Двадцать четвертая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"
г. Москва, 9-13 ноября 2026 г.



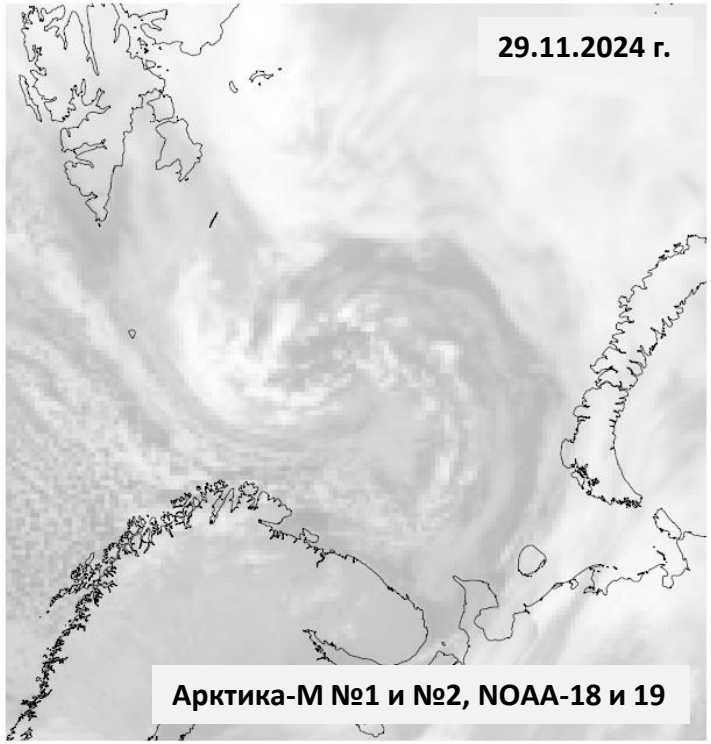
Разработка новой расчетной схемы для выявления зон высокой вероятности обнаружения полярных мезоциклонов в Российской Арктике

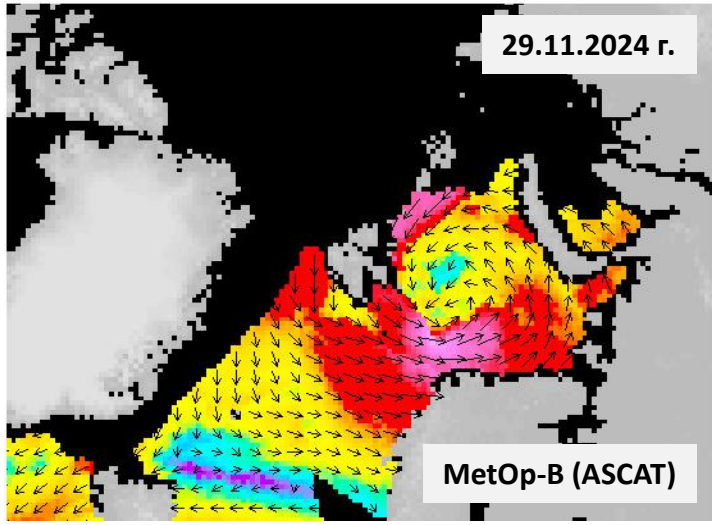
Калмыкова О.В.[1], Петриченко С.А.[1], Дмитриев М.С.[2], Козлов С.В.[1]

[1]Научно-производственное объединение "Тайфун"
[2] НИЯУ «МИФИ» Обнинский институт атомной энергетики

Полярные мезомасштабные циклоны

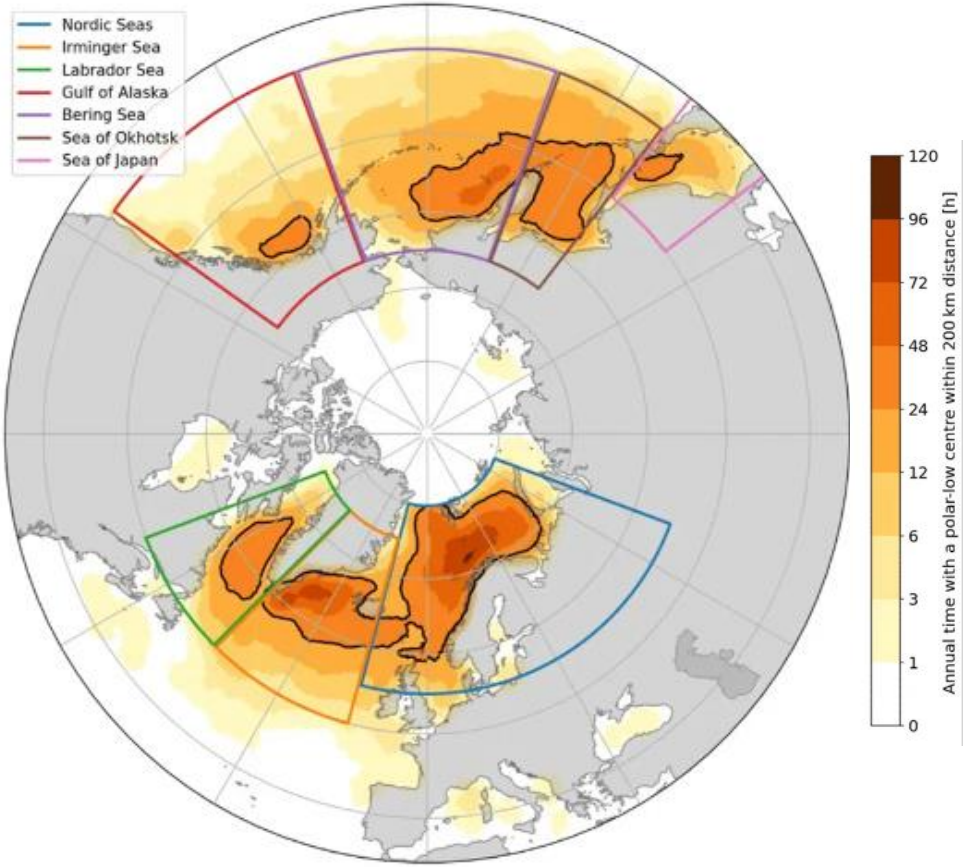
- **Polar Mesocyclones (PMC)** — сравнительно небольшие атмосферные вихри, возникающие над морями высоких широт. Они играют существенную роль в формировании экстремальных погодных условий, теплообмене между океаном и атмосферой и региональной атмосферной циркуляции. Широкий термин для всех мезомасштабных вихрей в полярных регионах.
- Особый интерес представляют полярные мезоциклоны типа **Polar Low** (полярные мезомасштабные циклоны (ПМЦ), или полярные депрессии) — интенсивные морские вихри, способные вызывать штормовой ветер, сильные снегопады, резкое ухудшение видимости и высокое волнение.
- Для ПМЦ характерны:
  - ✓ горизонтальный масштаб приблизительно 200–1000 км, часто 200–500 км;
  - ✓ скорость приземного ветра около 15 м/с или выше;
  - ✓ формирование в холодных морских воздушных массах за пределами основной бароклинной зоны;
  - ✓ быстрое развитие и относительно короткий жизненный цикл — часто от нескольких часов до 1–2 суток
- Выявляют ПМЦ в основном по спутниковым данным, иногда и по результатам численного моделирования или реанализа.
- Известно, что ПМЦ могут иметь различные механизмы образования: основные по современной классификации - бароклинные и конвективные.





