



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](mailto:kov@feerc.ru)),

С.В. Козлов ([kozlov-sv@rpatyphoon.ru](mailto:kozlov-sv@rpatyphoon.ru)),

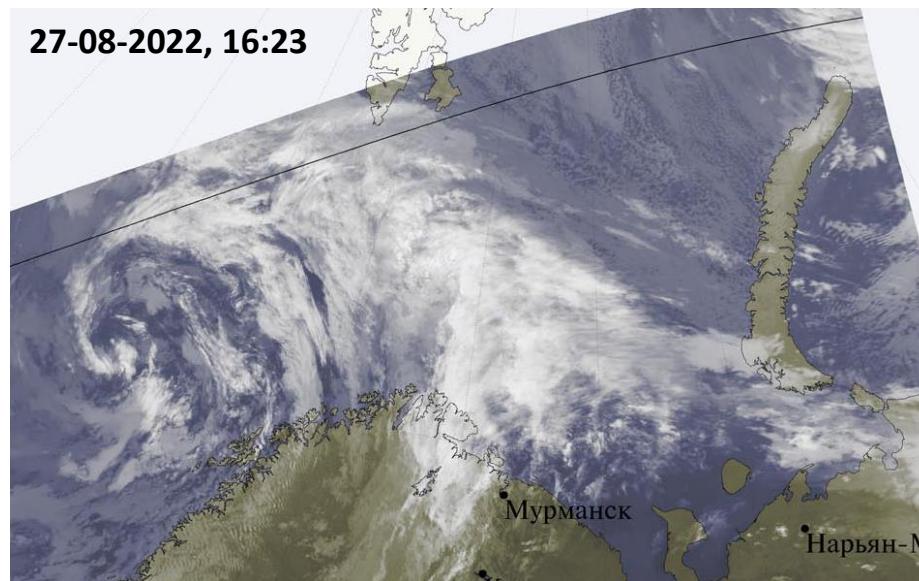
С.А. Петриченко, к.ф.-м.н. ([psa@rpatyphoon.ru](mailto:psa@rpatyphoon.ru))

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  $\alpha$  и  $\beta$  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.

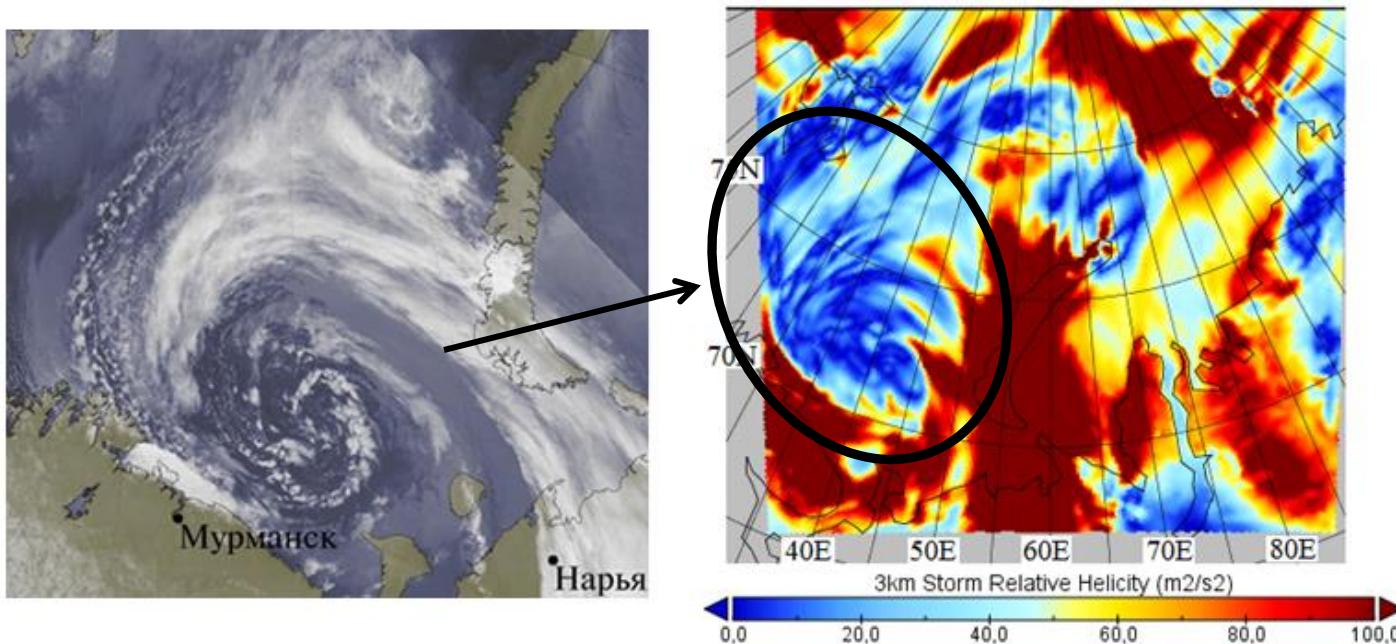
Под это определение попадает очень широкий спектр циклонических образований. От орографических вихрей до небольших фронтальных циклонов на арктическом фронте.



# 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 бароклиновые и конвективные типы мезоциклонов [Гончаров Р.И., Караваев Д.М., Колесов Б.Г., Лебедев А.Б. 2020].

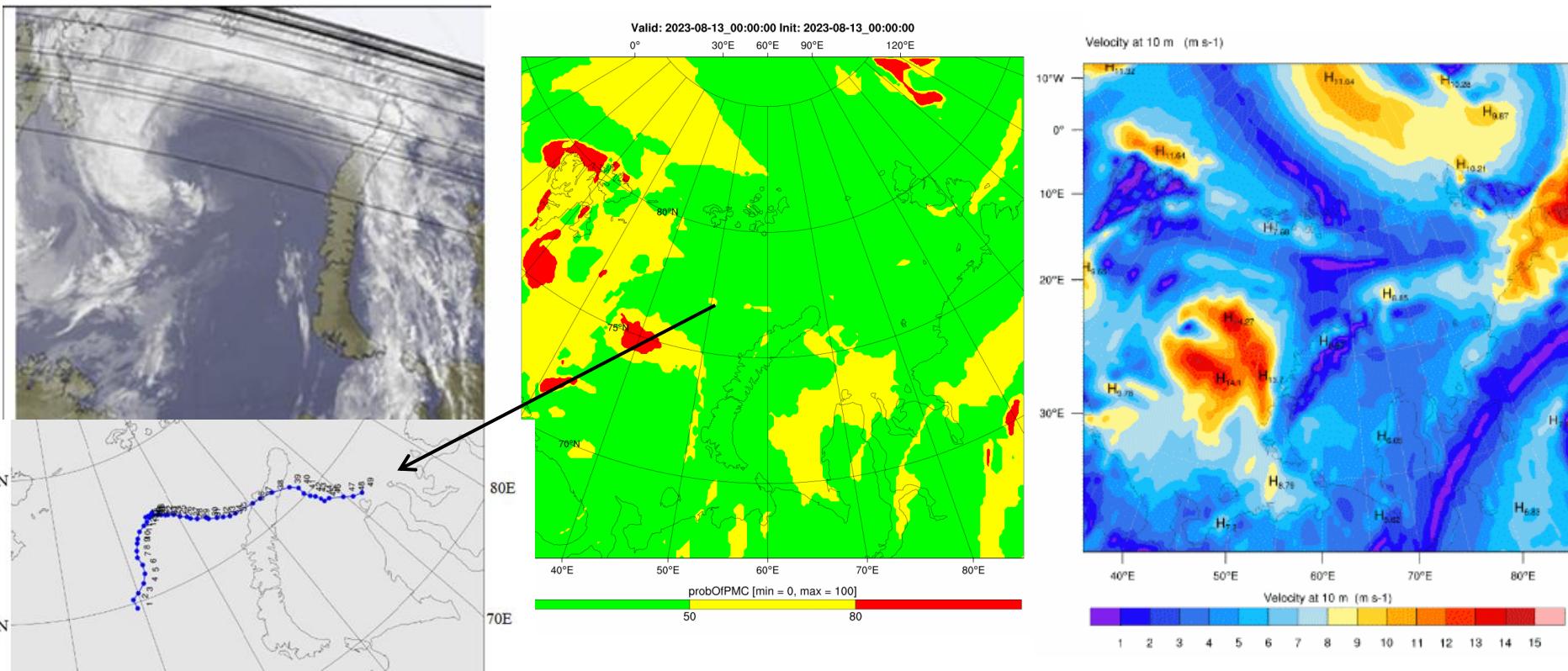
Для прогноза ПМЦ нами было предложено использовать индексы конвективной неустойчивости, расчет которых ведется по выходным данным численного моделирования атмосферы. Поля разных конвективных индексов могут иметь особенности в областях мезоциклонов, возникающих при различных синоптических ситуациях, поскольку 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.

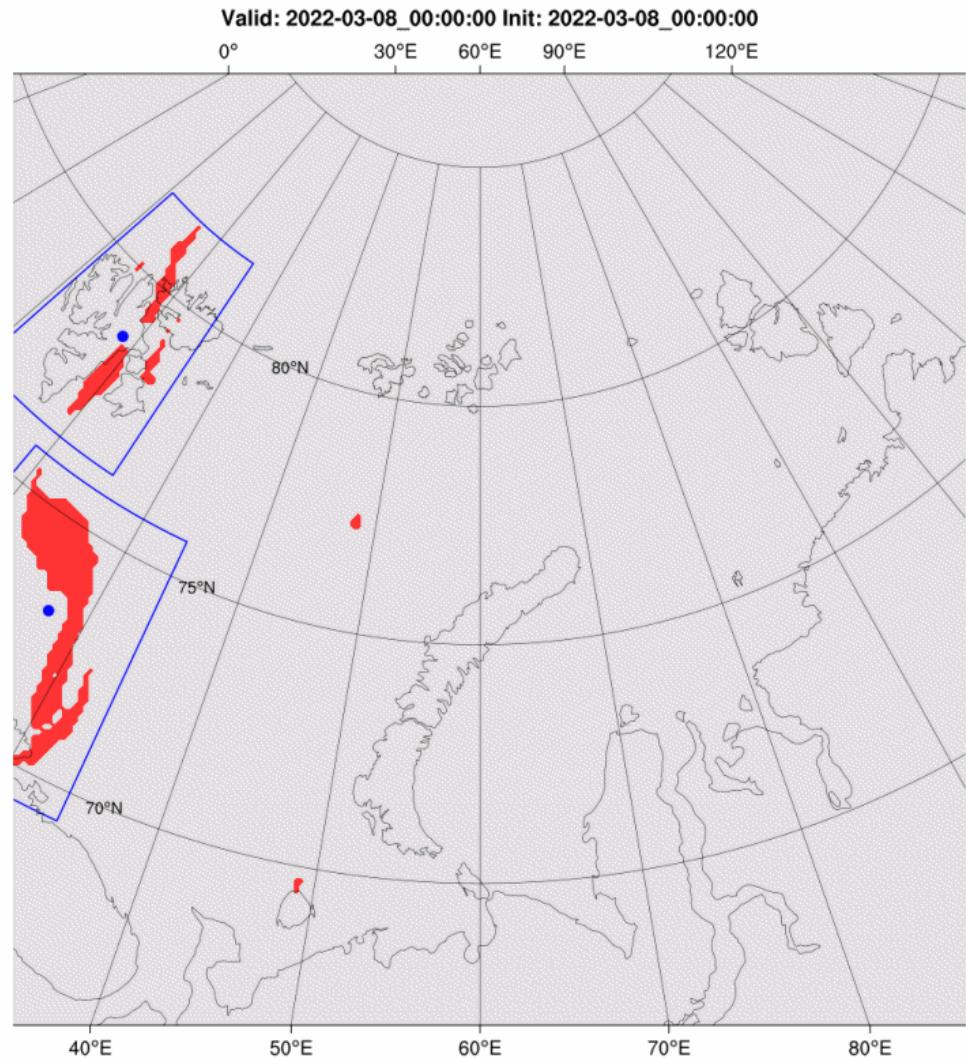
Суперпозиции полей отобранных индексов дают возможность вероятностного прогнозирования областей риска зарождения и существования ПМЦ, а также построения прогностических траекторий их перемещения.



# Прогноз траектории перемещения ПМЦ

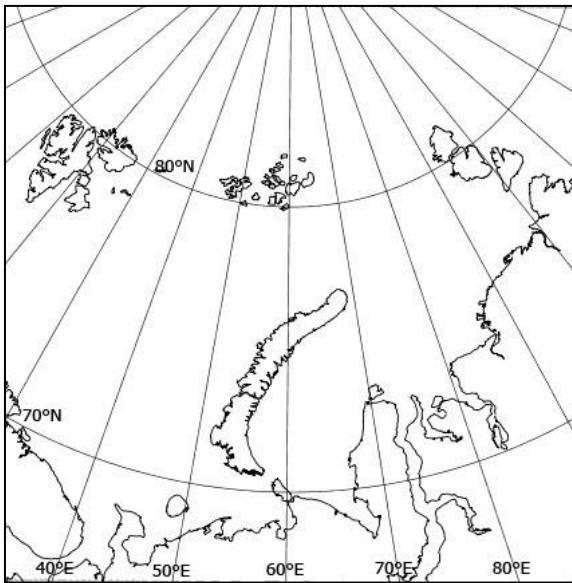
Для построения траектории перемещения прогнозируемых ПМЦ был разработан алгоритм расчета центра мезоциклона.

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.

