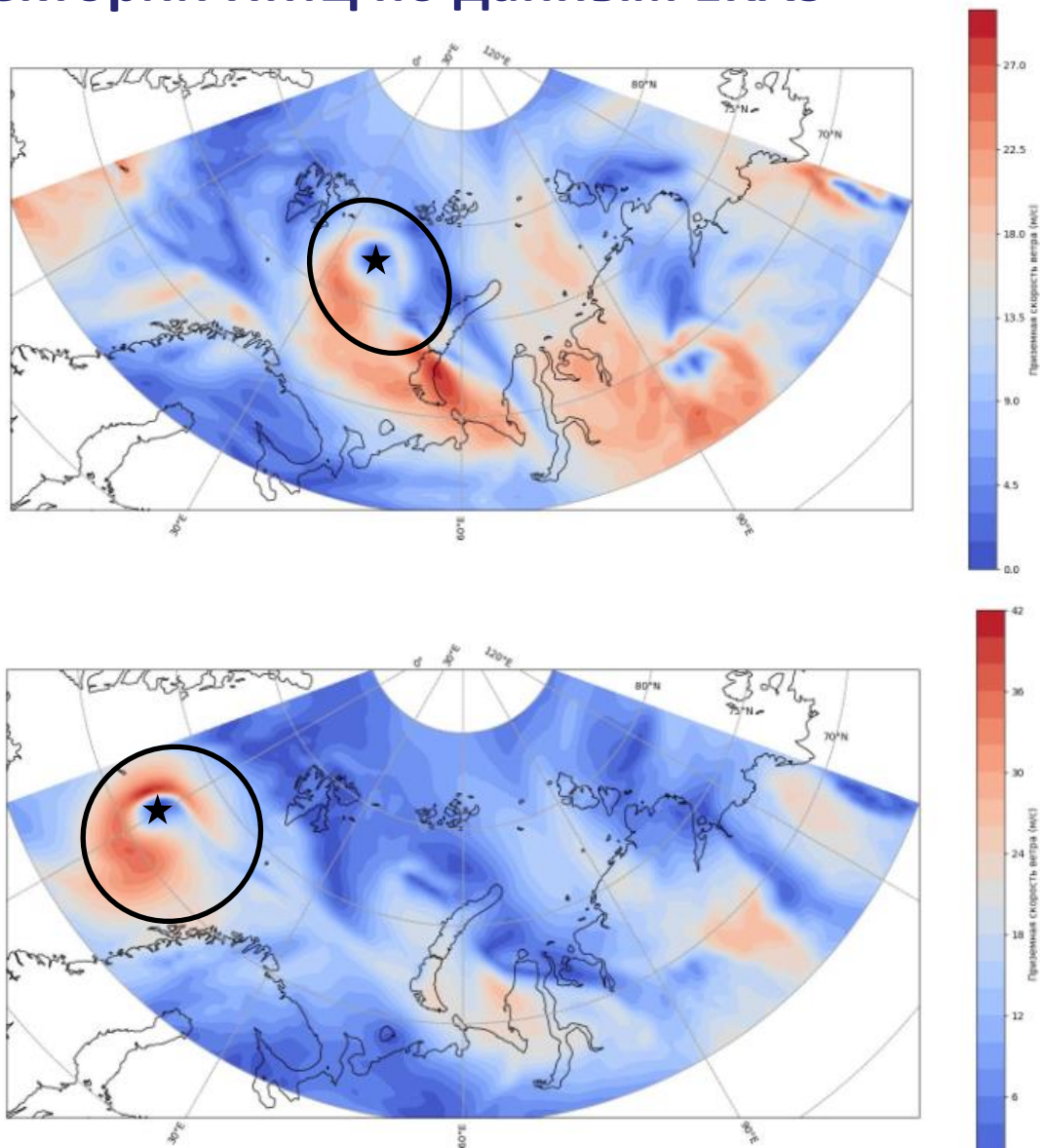


ПМЦ №1

03 ч 27.11.2024 – 15 ч 28.11.2024

ПМЦ №2

06 ч 28.11.2024 – 12 ч 03.12.2024



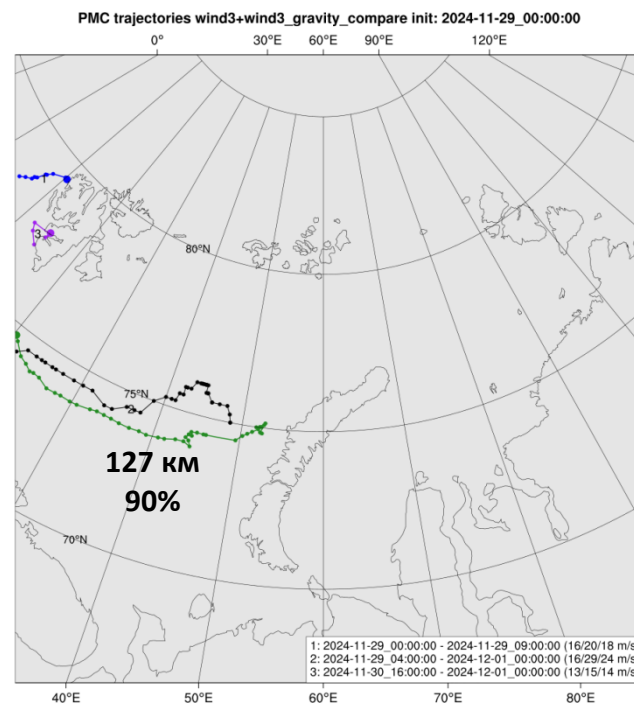
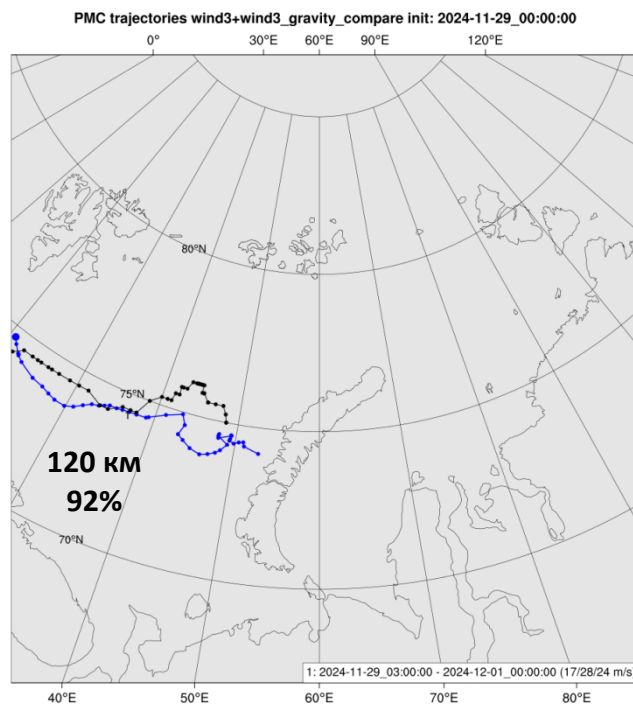
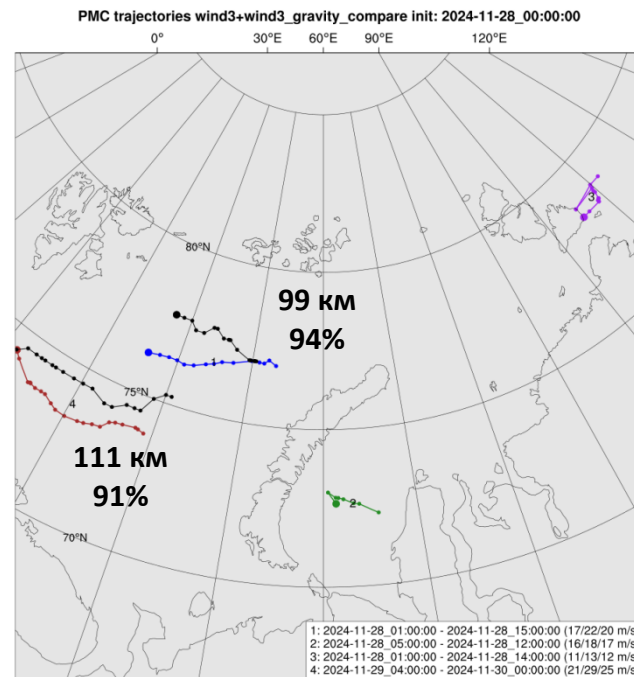
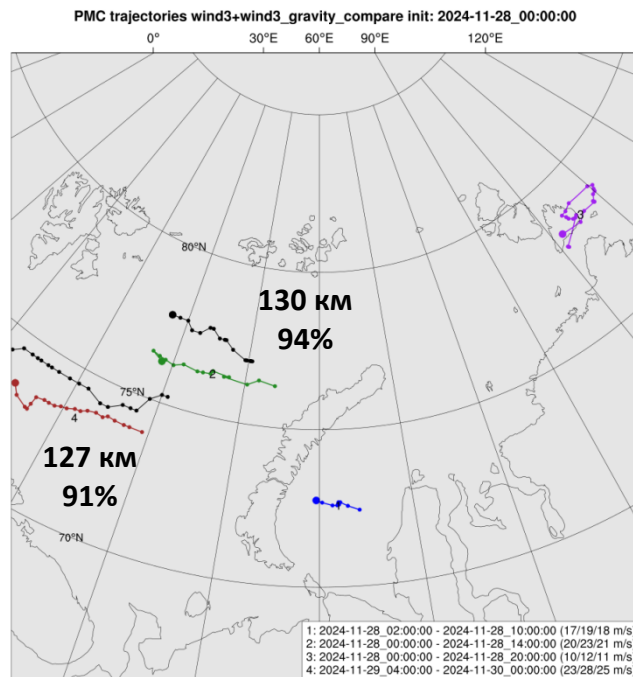
Для оценки точности представления прогностической траектории «реальная» траектория исследуемого ПМЦ была построена на основе данных реанализа ERA5 (поле ветра на уровне 850 гПа). С 27 по 28 ноября на севере Баренцева моря идентифицировался еще один ПМЦ.