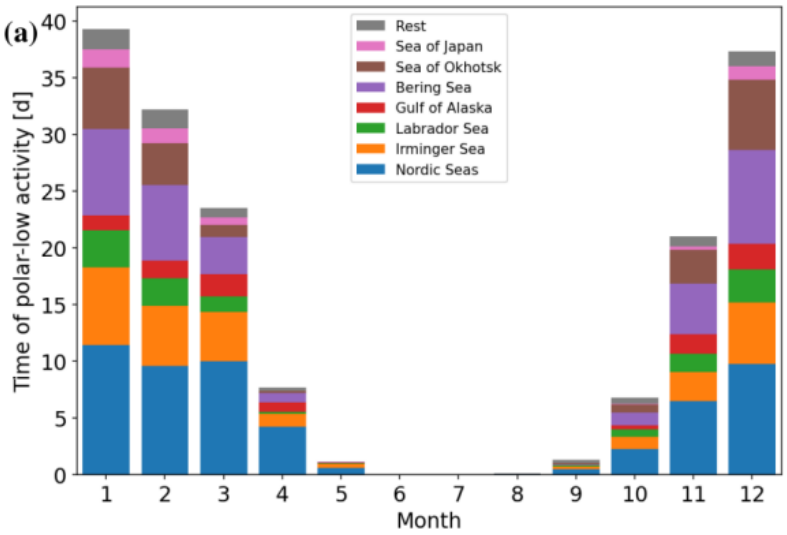
Климатология ПМЦ в Северном полушарии

Районы наиболее частого формирования



Норвежское и Баренцево моря - один из самых активных регионов. Здесь теплые воды Норвежского течения создают идеальные условия для развития ПМЦ, особенно в районе Шпицбергена и Лофотенских островов.

Годовой ход



Основная масса ПМЦ формируется в период **с октября по апрель**, когда вторжения холодного арктического воздуха на еще достаточно теплую акваторию морей максимально интенсивны.

Над акваториями морей западнее Новой Земли – **зимний максимум**.

Над северными морями России к востоку от Новой Земли – **летний максимум**.

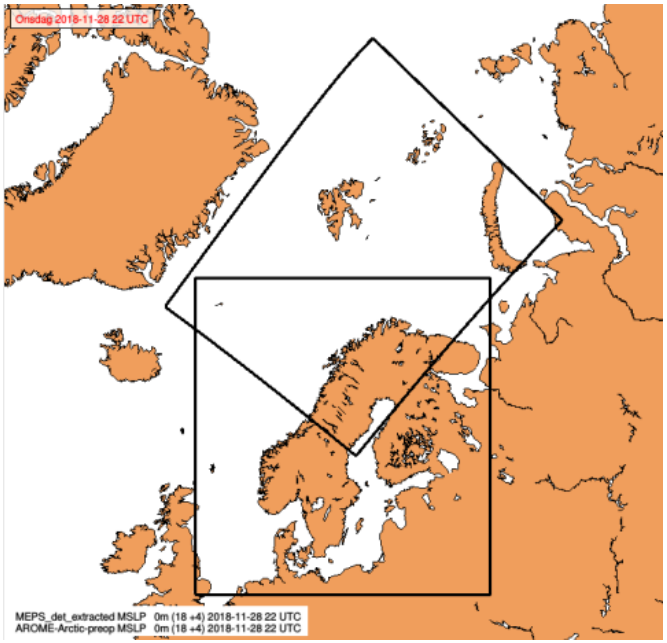
StollP. J. (2022). A global climatology of polar lows investigated for local differences and wind-shear environments. *Weather Clim. Dyn.* 3 (2), 483–504. 10.5194/wcd-3-483-2022

Подходы к изучению ПМЦ

- Изучение ПМЦ затруднено из-за их небольших размеров, быстрого развития и формирования в районах, где крайне мало стандартных метеонаблюдений.
- В литературе рассматриваются четыре взаимосвязанные, но разные задачи:
  - **Обнаружение**: определить факт существования мезоциклона в заданной области и момент времени.
  - **Локализация**: определить координаты центра и размеры вихря.
  - **Слежение (tracking)**: связать последовательные обнаружения в индивидуальную траекторию и оценить время жизни.
  - **Классификация**: установить, является ли обнаруженный вихрь ПМЦ, и при необходимости оценить его интенсивность, тип облачной структуры и динамические характеристики.