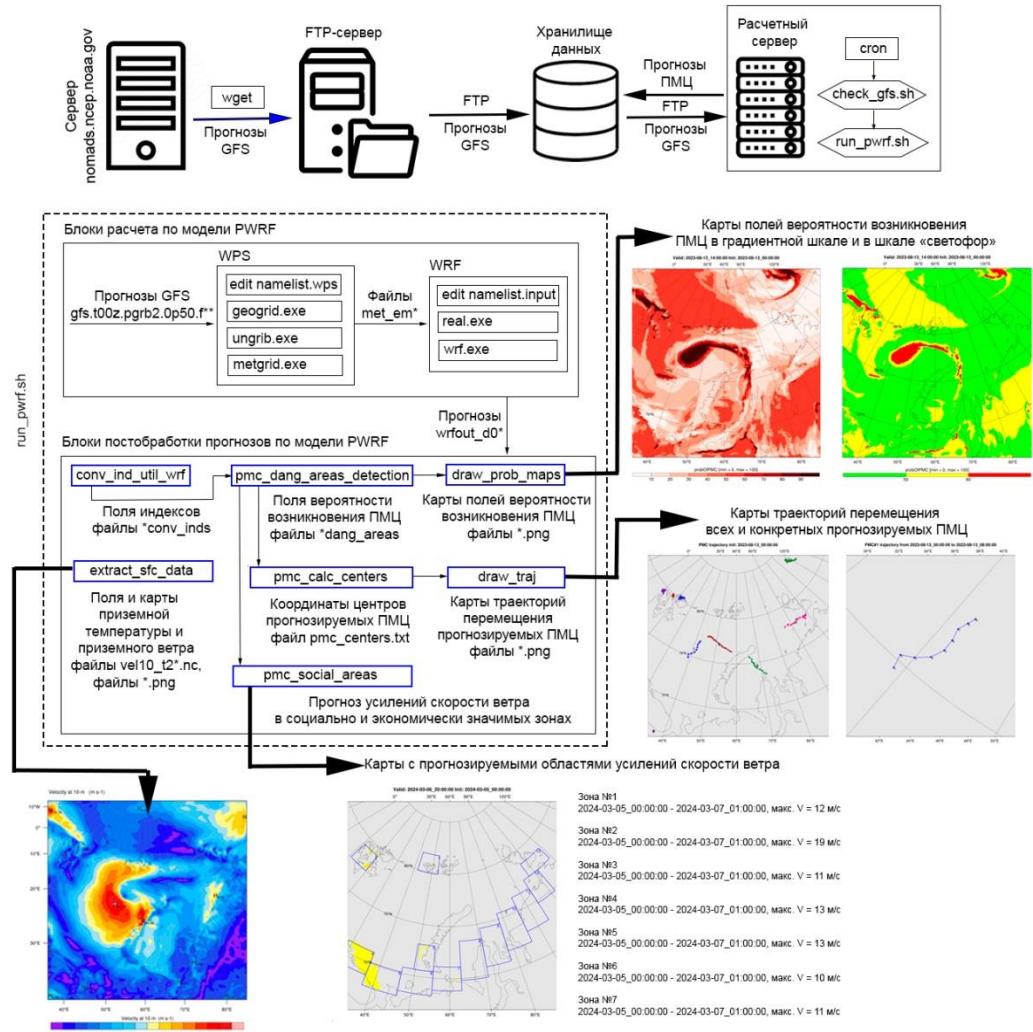


# Технология прогноза ПМЦ

## Расчетная область



Оперативно функционирует на базе НПО Тайфун с ноября 2021 г.



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

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 предупрежденности ПМЦ).



УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «ААНИИ»  
Макаров А.С.

26 ноября 2024 г.

## Акт

Проведения производственных испытаний автоматизированной технологии прогноза зарождения и перемещения полярных мезомасштабных циклонов для Арктического региона РФ в ФБГУ «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 ФБГУ «ААНИИ» до начала первого этапа испытаний. Производственные испытания проводились в ОЛРиП и ЦЛГМИ ФБГУ «ААНИИ».

### Описание и состав производственных испытаний

1. Производственные испытания технологии проводились в ФБГУ «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 усилений 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-Сибири (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 заносились в контрольные журналы. Результаты производственных испытаний и заключение

1. По итогам трех периодов производственных испытаний общая оправдываемость прогнозов ПМЦ составила 76%, прогнозов усилений 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.н.с. ОЛРиП Ильющенкова И.А.

Инженер ЦЛГМИ Саркисов Д.А.

Заведующий ОЛРиП Миронов 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 PWRF 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

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

**ASCAT** - Advanced Scatterometer

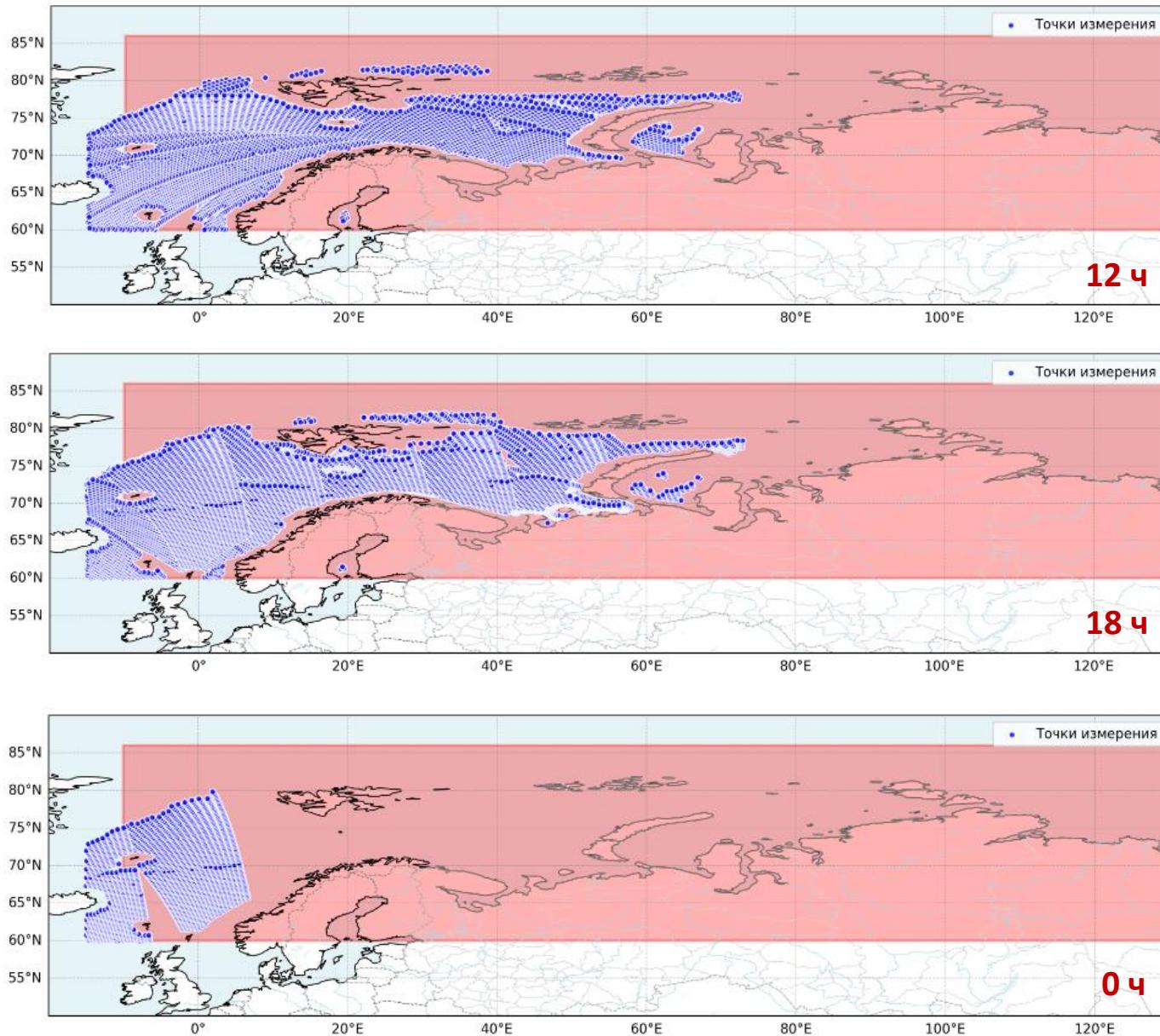
**AMSU-A** - Advanced Microwave Sounding Unit - A

**ATMS** - Advanced Technology Microwave Sounder

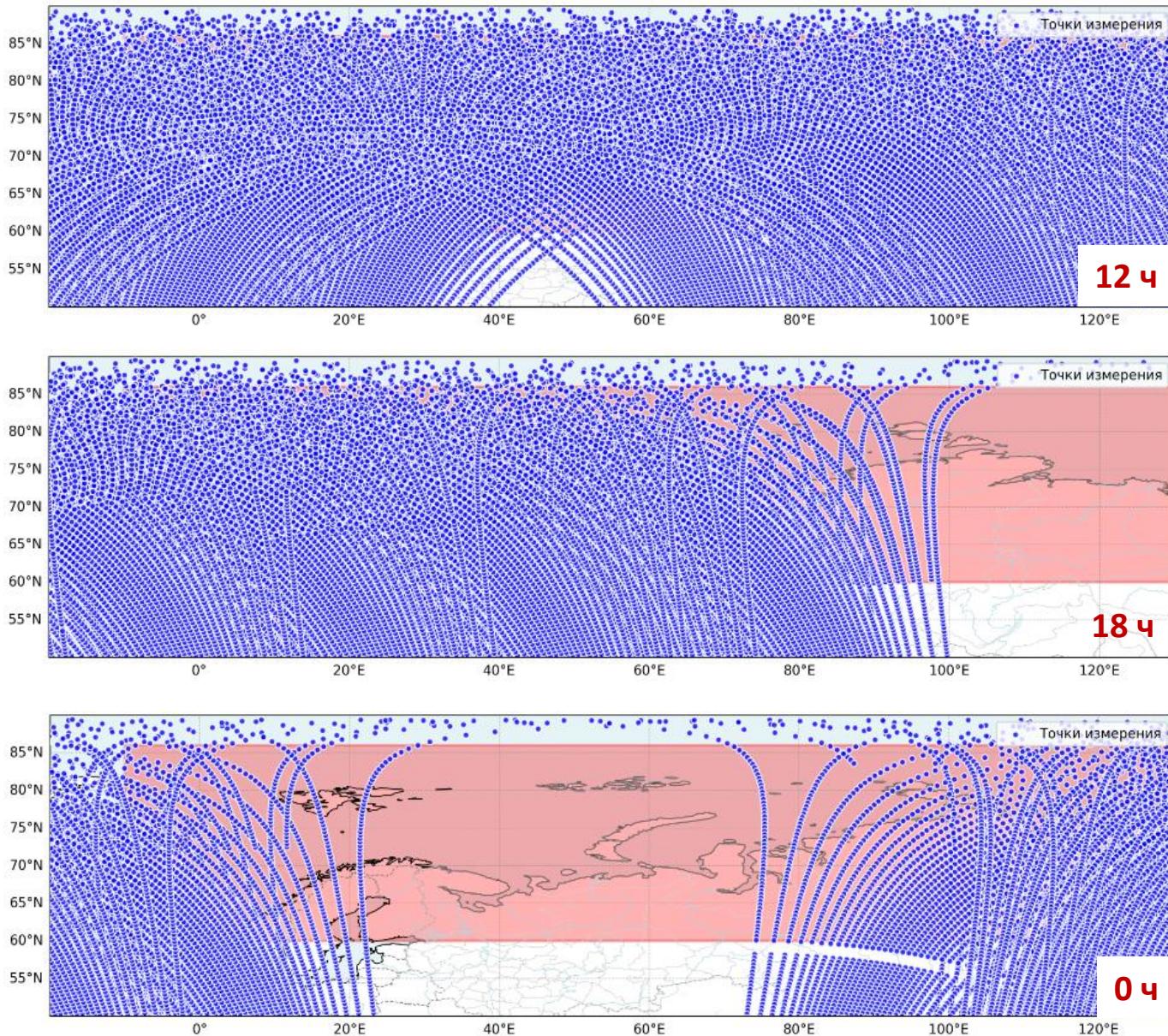
**MHS** - Microwave Humidity Sounder

**HIRS4** - High-Resolution Infrared Radiation Sounder, Model 4

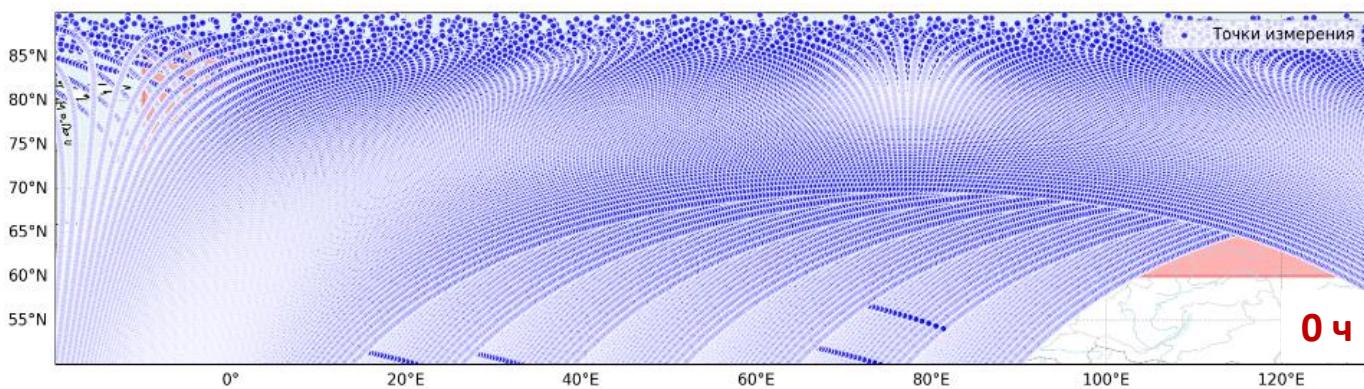
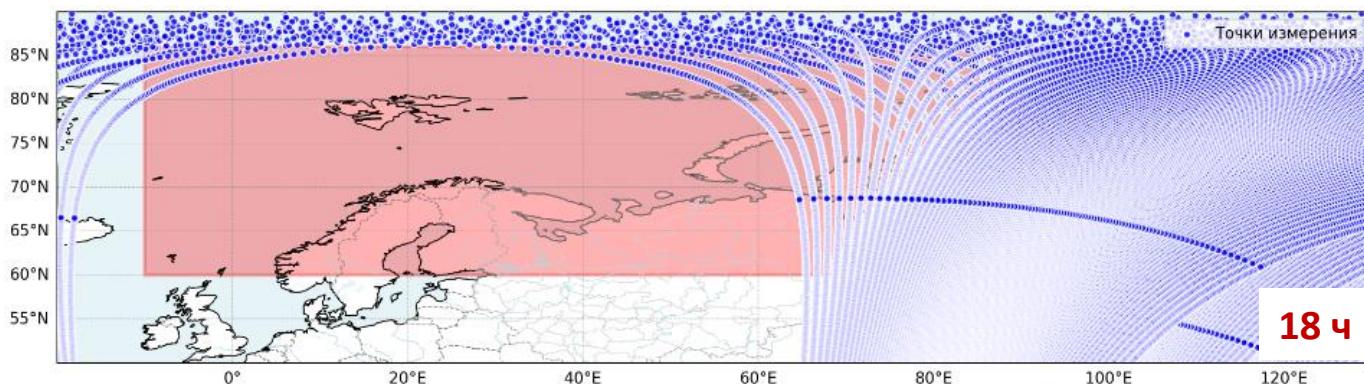
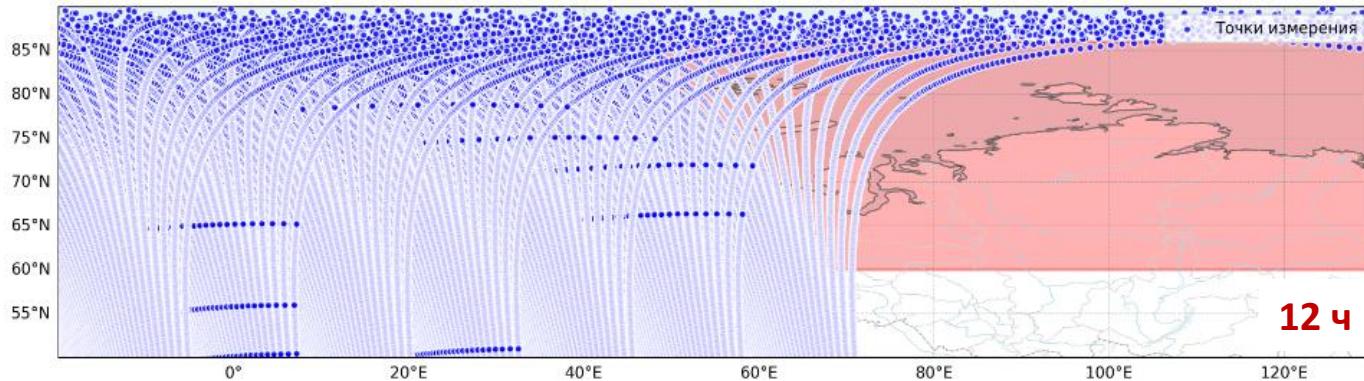
# Охват данными ASCAT