Прогноз на сетке 12 км

Слева без усвоения,
справа с усвоением
(SYNOP + ASCAT + ALLSAT)
черные траектории –
квазиреальные, цветные
– прогностические

Сверху вниз:
счет от 0ч 28.11.2024,
счет от 0ч 29.11.2024

В км указана средняя
ошибка воспроизведения
траектории,
в % - полнота ее
воспроизведения.

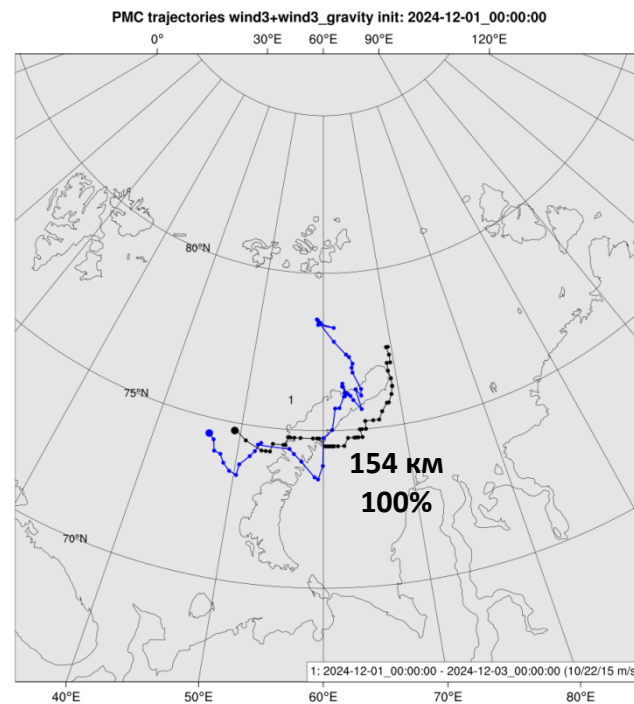
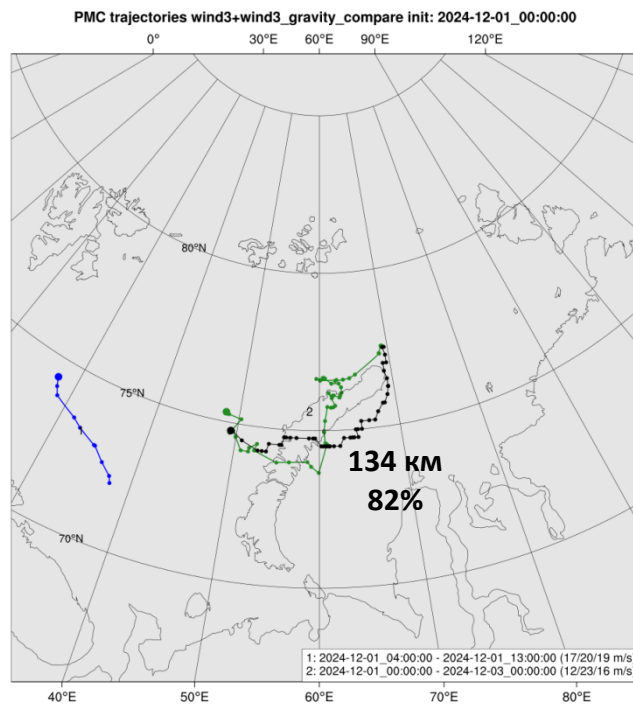
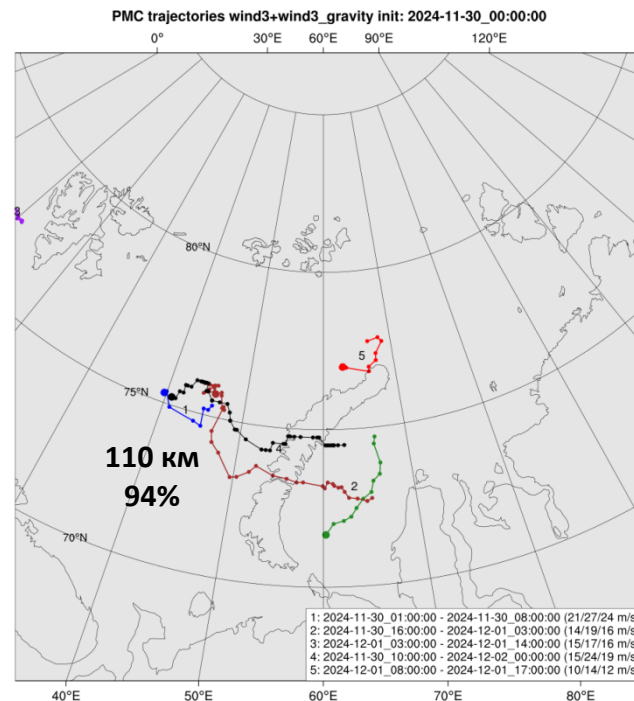
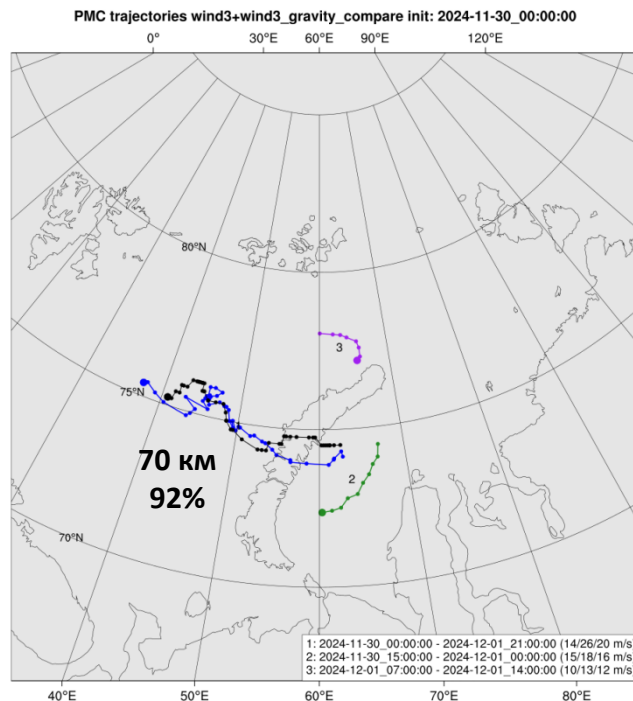


Прогноз на сетке 12 км

Слева без усвоения,
справа с усвоением
(SYNOP + ASCAT + ALLSAT)
черные траектории –
квазиреальные, цветные
– прогностические

Сверху вниз:
счет от 0ч 30.11.2024,
счет от 0ч 01.12.2024

В км указана средняя
ошибка воспроизведения
траектории,
в % - полнота ее
воспроизведения.