Группа методов	Основные данные	Цель
Экспертное дешифрирование	Видимые, ИК- и WV-спутниковые изображения	Обнаружение облачных вихрей, определение их центра, размеров, траекторий, типа
Пассивная микроволновая радиометрия	SSM/I, SSMIS, AMSR, AMSU, MHS	Выявление аномалий водяного пара, облачных гидрометеоров, интенсивных мезовихрей
Активные микроволновые измерения	ASCAT, QuikSCAT, SAR	Анализ циркуляции ветра, градиентов скорости, определение положения центра, оценка интенсивности
Анализ полей давления	ERA5, CARRA, региональные модели	Выявление локальных барических минимумов, построение траекторий, оценка глубины циклонов
Вихревые методы	Поля ветра и его производные (завихренность, спиральность и др.)	Определение динамических центров вихрей, их размеров, оценка времени жизни, построение траекторий
Физико-эмпирические критерии	Температура, потенциальная температура, ветер, давление, SST	Прогноз, выделение ПМЦ среди множества мезовихрей
Машинное обучение	Спутниковые изображения, реанализы, размеченные каталоги	Локализация и классификация вихрей, оценка их морфологических параметров

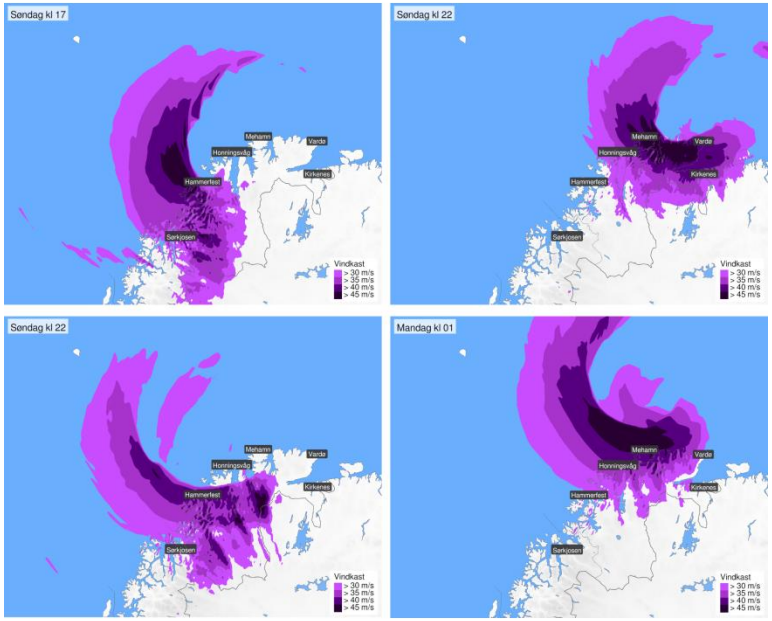
Оперативный прогноз ПМЦ в MET Norway



Выпуск карт траекторий и вероятности прохождения ПМЦ, предупреждения и морские прогнозы

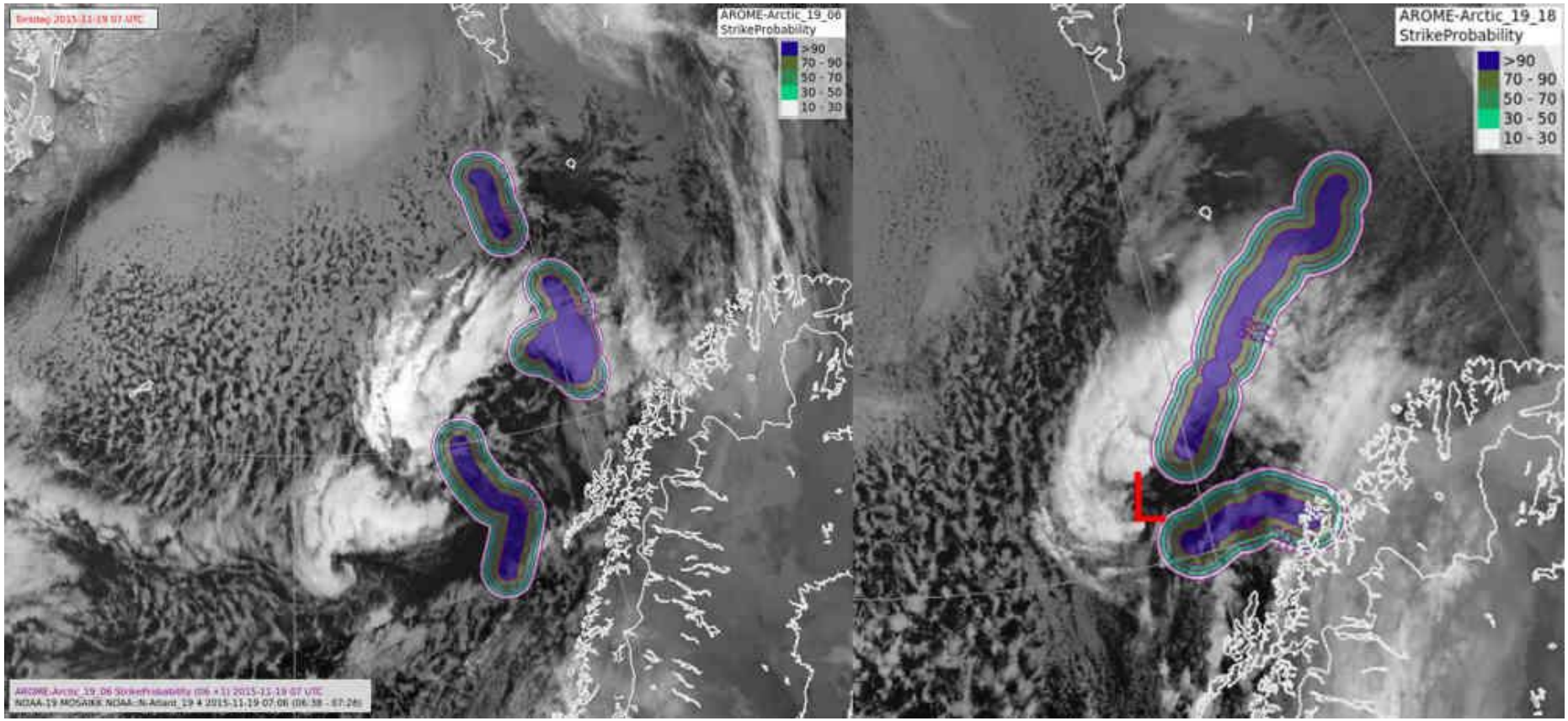
- Модель: AROME-Arctic
- Горизонтальное разрешение: 2.5 км
- Заблаговременность: до 60 ч
- Запуск: 4 раза в сутки
- Боковые и граничные условия: ECMWF
- Усвоение данных: AMSU-A, MHS, IASI, скаттерометры, AMV (экспериментально)