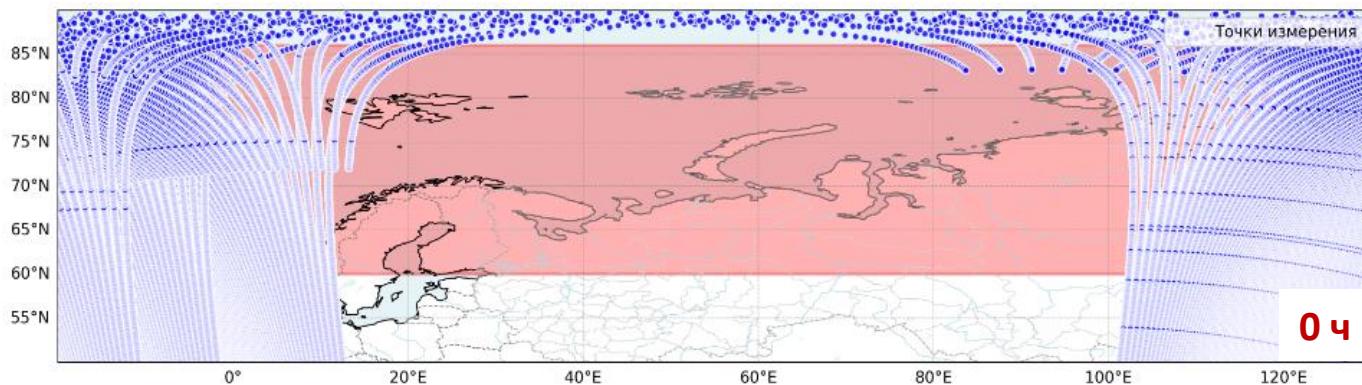
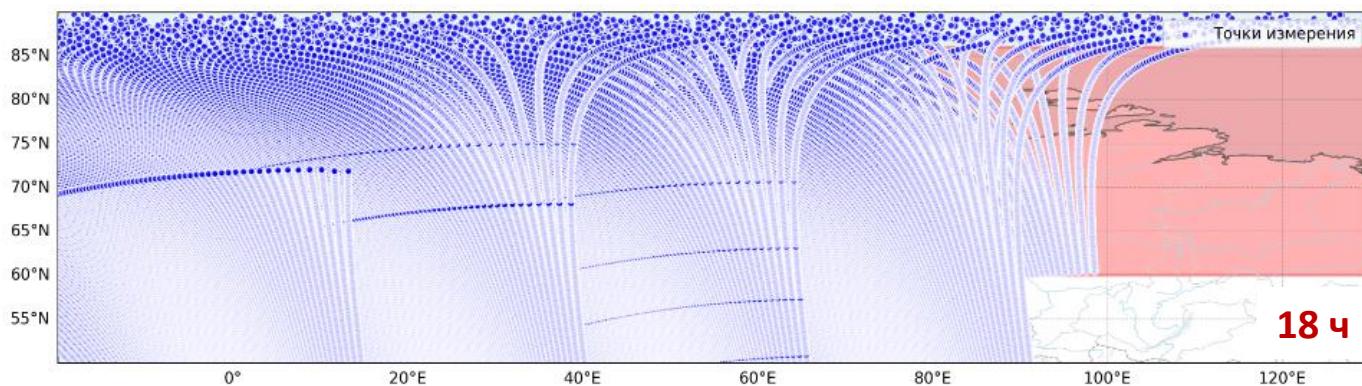
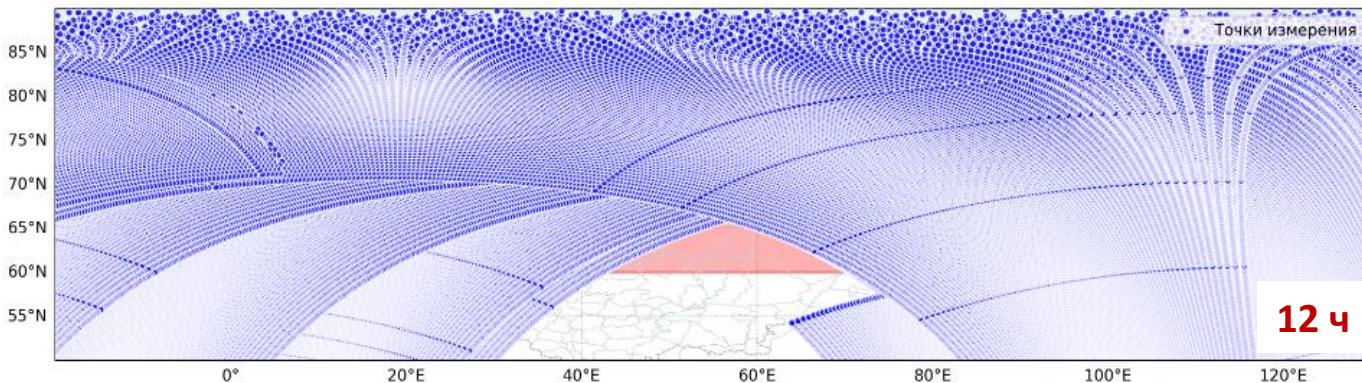
# Охват данными AMSU-A