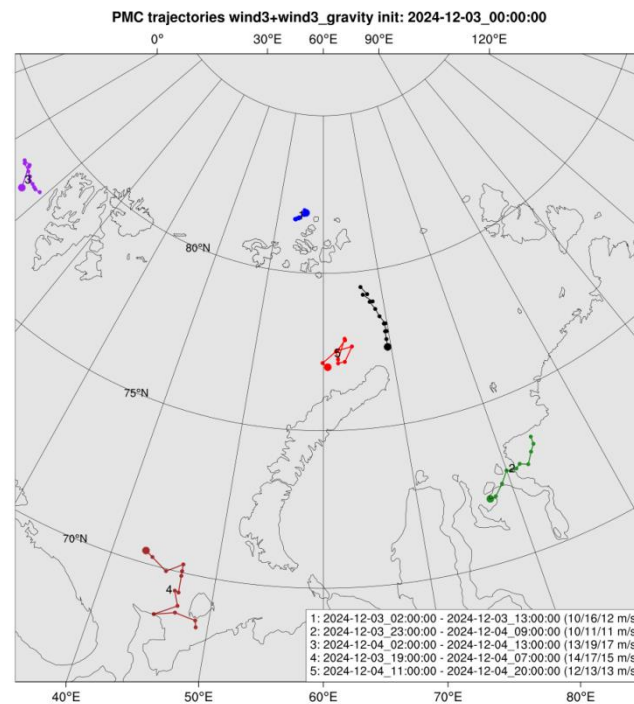
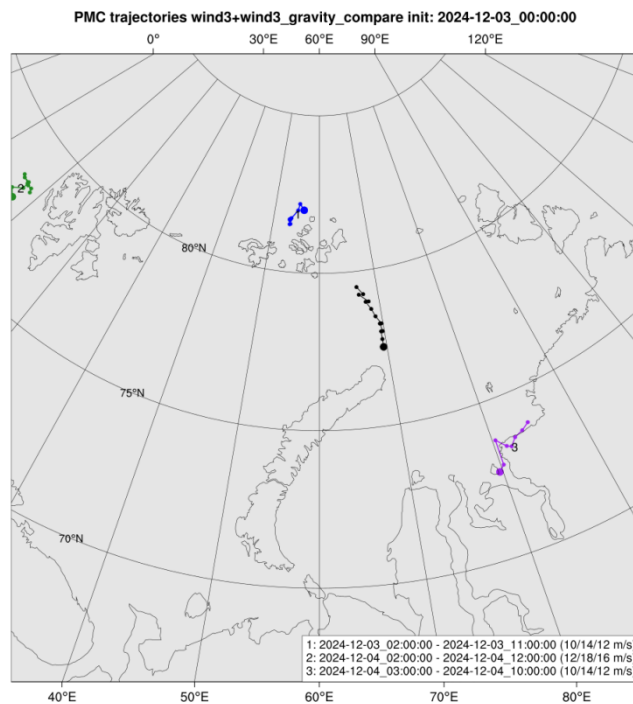
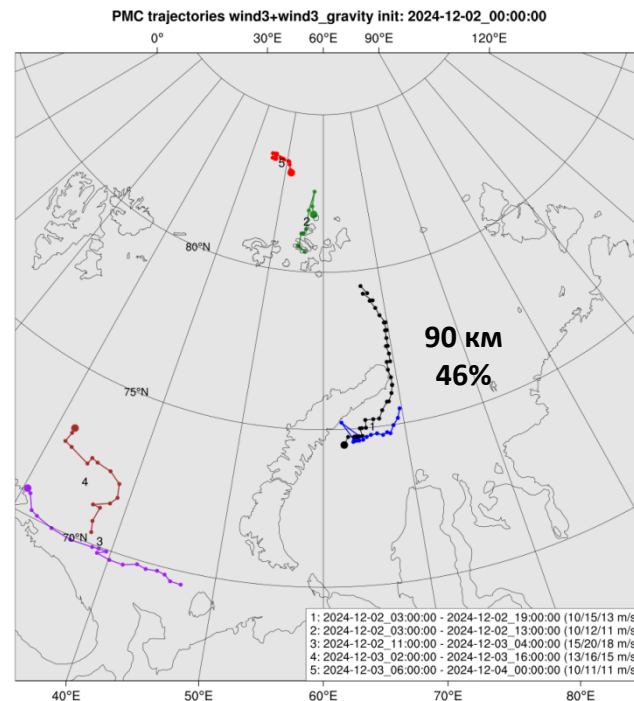
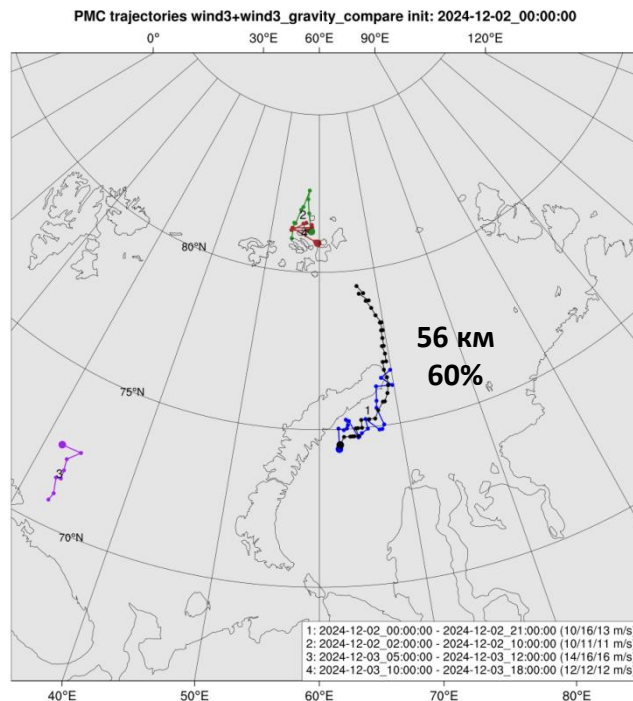


Прогноз на сетке 12 км

Слева без усвоения,
справа с усвоением
(SYNOP + ASCAT + ALLSAT)
черные траектории –
квазиреальные, цветные
– прогностические

Сверху вниз:
счет от 0ч 02.12.2024,
счет от 0ч 03.12.2024

В км указана средняя
ошибка воспроизведения
траектории,
в % - полнота ее
воспроизведения.