Анализируются поля ветра, давления, температуры, завихренности и температуры поверхности воды, накладываются ограничения на размеры и время жизни вихря.





Оперативный прогноз ПМЦ в MET Norway

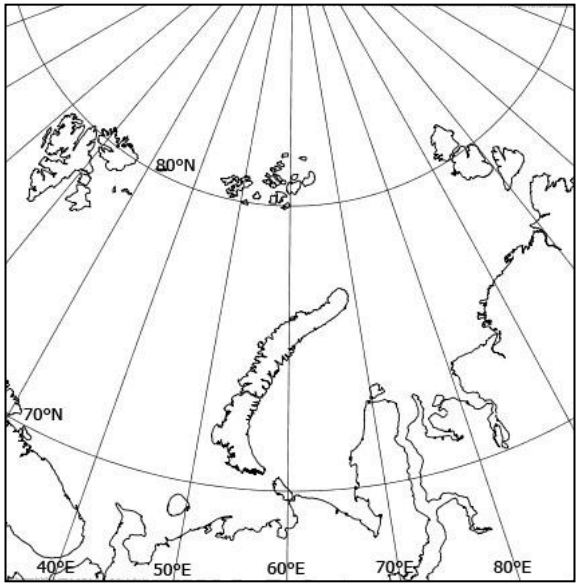


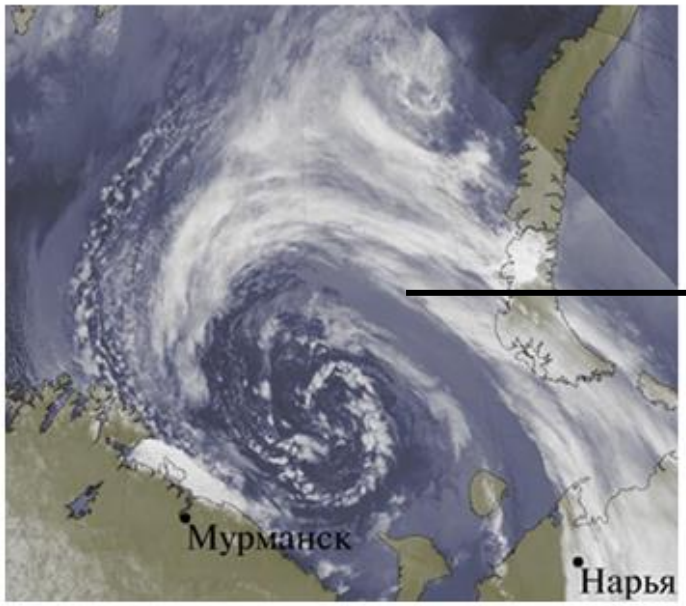
Карты вероятности попадания циклона в определенный район по прогнозируемой траектории

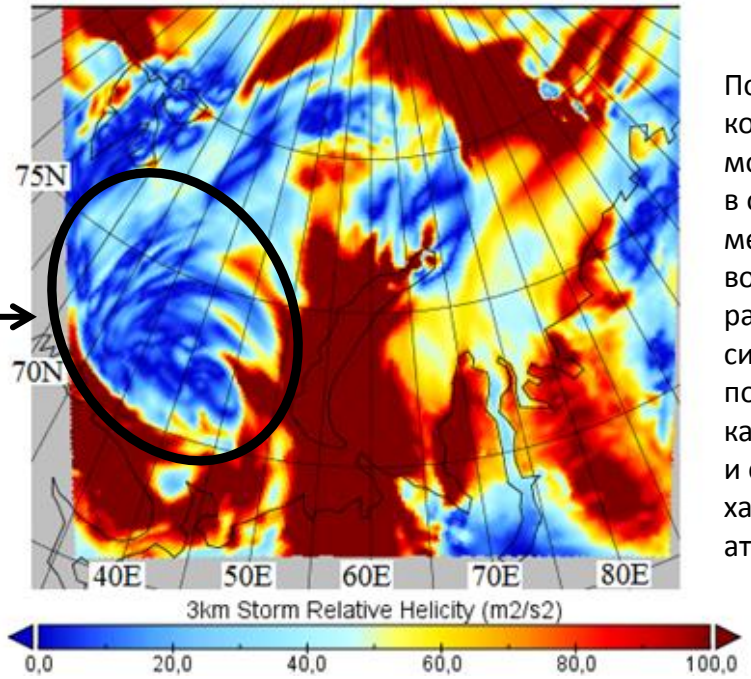
Оперативный прогноз ПМЦ в НПО Тайфун (исследовательский прототип)