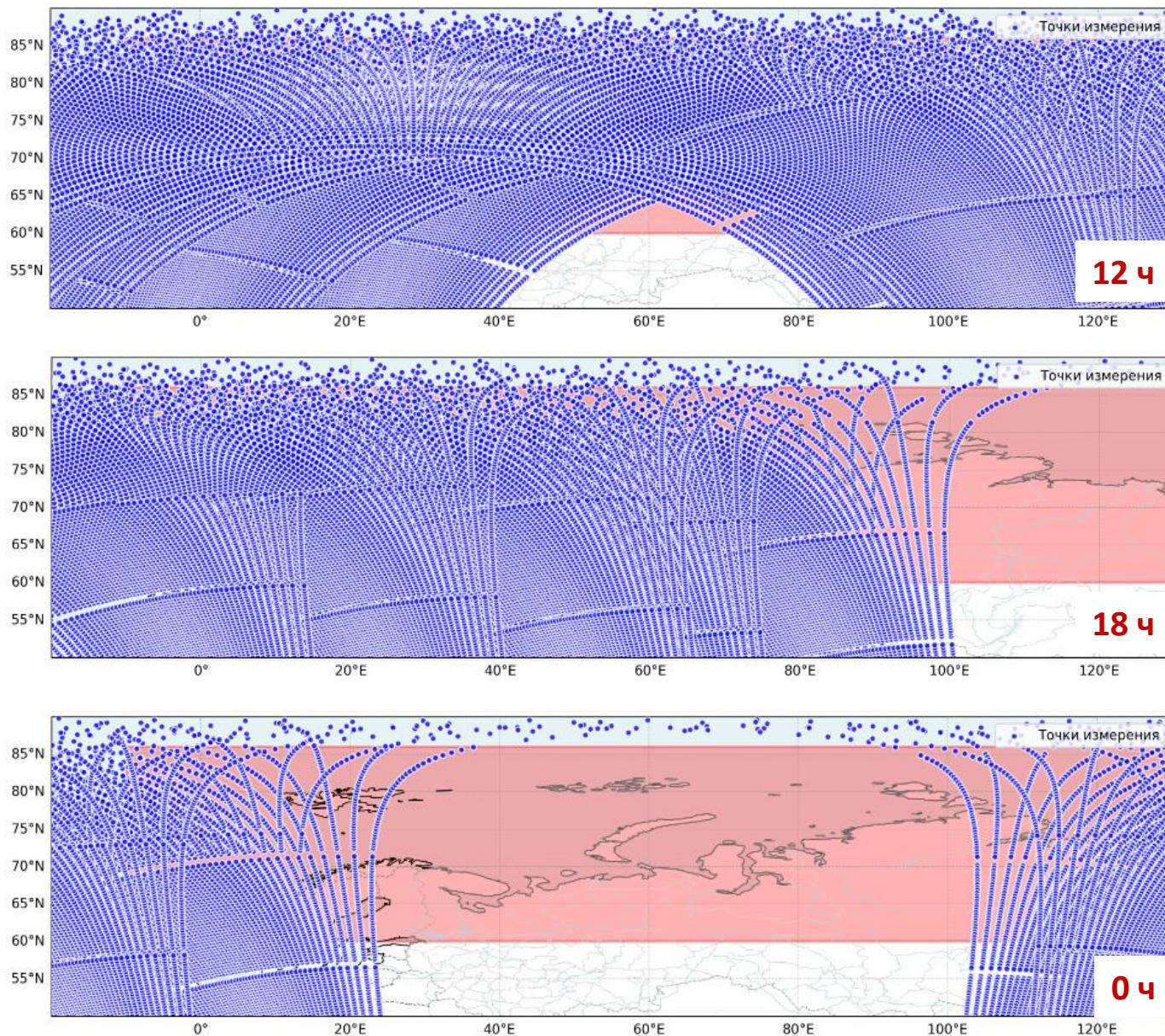
## Охват данными ATMS



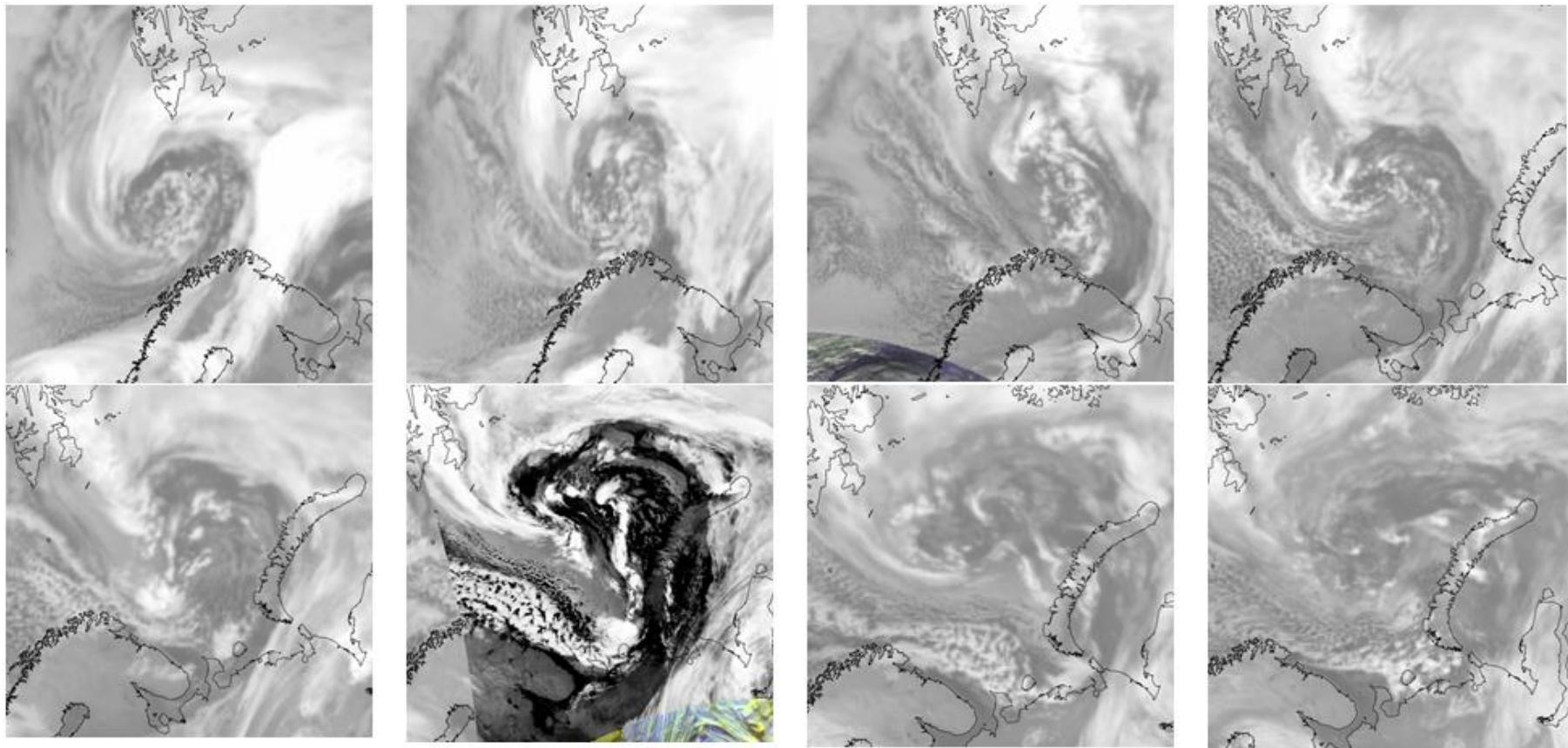
# Охват данными MHS



# Охват данными HIRS4



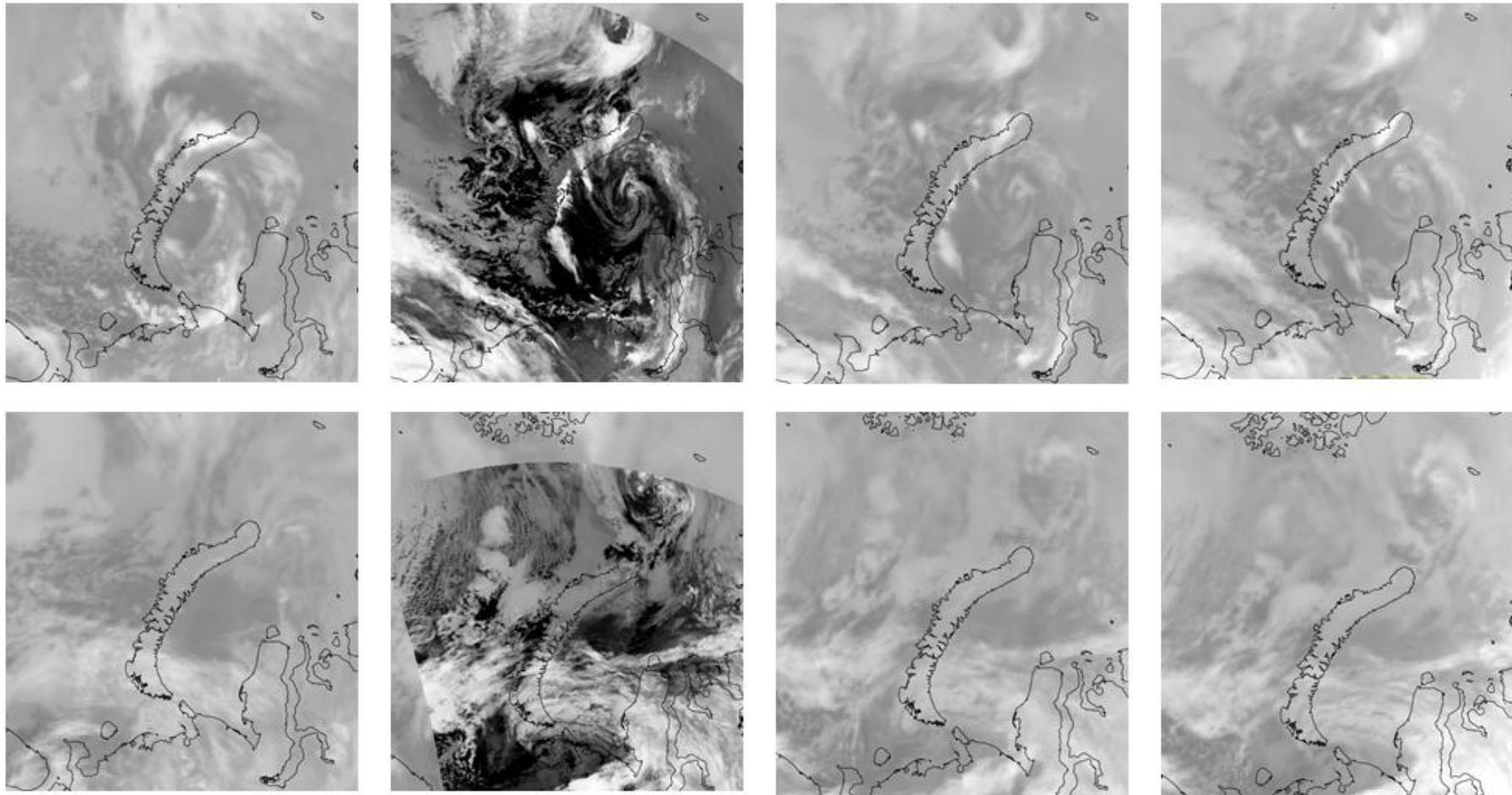
## Исследуемый объект



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

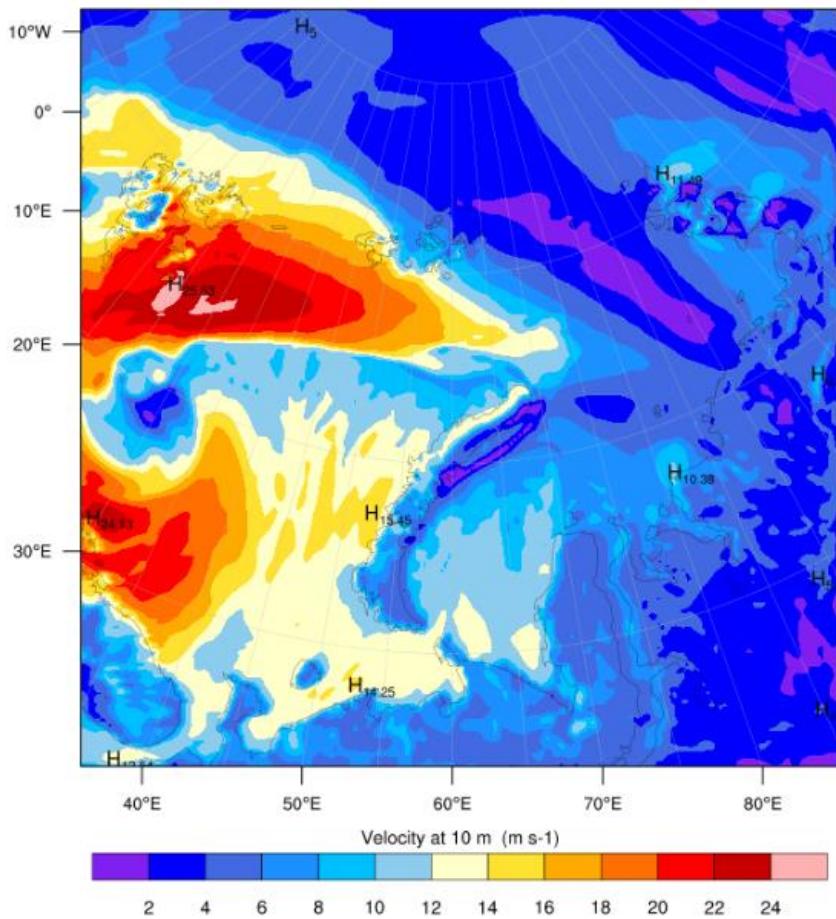


Спутниковые изображения с ПМЦ (Арктика-М №1 и №2, NOAA-18 и 19) за период с 18 ч ВСВ 01.12.2024 г. по 12 ч ВСВ 03.12.2024 г. с шагом 6 ч

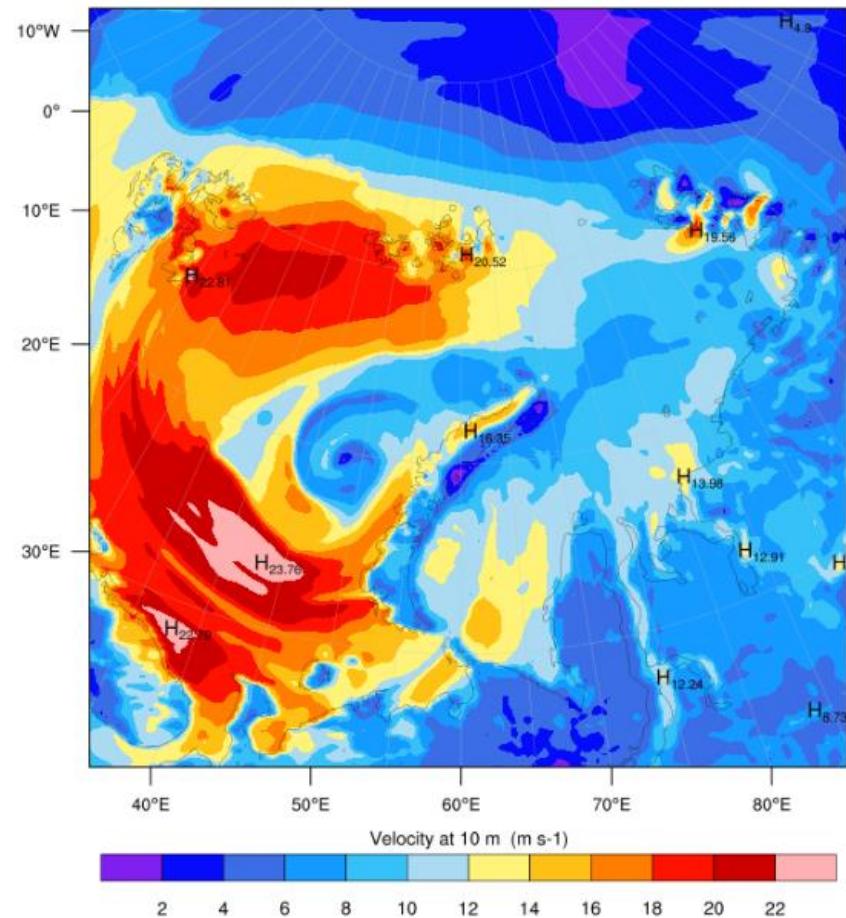
После того как циклон пересек Новую Землю (к середине дня 1 декабря) он стал ослабевать, немного уменьшился в размерах и дойдя до Обской губы продолжил движение уже на север.

# Исследуемый объект

Velocity at 10 m (m s-1)



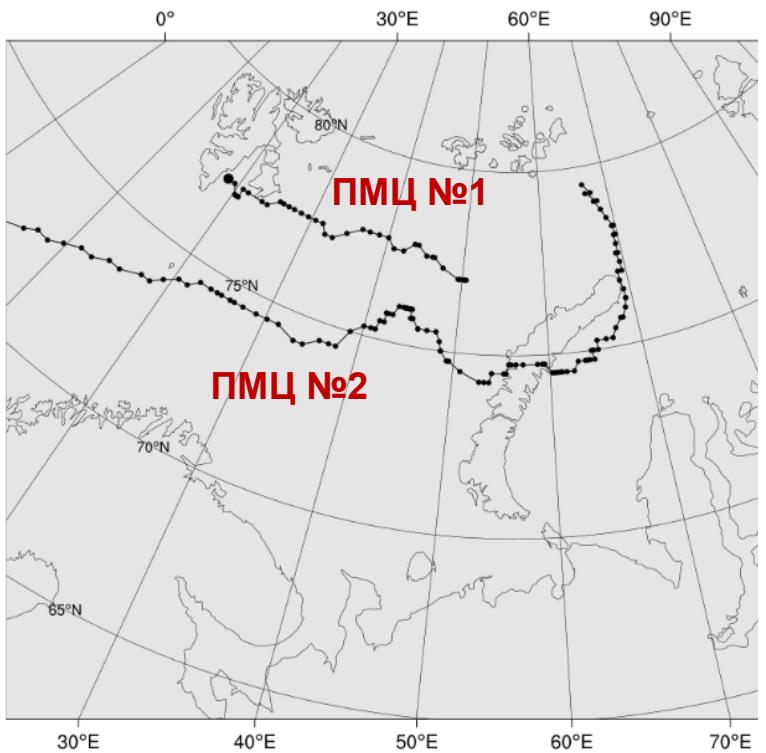
Velocity at 10 m (m s-1)



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

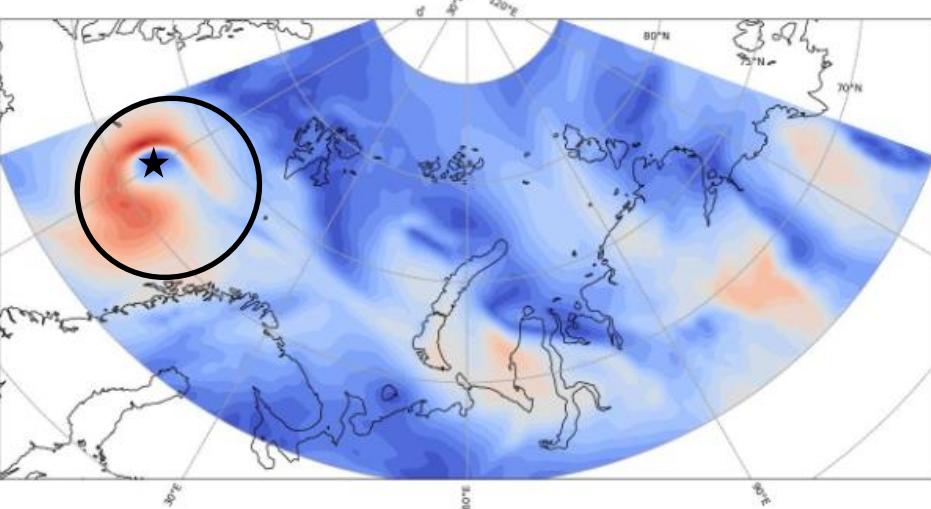
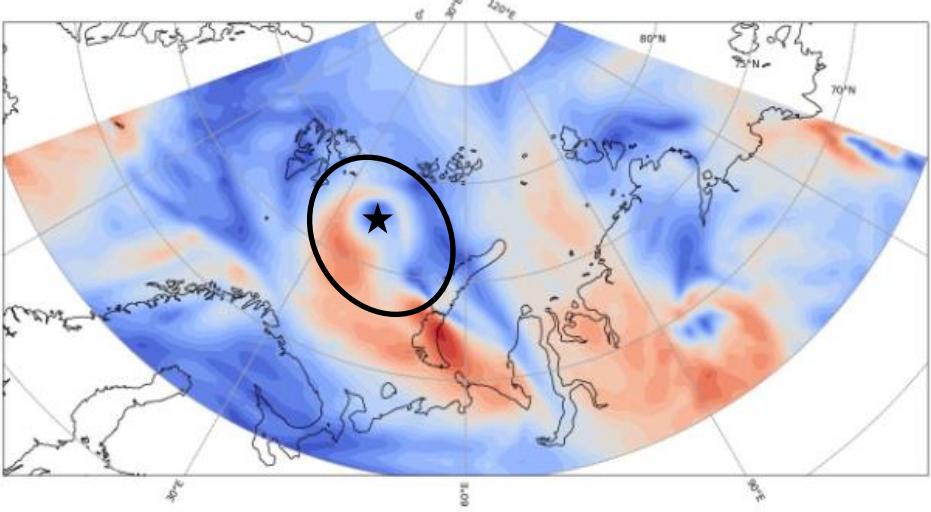
Карта приземного ветра на 12 ч ВСВ  
30.11.2024 г. (прогноз от 0 ч ВСВ  
29.11.2024 г.)