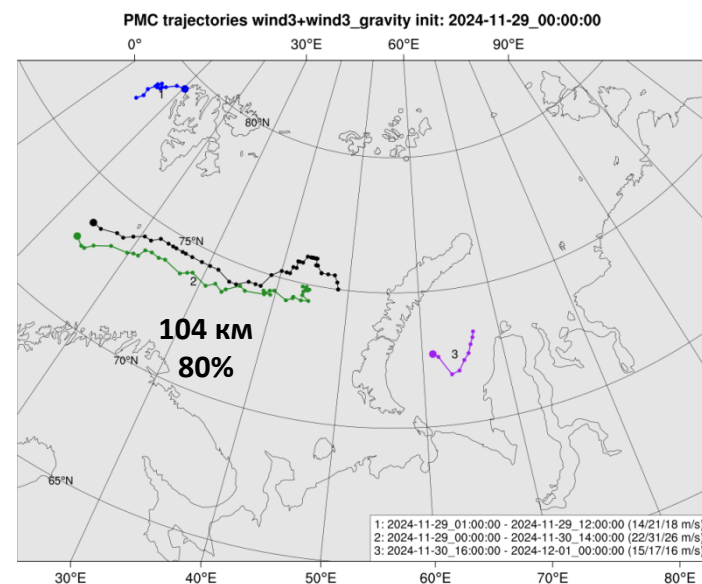
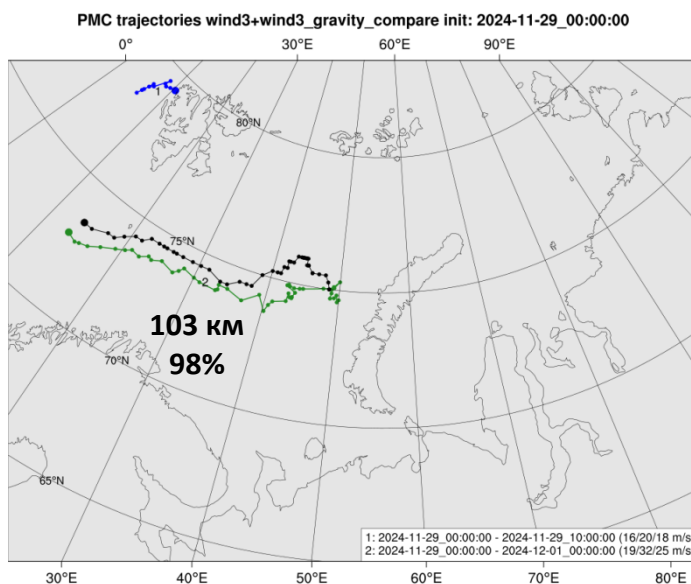
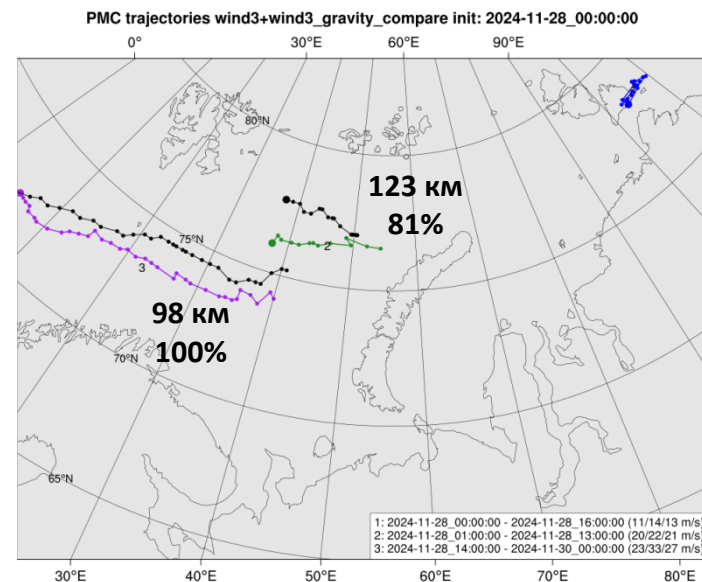
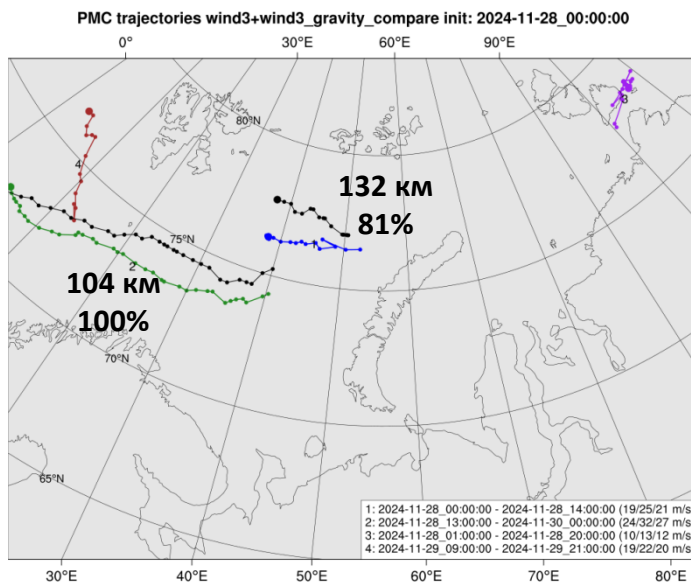


Прогноз на сетке 8 км

Слева без усвоения,
справа с усвоением
(SYNOP + ASCAT + ALLSAT)
черные траектории –
квазиреальные, цветные
– прогностические

Сверху вниз:
счет от 0ч 28.11.2024,
счет от 0ч 29.11.2024

В км указана средняя
ошибка воспроизведения
траектории,
в % - полнота ее
воспроизведения.

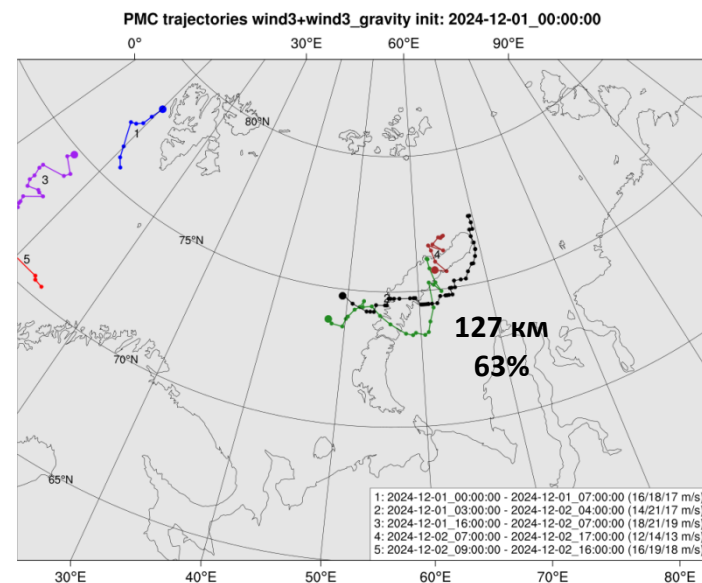
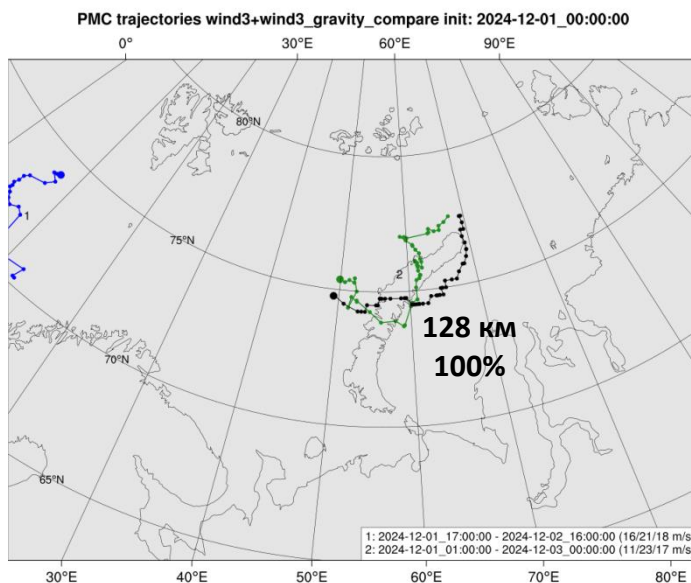
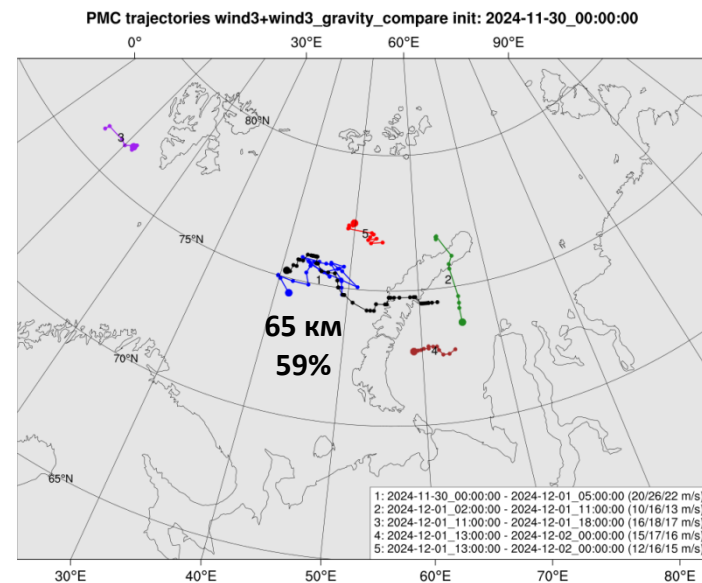
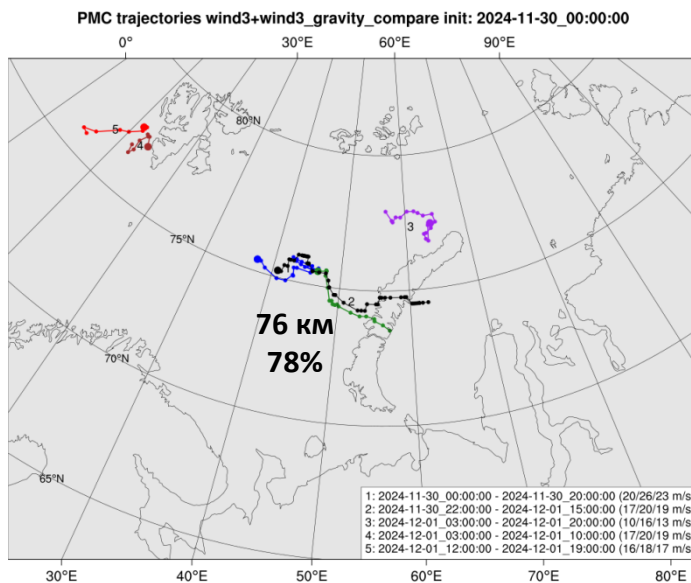


Прогноз на сетке 8 км

Слева без усвоения,
справа с усвоением
(SYNOP + ASCAT + ALLSAT)
черные траектории –
квазиреальные, цветные
– прогностические

Сверху вниз:
счет от 0ч 30.11.2024,
счет от 0ч 01.12.2024

В км указана средняя
ошибка воспроизведения
траектории,
в % - полнота ее
воспроизведения.