- Модель: WRF
- Горизонтальное разрешение: 12 км (→ 8км)
- Заблаговременность: до 48 ч
- Запуск: 1 раза в сутки
- Боковые и граничные условия: GFS 0.5˚
- Усвоение данных: в стадии проработки (ASCAT, наземные метеостанции, аэрозонды, профили температуры и влажности (AMSU-A, ATMS, MHS, HIRS4)

- Индексы конвективной неустойчивости – как предикторы для выявления зон наиболее вероятного обнаружения ПМЦ в модельных прогнозах, рассчитываются на основе выходной продукции WRF.







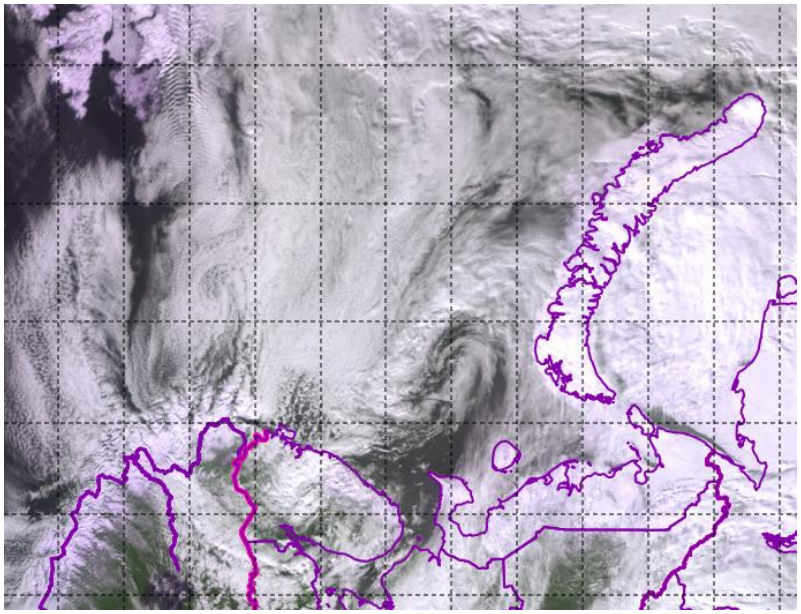
Поля различных конвективных индексов могут иметь особенности в областях мезоциклонов, возникающих при различных синоптических ситуациях, поскольку они связаны как с термическими, так и с динамическими характеристиками атмосферных процессов.

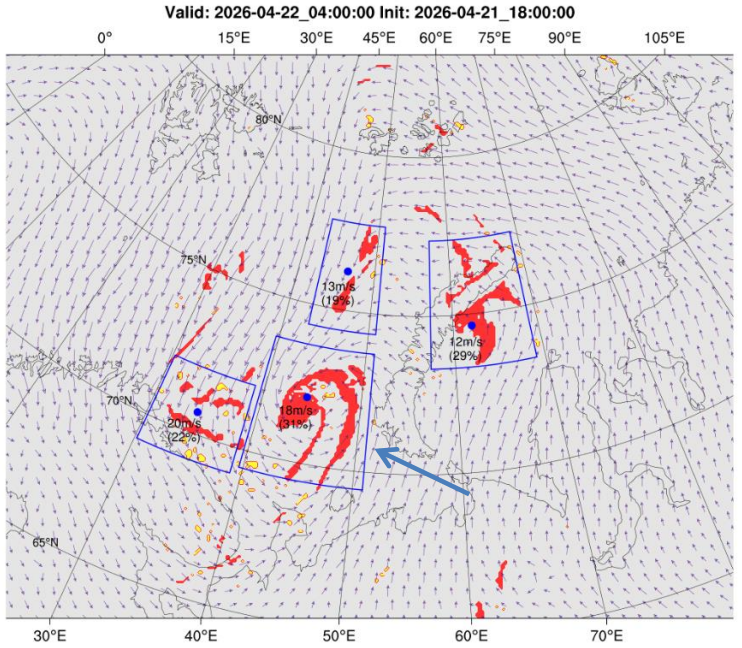
Методика выделения зон высокой вероятности обнаружения ПМЦ

- Был сформирован набор из 8 предикторов из числа рассчитываемых индексов, имевших особенности в районах развития ПМЦ:
  - ✓ завихренность (10 м, 0-1 км, 0-2 км, 0-3 км)
  - ✓ спиральность
  - ✓ сдвиг ветра (по Ричардсону, 0-1 км, разность модулей скорости 10 м – 1 км)

- Для каждого индекса были определены региональные пороговые значения с учетом их направленности на распознавание угроз возникновения ПМЦ.