# Квазиреальные траектории ПМЦ по данным ERA5



**PMЦ №1**  
03 ч 27.11.2024 – 15 ч 28.11.2024

**PMЦ №2**  
06 ч 28.11.2024 – 12 ч 03.12.2024



Для оценки точности представления прогнозической 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.

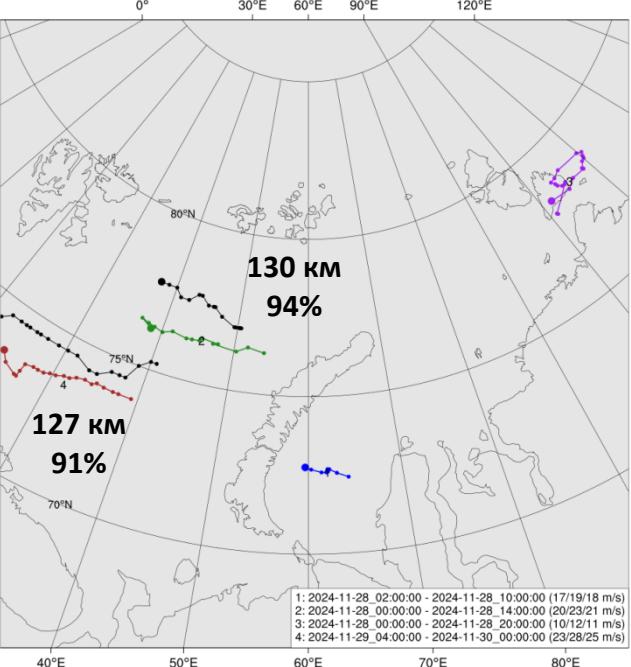
# Прогноз на сетке 12 км

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

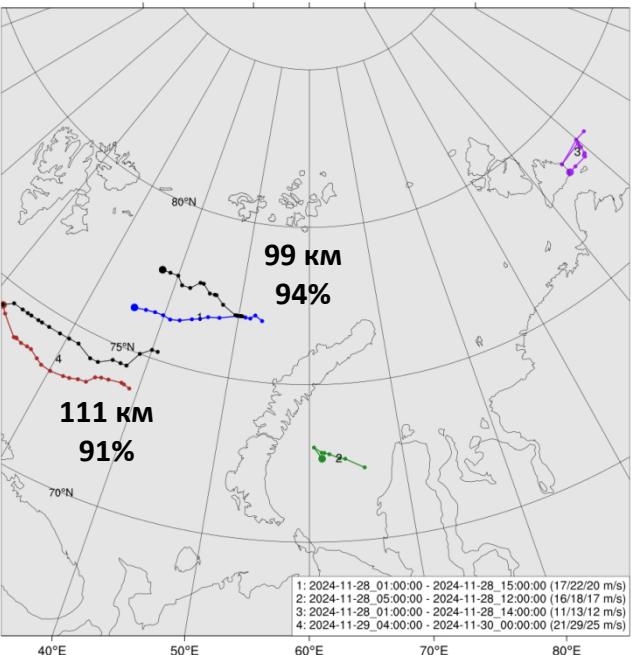
Сверху вниз:  
счет от 04 28.11.2024,  
счет от 04 29.11.2024

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

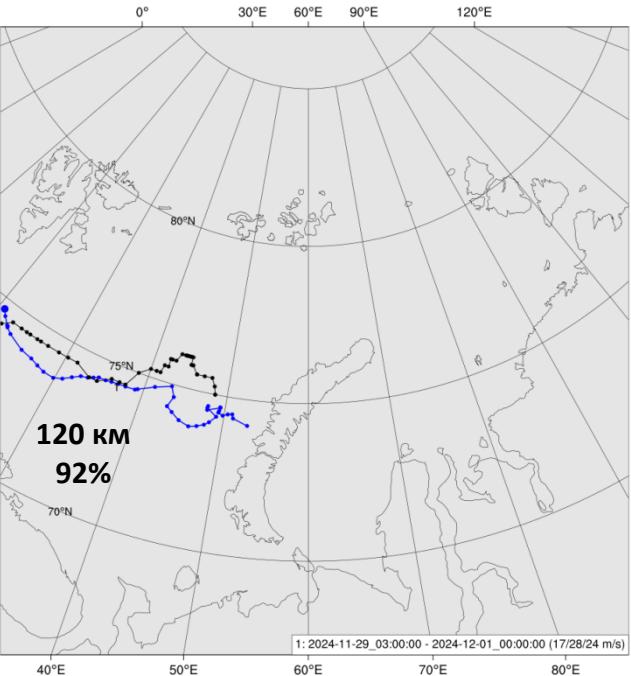
PMC trajectories wind3+wind3\_gravity\_compare init: 2024-11-28\_00:00:00



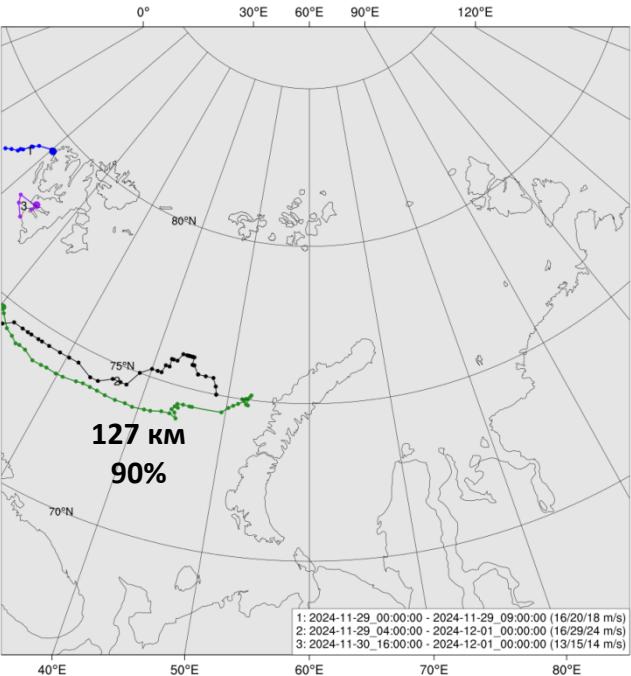
PMC trajectories wind3+wind3\_gravity\_compare init: 2024-11-28\_00:00:00



PMC trajectories wind3+wind3\_gravity\_compare init: 2024-11-29\_00:00:00



PMC trajectories wind3+wind3\_gravity\_compare init: 2024-11-29\_00:00:00

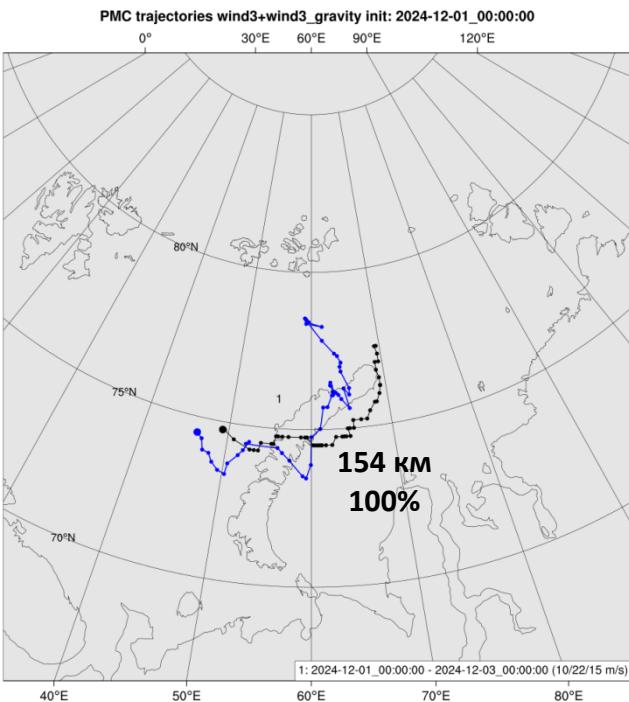
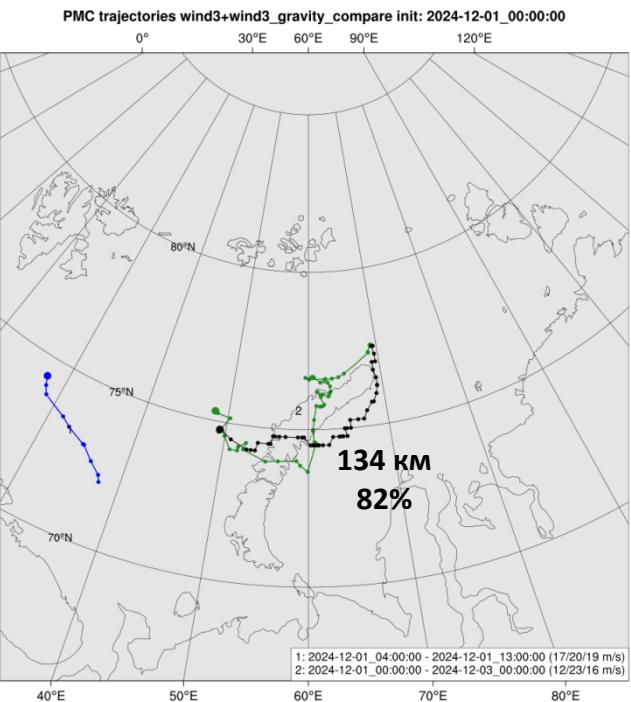
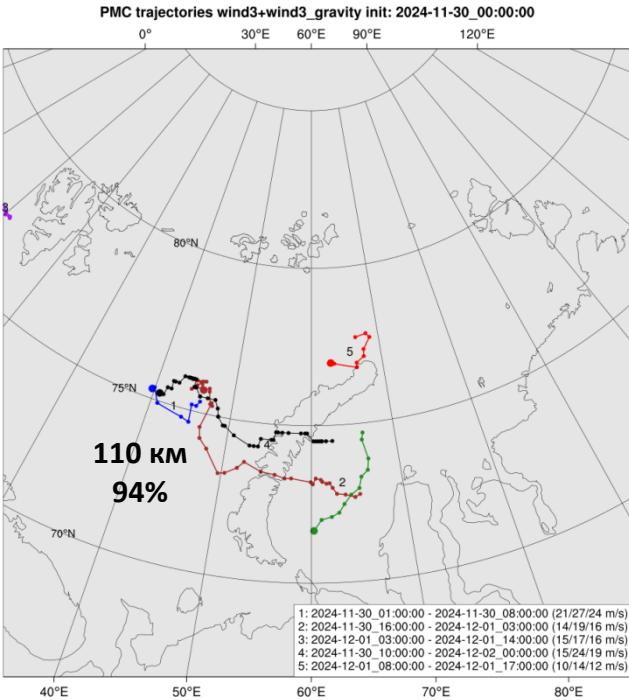
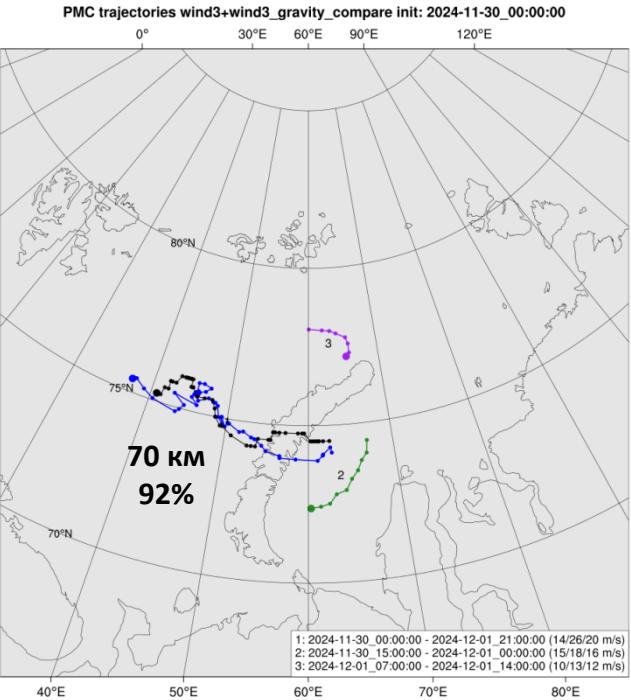