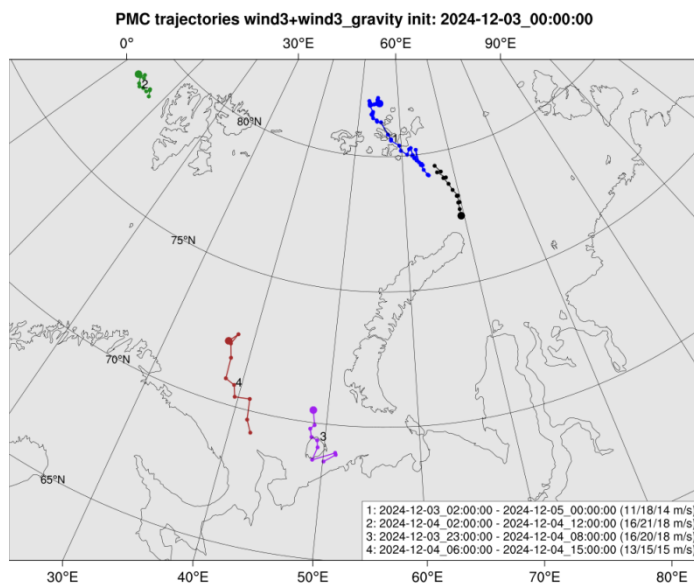
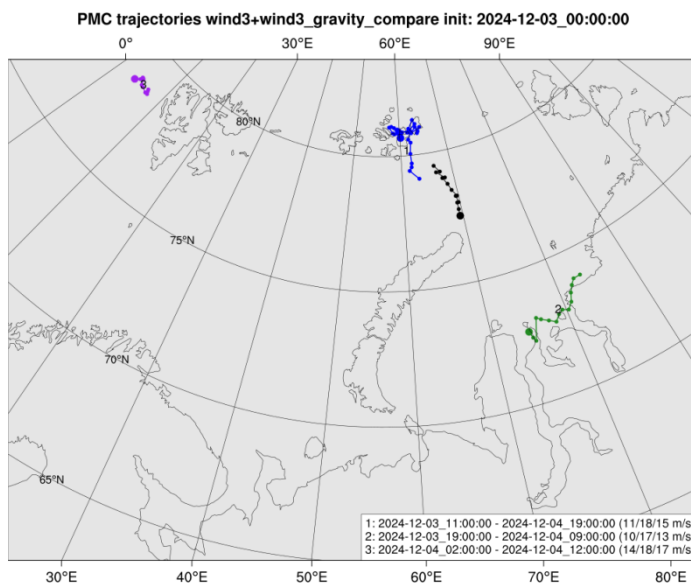
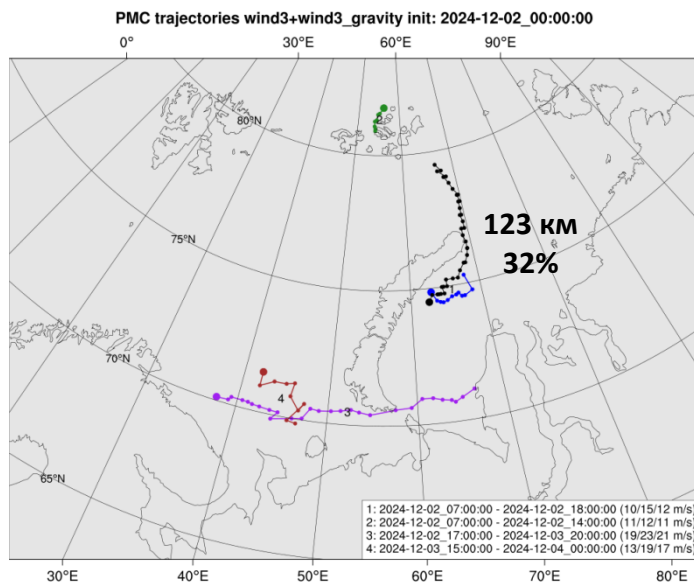
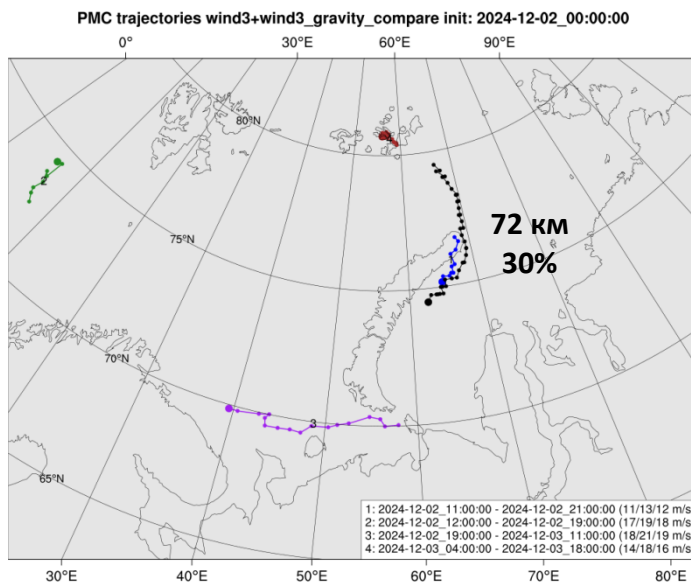


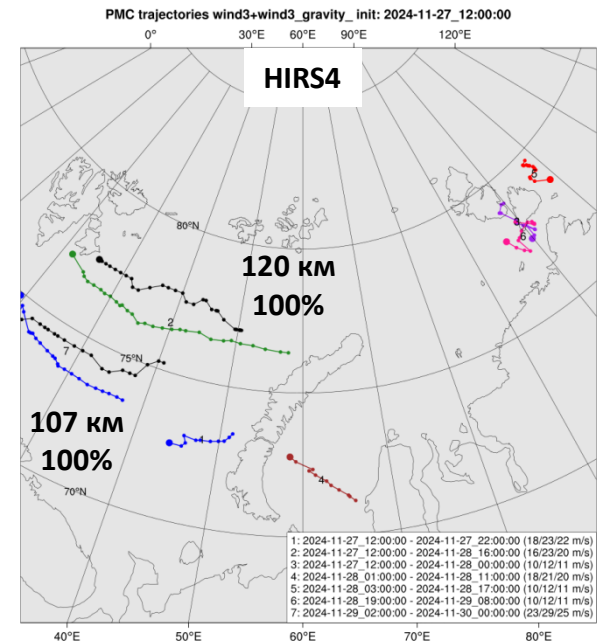
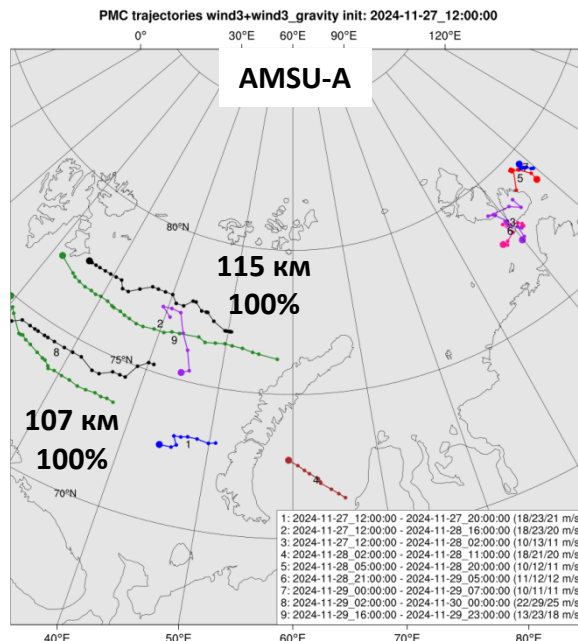
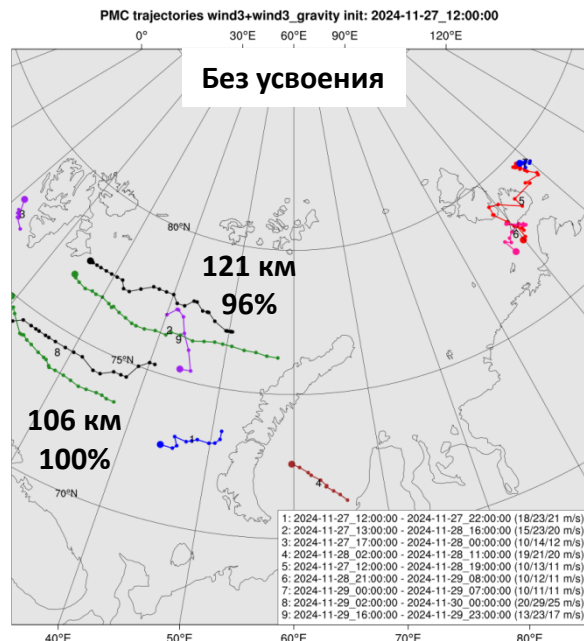
Прогноз на сетке 8 км