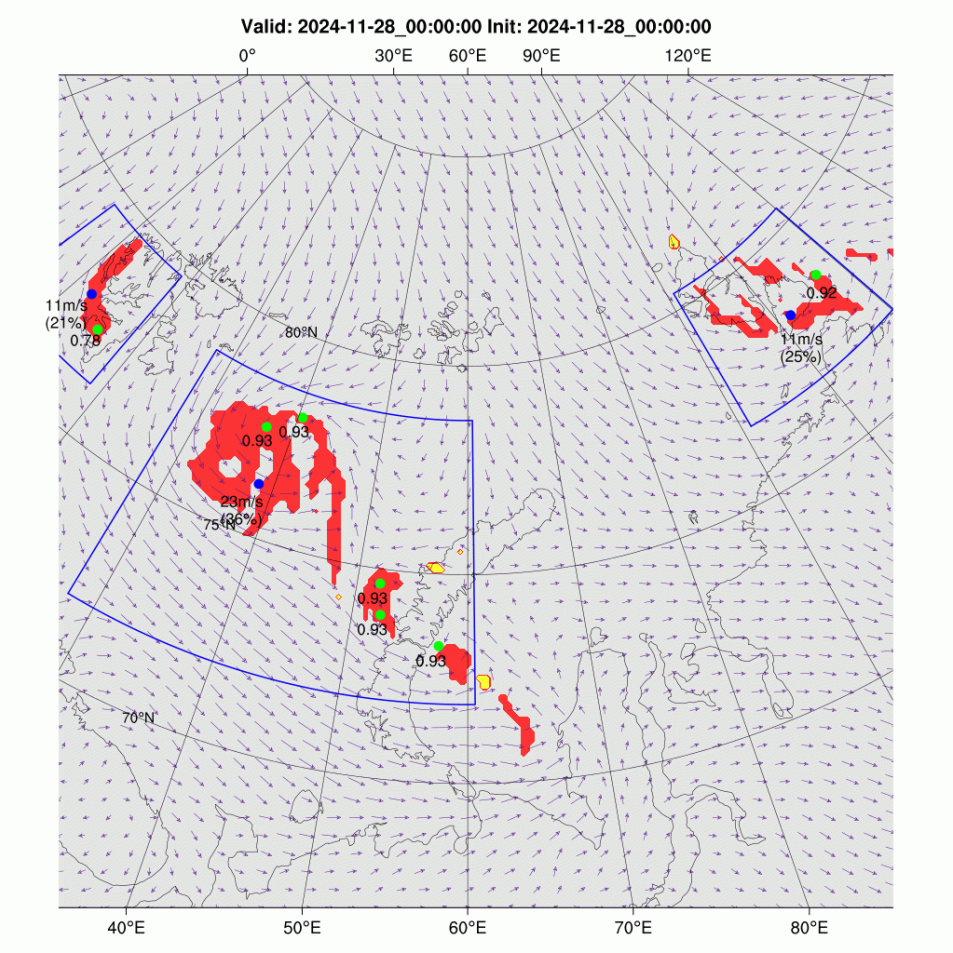
- Суперпозиция полей отобранных индексов дает возможность вероятностного прогнозирования областей риска зарождения и существования ПМЦ, а также построения прогностических траекторий их перемещения.