# Прогноз на сетке 12 км

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

Сверху вниз:  
счет от 04 30.11.2024,  
счет от 04 01.12.2024

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

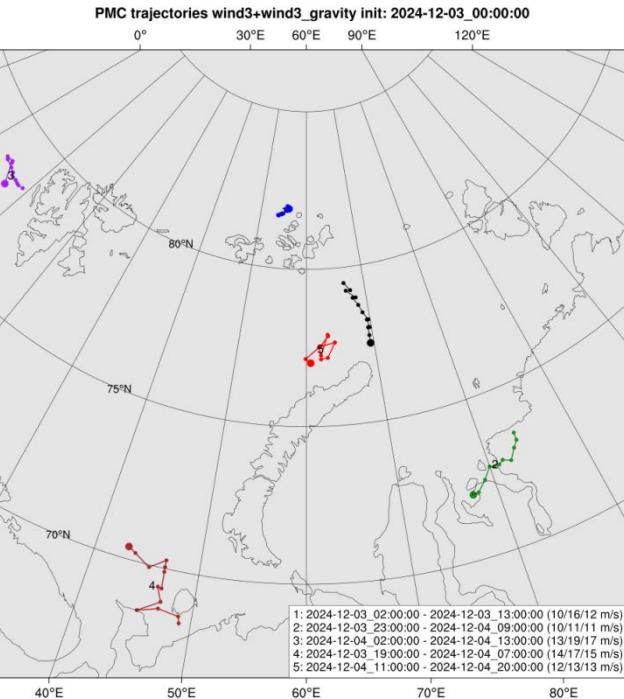
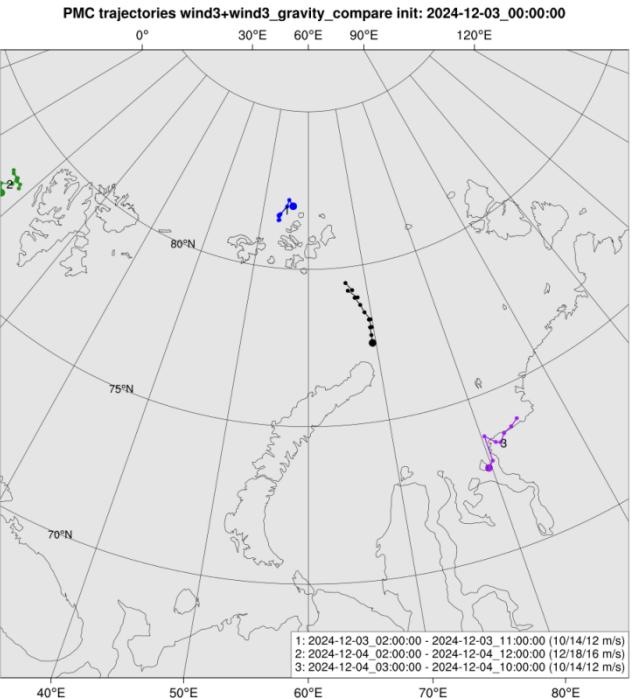
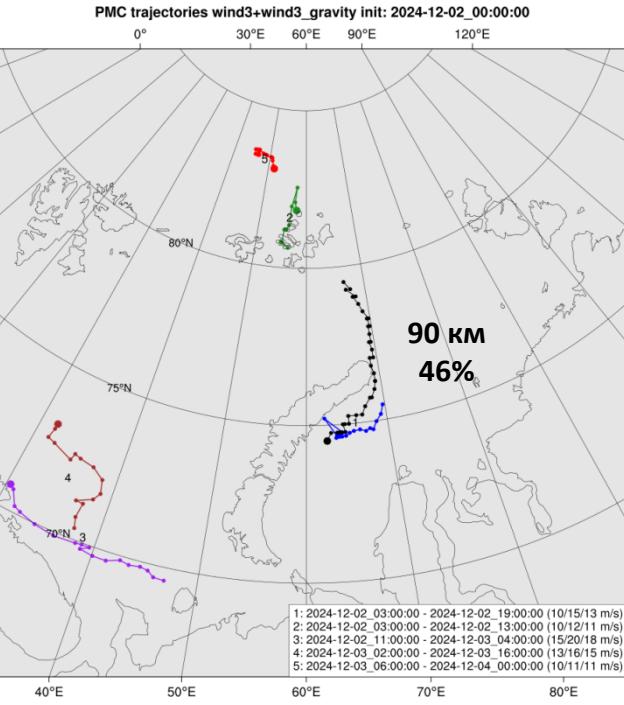
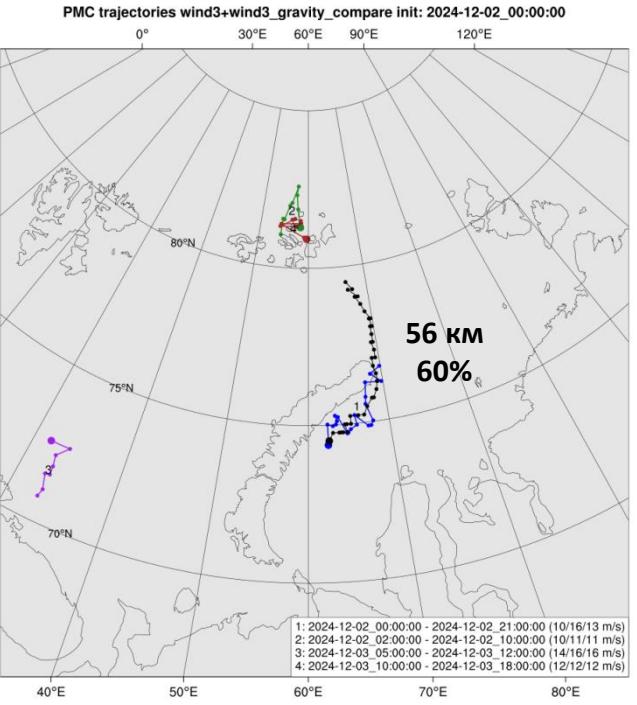


# Прогноз на сетке 12 км

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

Сверху вниз:  
счет от 04.12.2024,  
счет от 04.03.2024

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

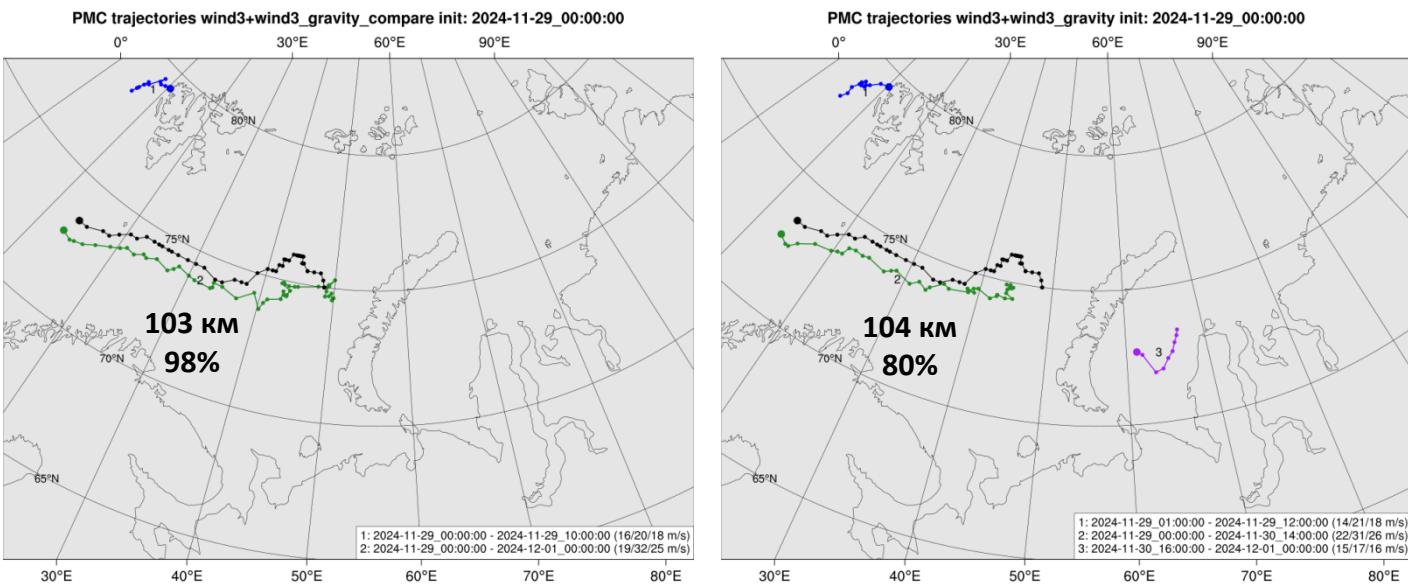
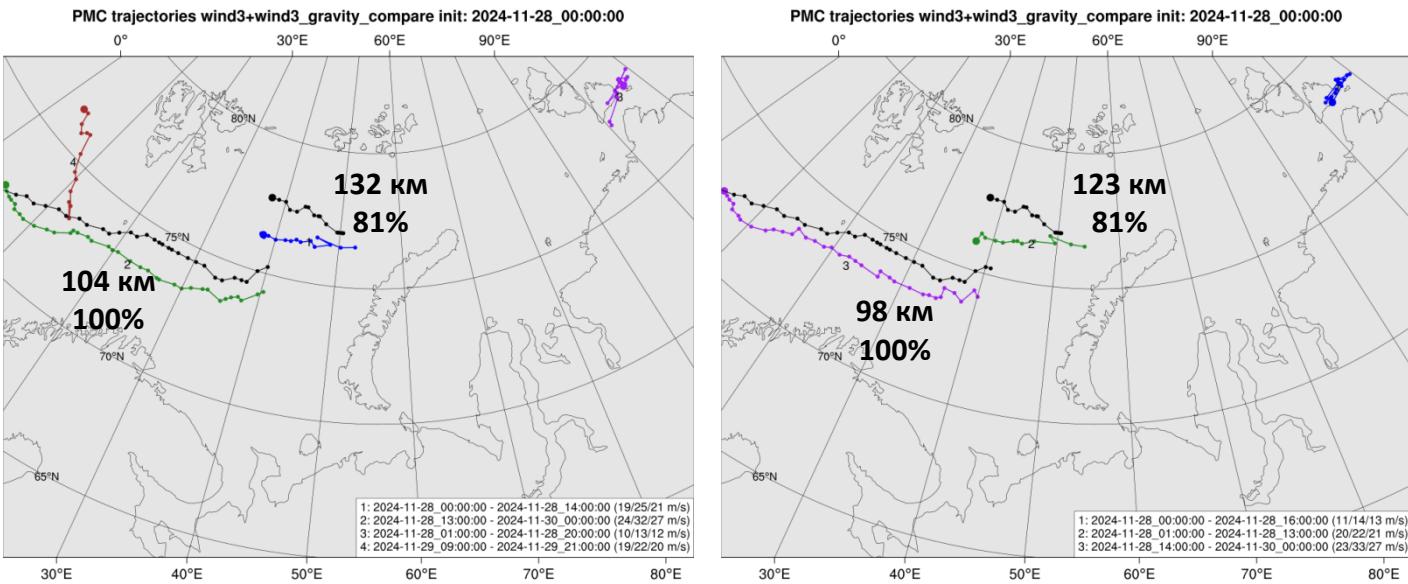


# Прогноз на сетке 8 км

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

Сверху вниз:  
счет от 04 28.11.2024,  
счет от 04 29.11.2024

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

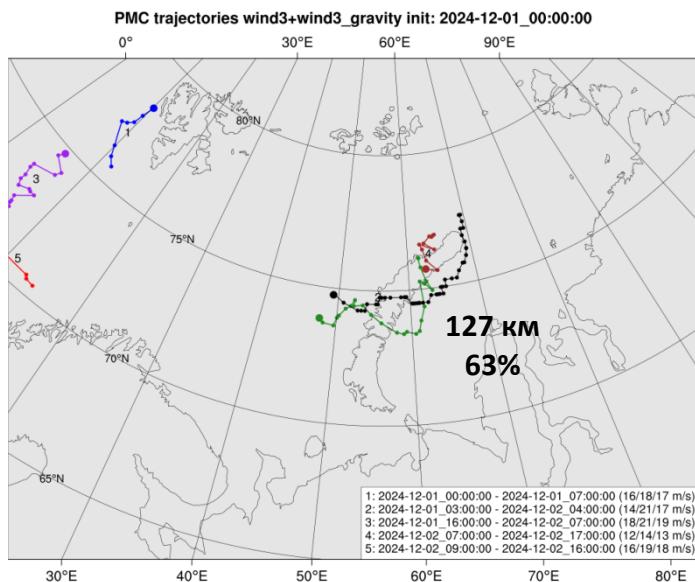
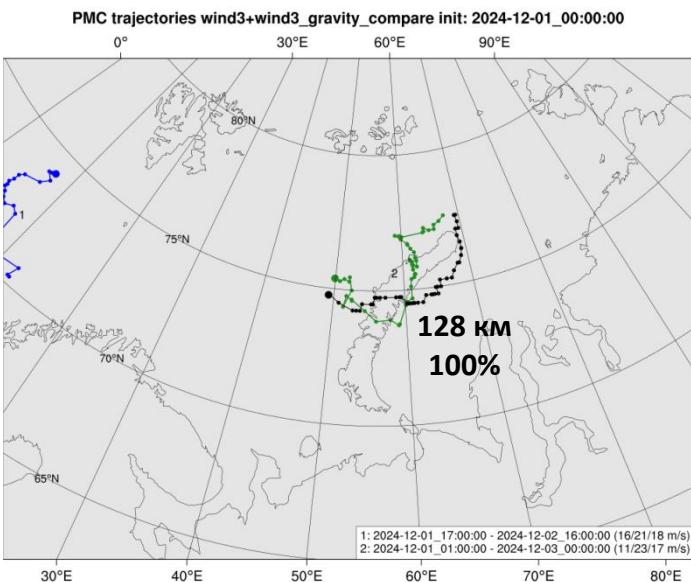
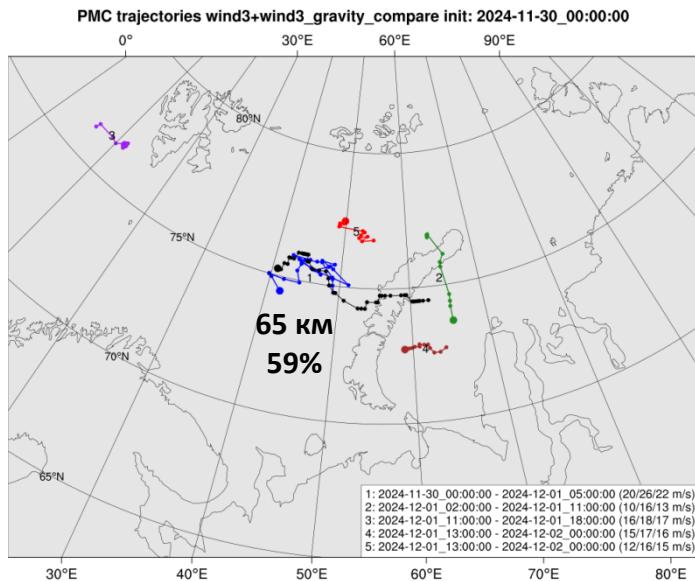
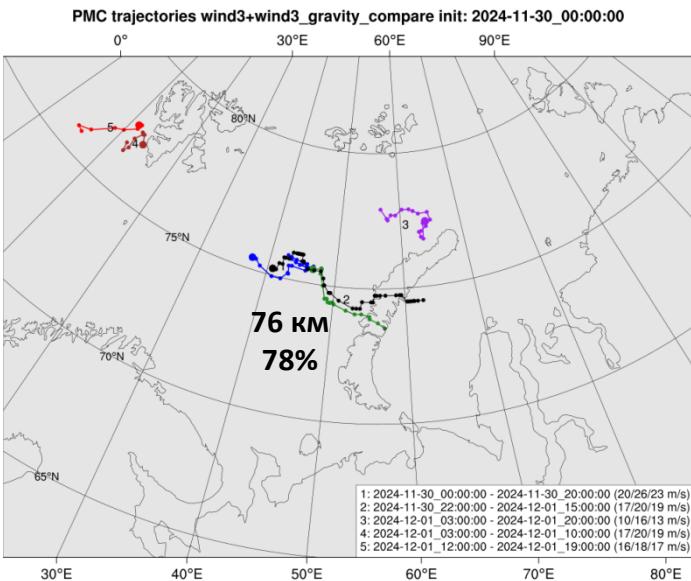