Слева без усвоения,
справа с усвоением
(SYNOR + ASCAT + ALLSAT)
черные траектории –
квазиреальные, цветные
– прогностические

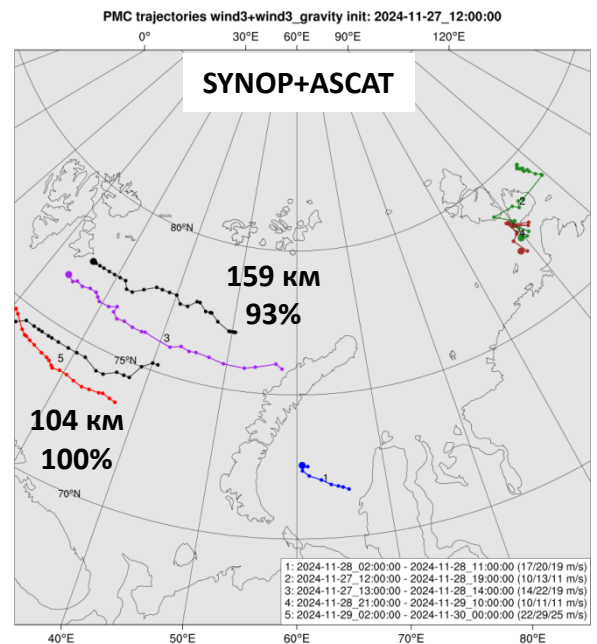
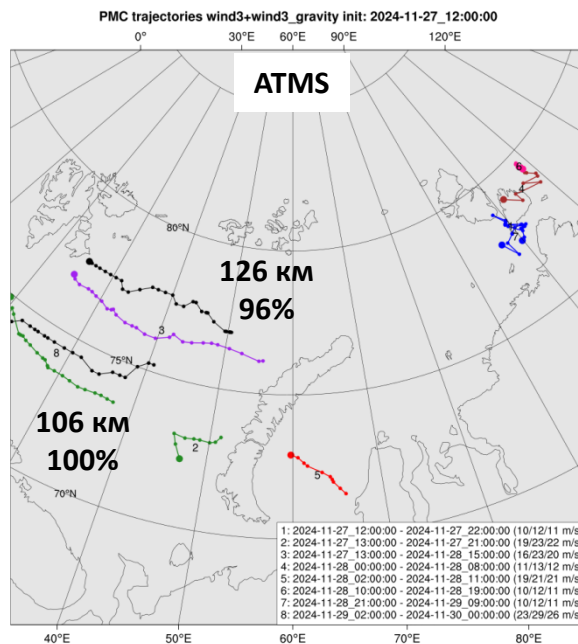
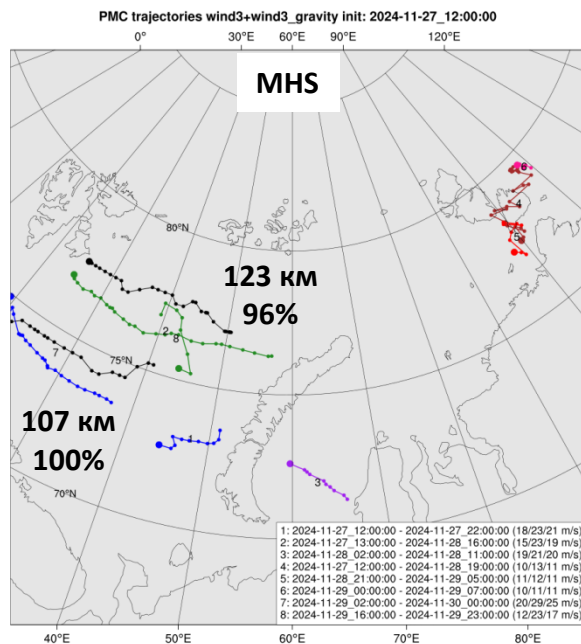
Сверху вниз:
счет от 0ч 02.12.2024,
счет от 0ч 03.12.2024