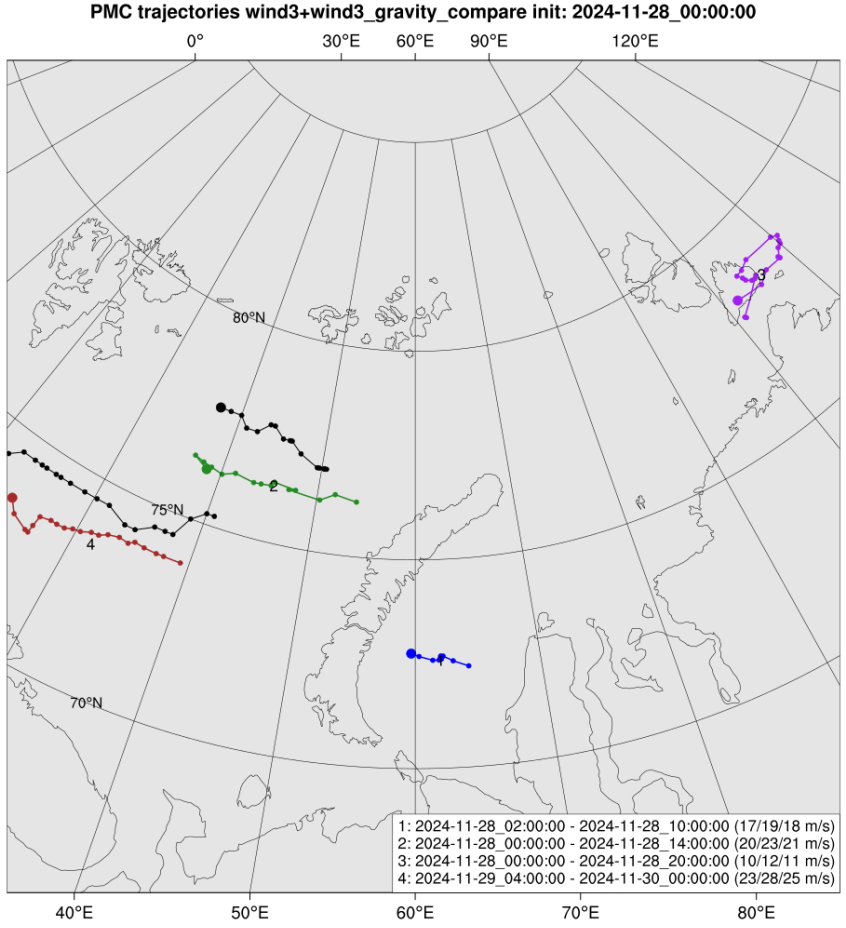




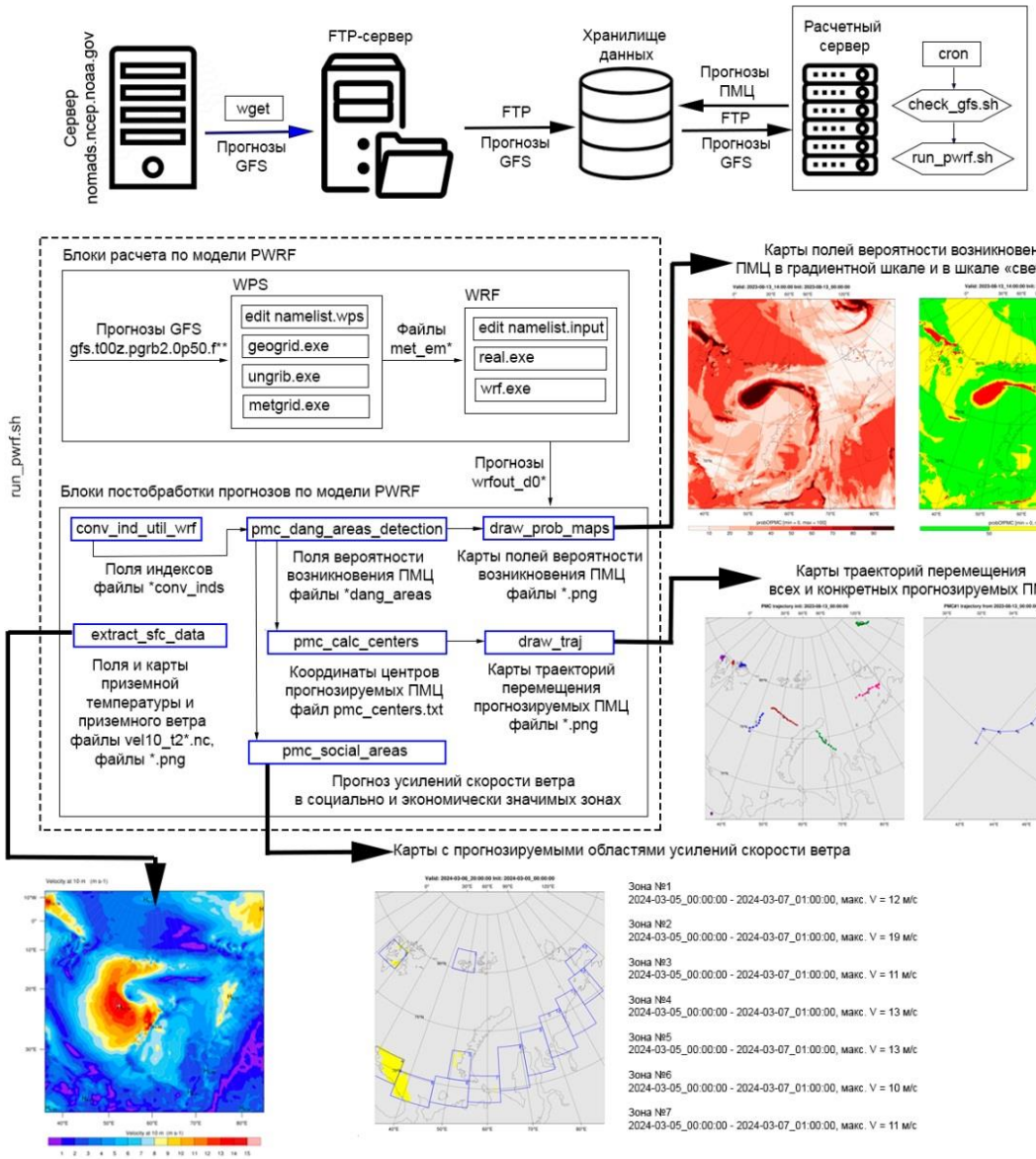
Методика построения траектории ПМЦ

- Для построения траектории 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 подготовки прогнозов ПМЦ



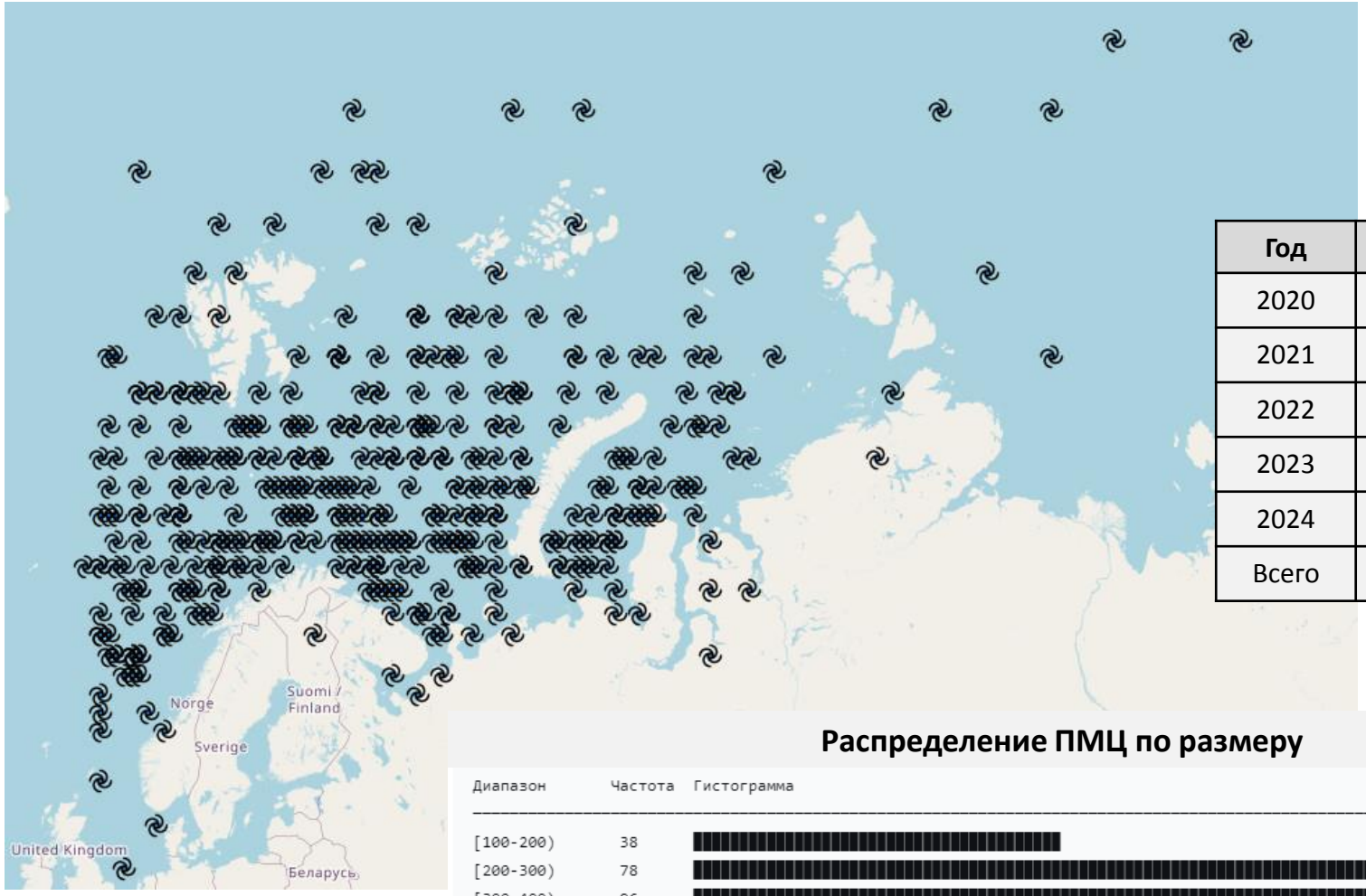
- В 2024 году были проведены настройка основных блоков расчета прогностических траекторий и ***независимые испытания*** технологии в ААНИИ. Подготовлены методические рекомендации по ее использованию.