# Прогноз на сетке 8 км

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

Сверху вниз:  
счет от 04 30.11.2024,  
счет от 04 01.12.2024

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

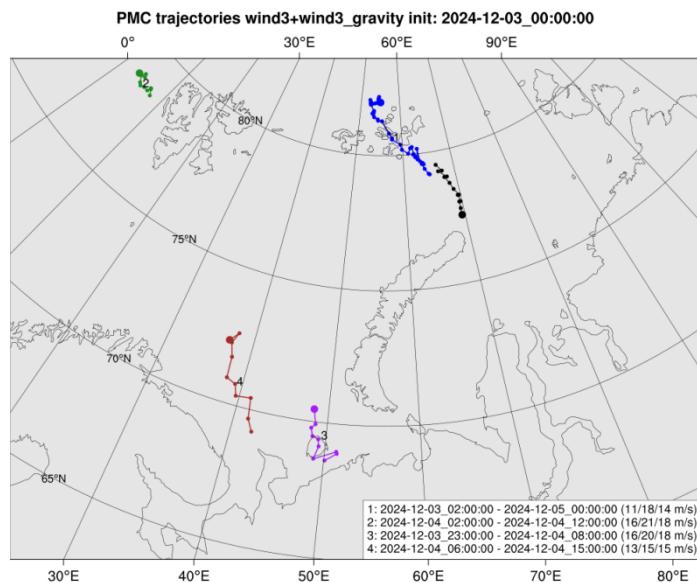
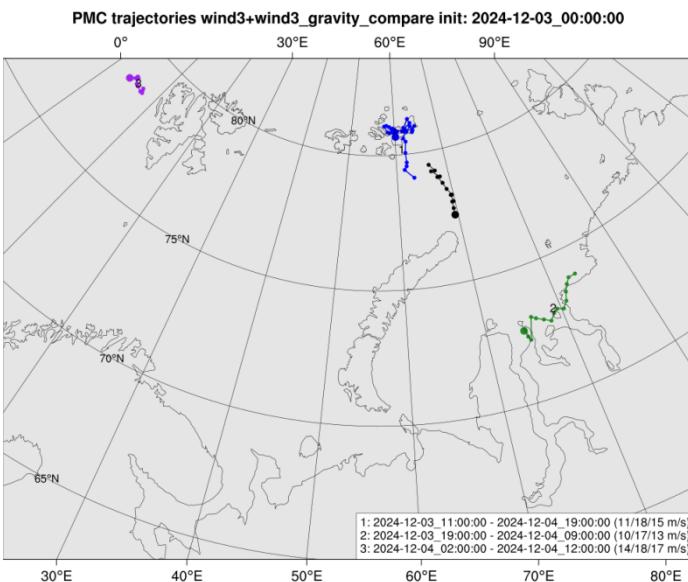
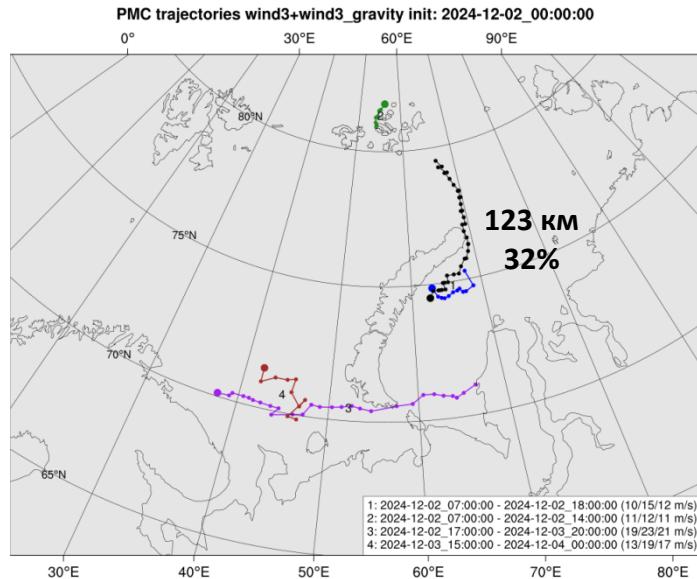
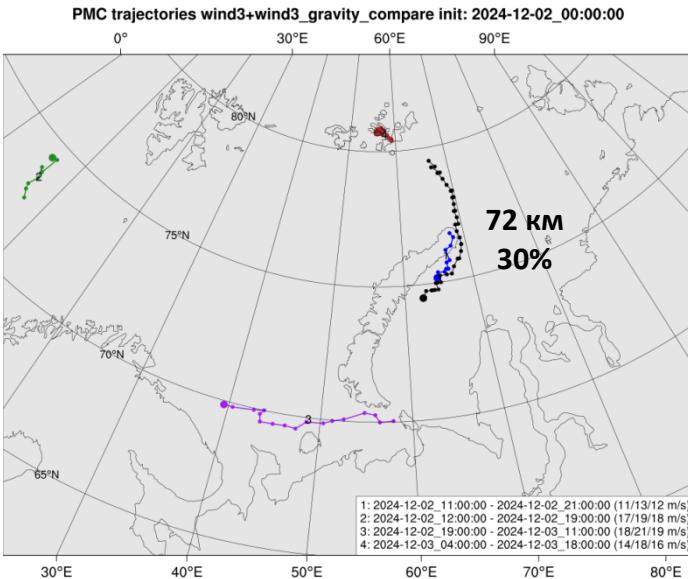


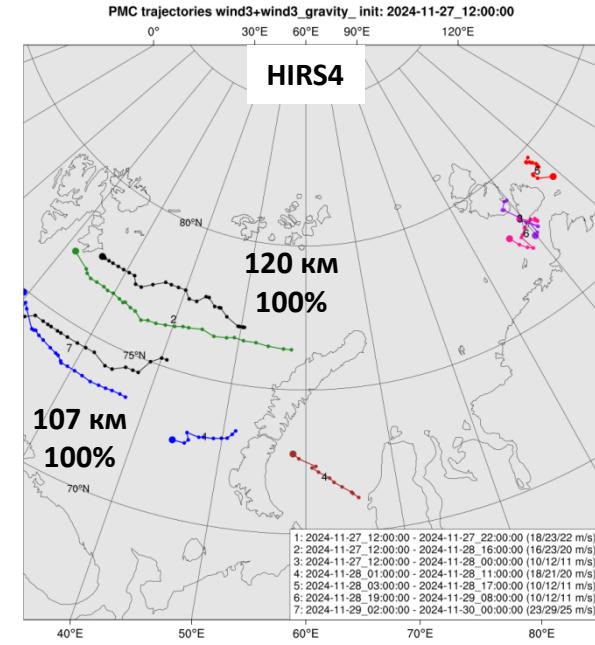
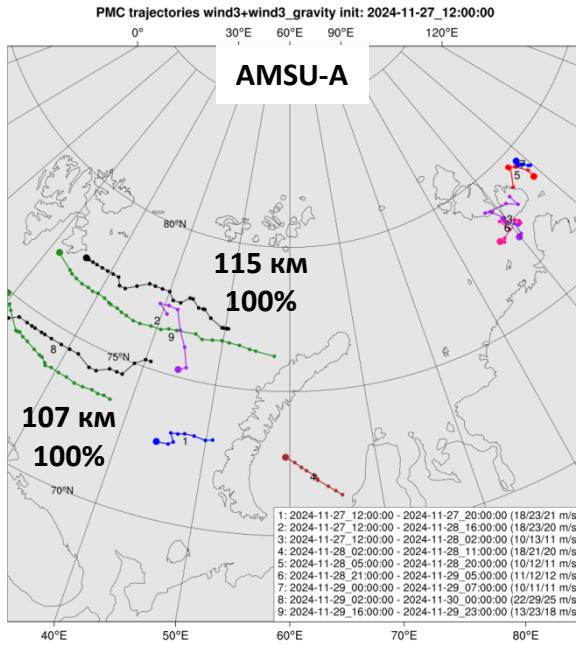
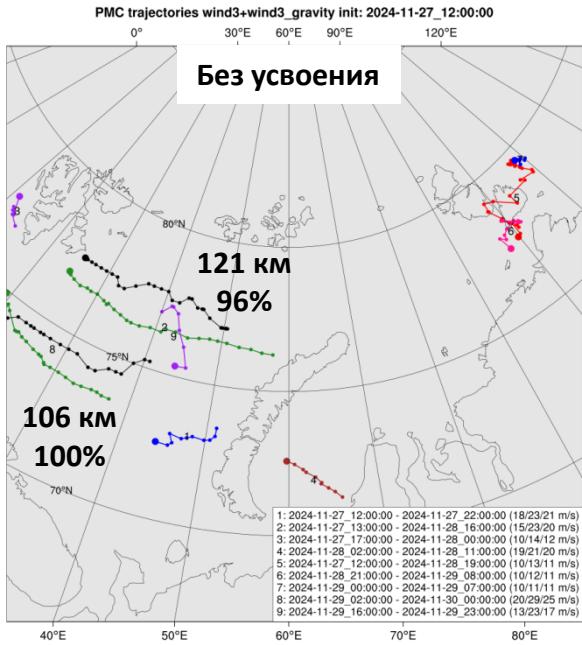
# Прогноз на сетке 8 км

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

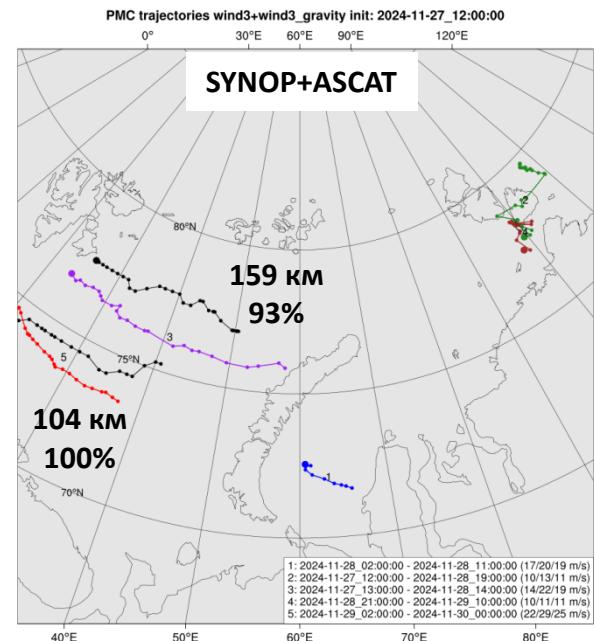
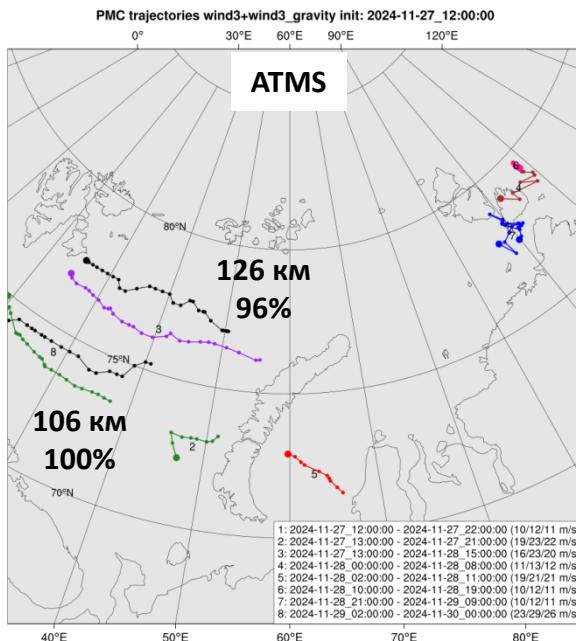
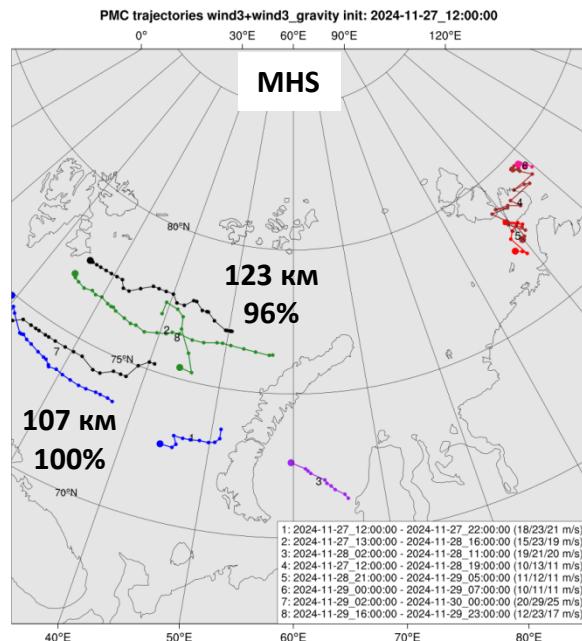
Сверху вниз:  
счет от 04.12.2024,  
счет от 04.12.2024