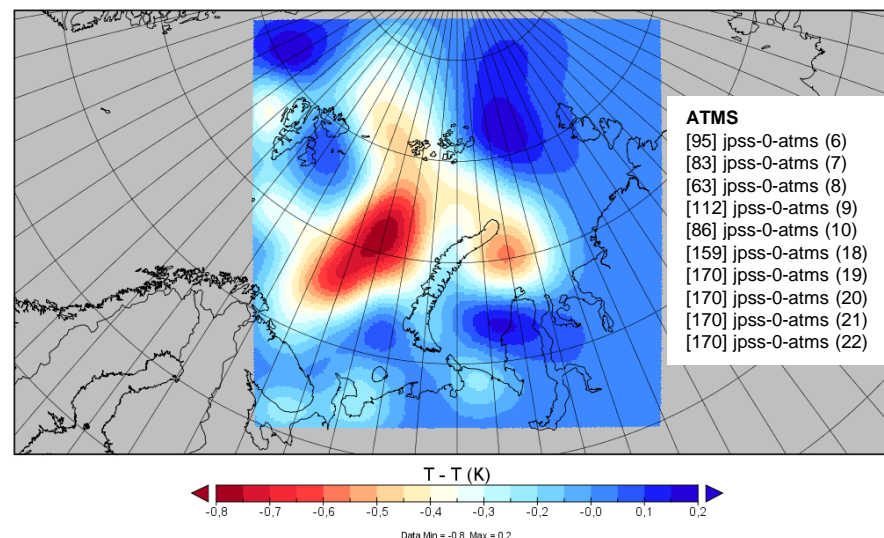
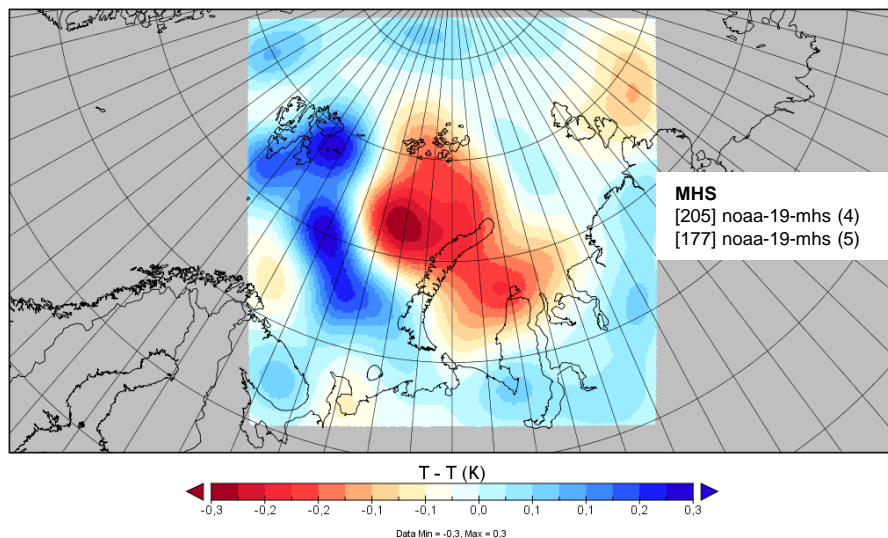
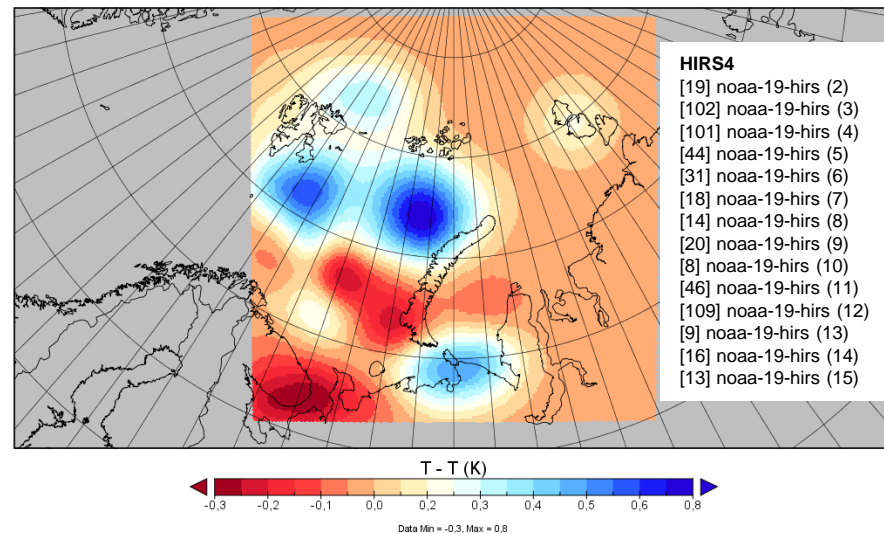
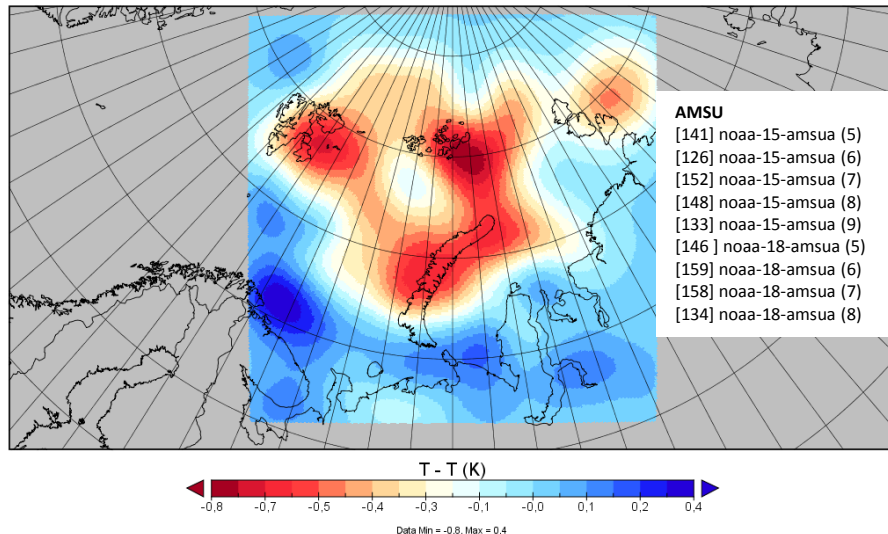
В км указана средняя
ошибка воспроизведения
траектории,
в % - полнота ее
воспроизведения.



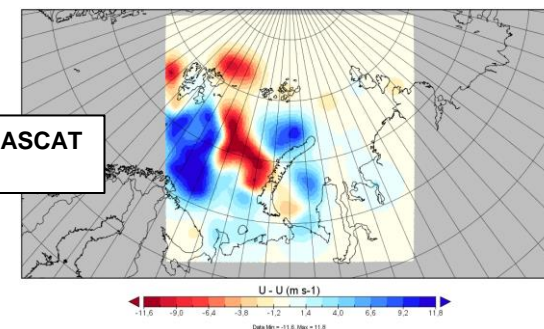
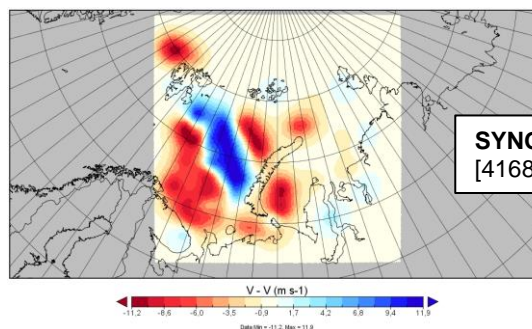


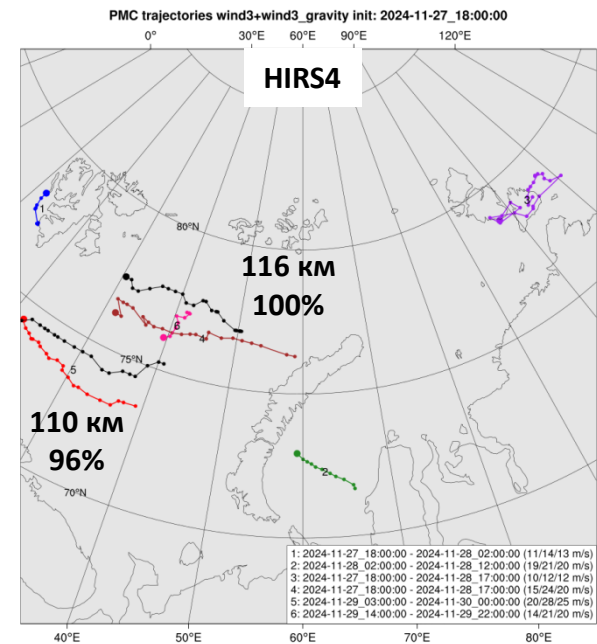
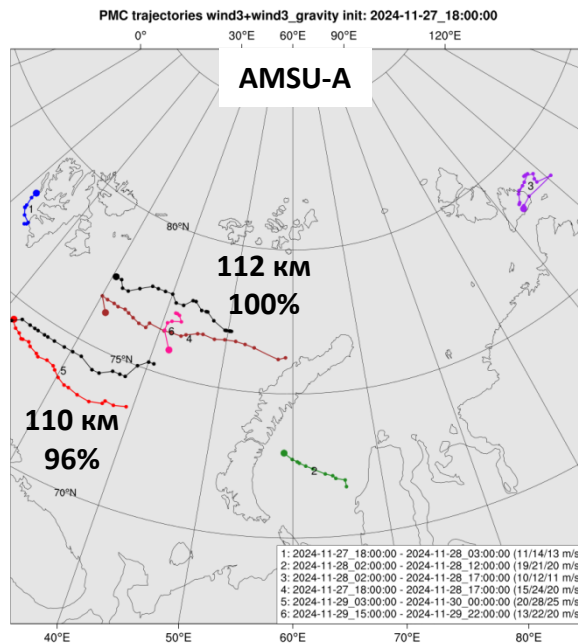
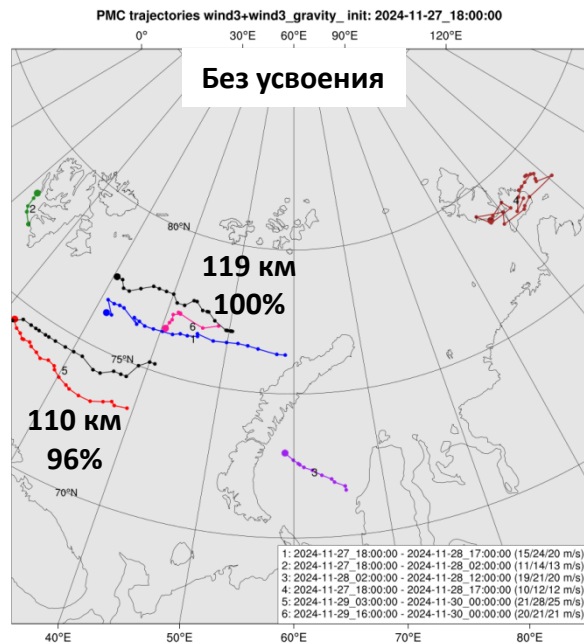
Прогноз на сетке 12 км, счет от 12 ч 27.11.2024



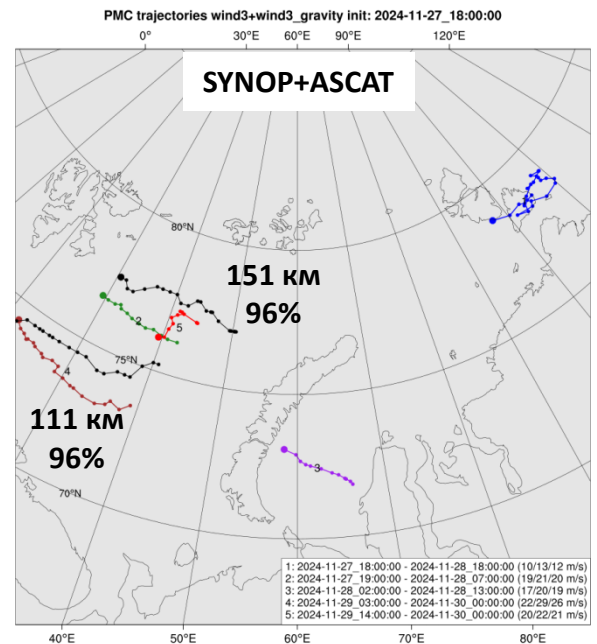
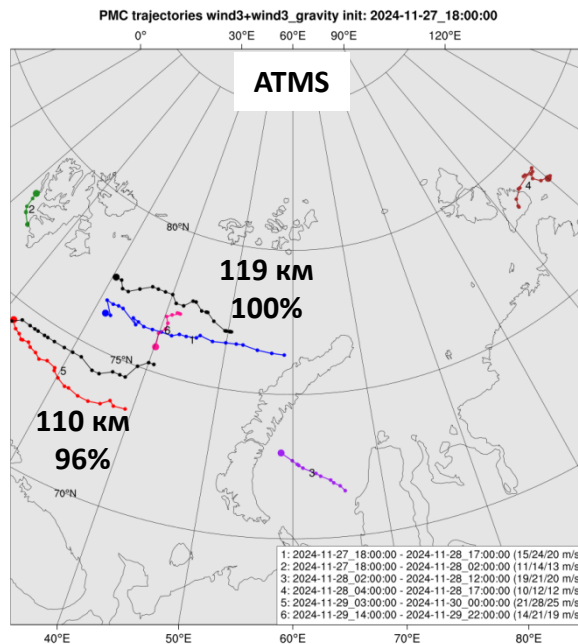
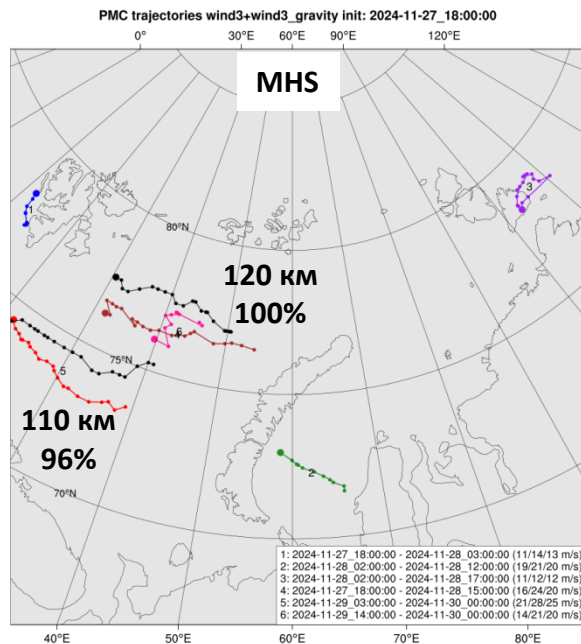


Статистика по количеству усвоенных данных (в []) в различных каналах (в ()) от различных приборов на 12ч на фоне разности полей T нижнего расчетного уровня до и после усвоения, для SYNOP+ASCAT на фоне разности полей V, U





Прогноз на сетке 12 км, счет от 18 ч 27.11.2024



Заключение

- В действующий программный комплекс прогноза ПМЦ, функционирующий на базе НПО «Тайфун», был встроен **блок системы усвоения данных модели WRF – WRFDA** (WRF Data Assimilation).
- **Проведены вычислительные эксперименты** в различных конфигурациях для выбора наилучшей с точки зрения качества прогноза траекторий ПМЦ. В частности конфигурации с использованием различных шагов сетки (8 и 12 км), различных стартовых сроков для запуска моделирования (18 ч и 12 ч предыдущих суток, а также 0 ч текущих суток), различных спутниковых данных для усвоения (SYNOP+ASCAT, AMSU-A, ATMS, HIRS, MHS), различных режимов усвоения (весь комплекс данных и данные каждого прибора по отдельности). Моделирование охватывало период с 27 ноября по 3 декабря 2024 г., в течение которого в исследуемом регионе выявлялись два ПМЦ, один из которых просуществовал 6 суток.
- По данным реанализа ERA5 **построены квазиреальные траектории** (с шагом 1 ч) двух рассматриваемых ПМЦ для их последующего сравнения с прогностическими траекториями.
- По результатам проведенных вычислительных экспериментов анализировалась пространственная ошибка воспроизведения моделью WRF траекторий ПМЦ (E_d) и полнота их воспроизведения (E_p). Установлено, что на сетке 12 км без усвоения данных средняя ошибка E_d составила 126 км, E_p – 92%, с усвоением: E_d – 112 км, E_p – 92%. На сетке 8 км без усвоения: E_d – 113 км, E_p – 93%, с усвоением: E_d – 108 км, E_p – 87%. Кроме того установлено, что при старте счета в 12 ч или в 18 ч наилучшие результаты показывает **схема одиночного усвоения данных AMSU-A** (E_d – 111 км, E_p – 99%), вероятно по причине учета (усвоения) большего количества данных от этого прибора в пределах расчетной области. Однако в целом отличие результатов от использования тех или иных данных можно считать незначительным (ΔE_d не более 10 км, ΔE_p не более 6%).
- Наилучшие результаты (плавная, цельная траектория, идущая вдоль реальной с некоторым систематическим смещением) отмечаются на участке перемещения ПМЦ **по открытой воде**, на участке, где ПМЦ пересекает сушу качество прогноза заметно ухудшается - отмечаются скачкообразные, разрывные траектории, воспроизводящие лишь часть длины реальной траектории.
- С учетом полученных результатов **предлагается модифицировать схему численного моделирования** в работе программного комплекса прогноза ПМЦ: уменьшить шаг расчетной сетки с 12 до 8 км, расширить западные границы расчетной области, включить схему усвоения данных (доступных на момент запуска) и отложенного старта в 18 ч.

Ссылки

1. *Rasmussen E., Turner J.* Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions / Cambridge University Press, 2003. – 612p.
2. *Гончаров Р.И., Караваев Д.М., Колесов Б.Г., Лебедев А.Б.* Классификация Арктических мезовихрей / Материалы VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Санкт-Петербург. 16–18 сентября 2020 г. – Изд. ВКА имени А.Ф. Можайского, 2020. – ISBN 978-5-6042484-7-8. – С. 159-164.
3. *Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В., Кулижникова Л.К.* Использование композиции индексов конвективной неустойчивости для прогноза зарождения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России // Российская Арктика. – 2023. – Т. 5. – № 2. – С. 54-64. – DOI: 10.24412/2658-4255- 2023-2-54-64. – EDN: EAJGFJ
4. *Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В., Кулижникова Л.К.* Прототип автоматизированной технологической линии прогноза зарождения и перемещения полярных мезоциклонов для Арктического региона России // Материалы XXII международной конференции "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА" Москва 11-15 ноября 2024 г. - Изд. ИКИ. - 2024. - DOI 10.21046/22DZZconf-2024a. - ISBN 978-5-00015-067-2. – С. 266.
5. *Калмыкова О.В., Козлов С.В., Петриченко С.А.* Автоматизированный программный комплекс прогноза полярных мезомасштабных циклонов в Арктическом регионе России // 2024. - РИД. – Программа. - Номер государственной регистрации РИД 2024688715. - 29.11.2024 г.
6. *Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В., Кулижникова Л.К.* Использование композиции индексов конвективной неустойчивости для прогноза перемещения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России // Российская Арктика. 2024. Т. 6. № 4. С. 60-71. DOI: 10/24412/2658-4255-2024-4-61-72. EDN: QKIPWK.

Спасибо за внимание