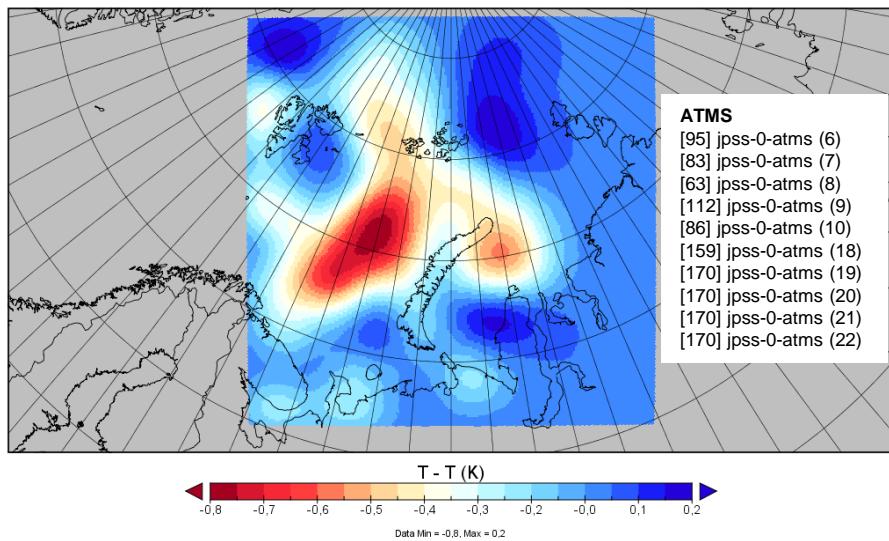
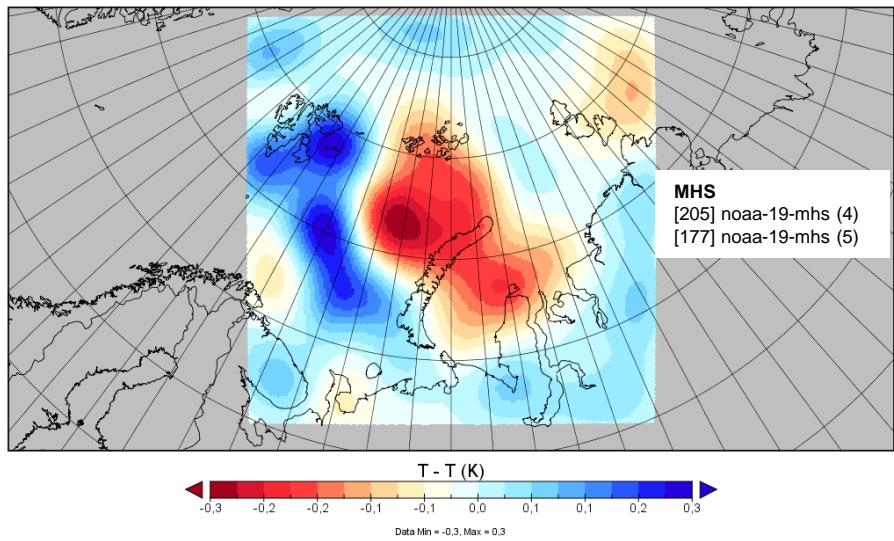
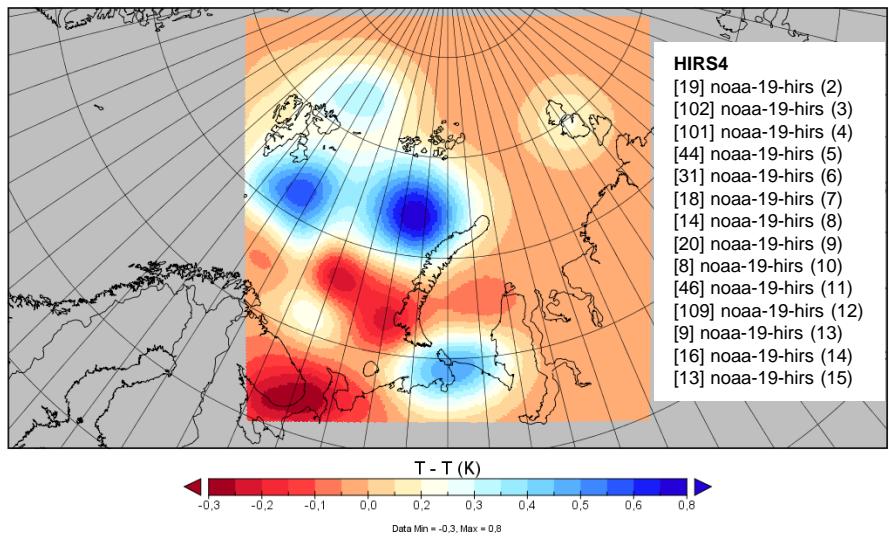
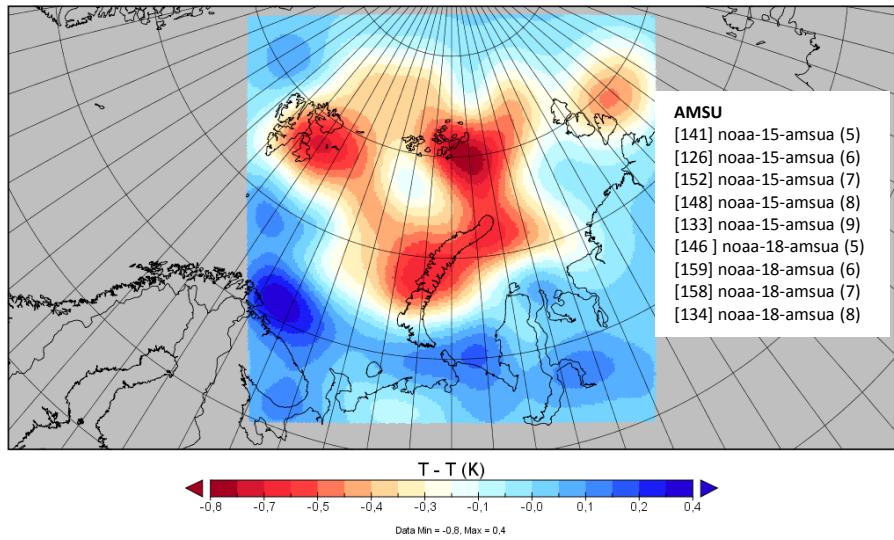
В км указана средняя  
ошибка воспроизведения  
траектории,  
в % – полнота ее  
воспроизведения.



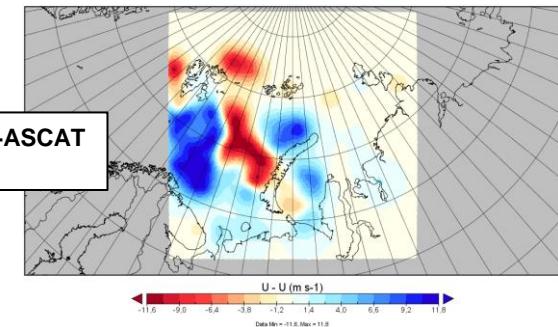
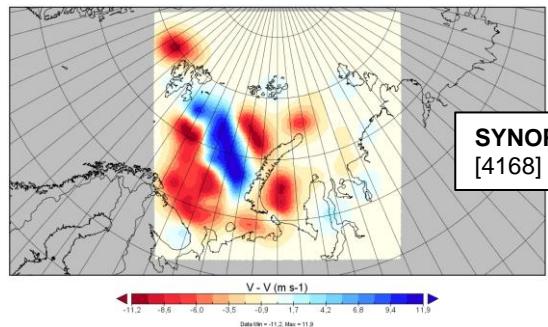


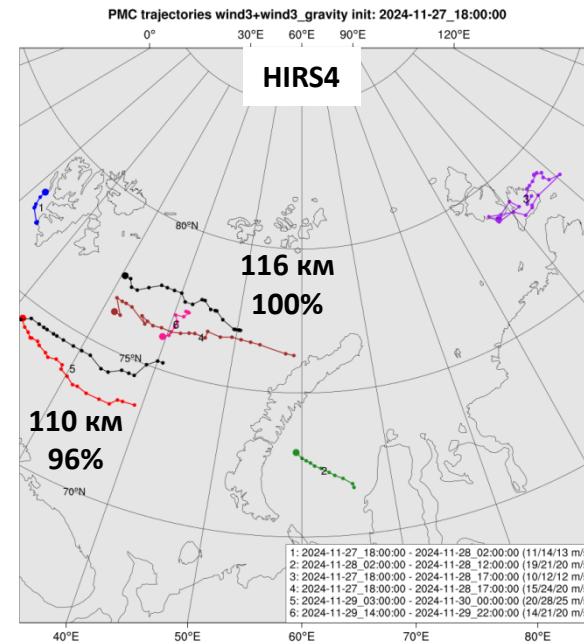
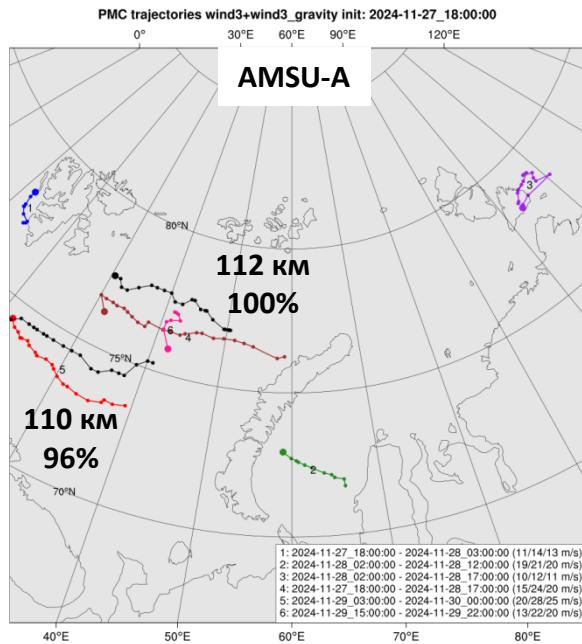
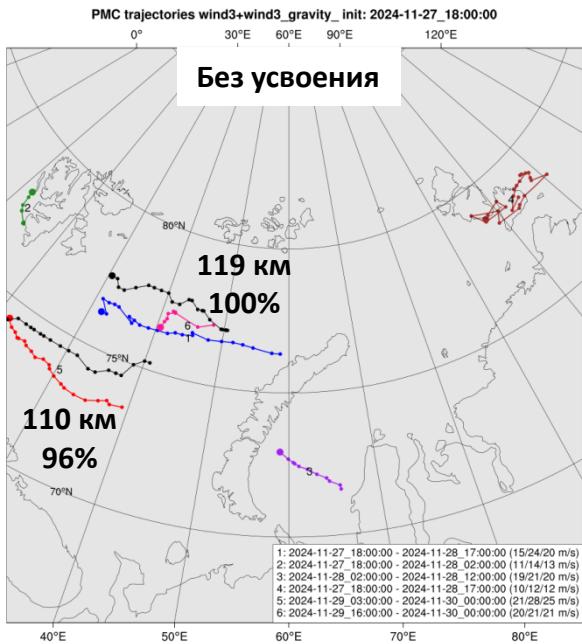
## Прогноз на сетке 12 км, счет от 12 ч 27.11.2024



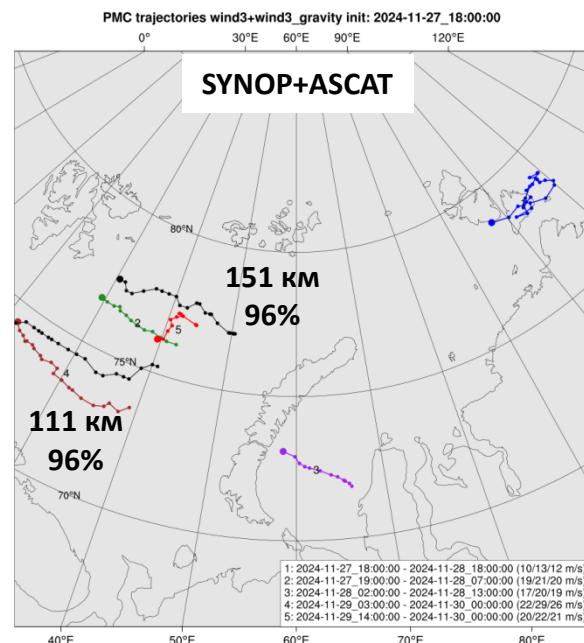
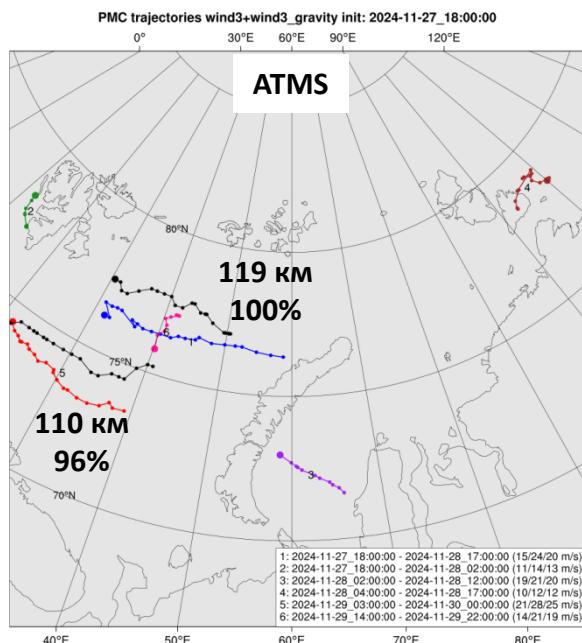
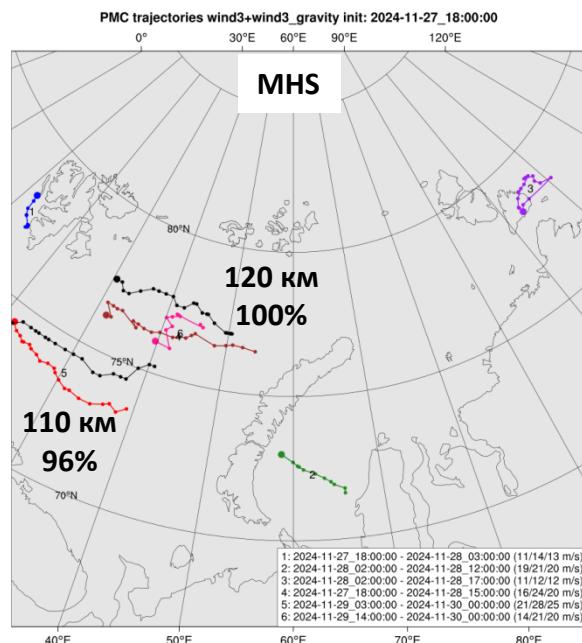


Статистика по количеству усвоенных данных (в []) в различных каналах (в ()) от различных приборов на 12ч на фоне разности полей Т нижнего расчетного уровня до и после усвоения, для SYNOP+ASCAT на фоне разности полей V, U





## 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 ( $Ed$ ) и полнота их воспроизведения ( $Er$ ). Установлено, что на сетке 12 км без усвоения данных средняя ошибка  $Ed$  составила 126 км,  $Er$  – 92%, с усвоением:  $Ed$  – 112 км,  $Er$  – 92%. На сетке 8 км без усвоения:  $Ed$  – 113 км,  $Er$  – 93%, с усвоением:  $Ed$  – 108 км,  $Er$  – 87%. Кроме того установлено, что при старте счета в 12 ч или в 18 ч наилучшие результаты показывает **схема одиночного усвоения данных AMSU-A** ( $Ed$  – 111 км,  $Er$  – 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 ( $\Delta Ed$  не более 10 км,  $\Delta Er$  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 суши 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. – 612р.
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