- **Результаты независимых испытаний**:
  - ✓ общая оправдываемость прогноза – 76%
  - ✓ доля ложных прогнозов – 5%
  - ✓ пропуск ПМЦ – 19%
  - ✓ неверифицируемые прогнозы – 1%

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

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.

База данных ПМЦ 2020-2024 гг.



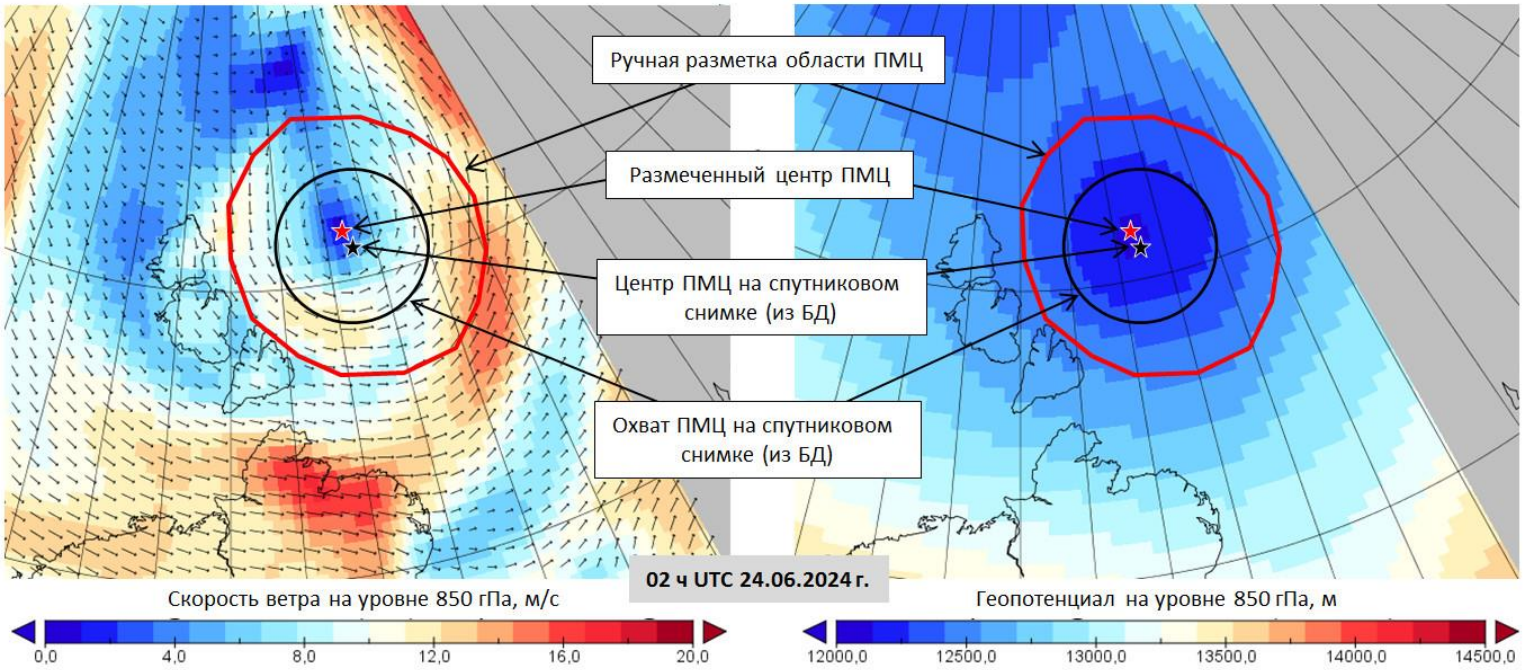
Год	Кол-во записей
2020	2
2021	31
2022	82
2023	122
2024	184
Всего	421

Распределение ПМЦ по размеру

Диапазон	Частота	Гистограмма
[100-200)	38	
[200-300)	78	
[300-400)	96	
[400-500)	77	
[500-600)	34	
[600-700)	52	
[700-800)	10	
[800-900)	18	
[900-1000)	6	
[1000+)	12	
ИТОГО	421	

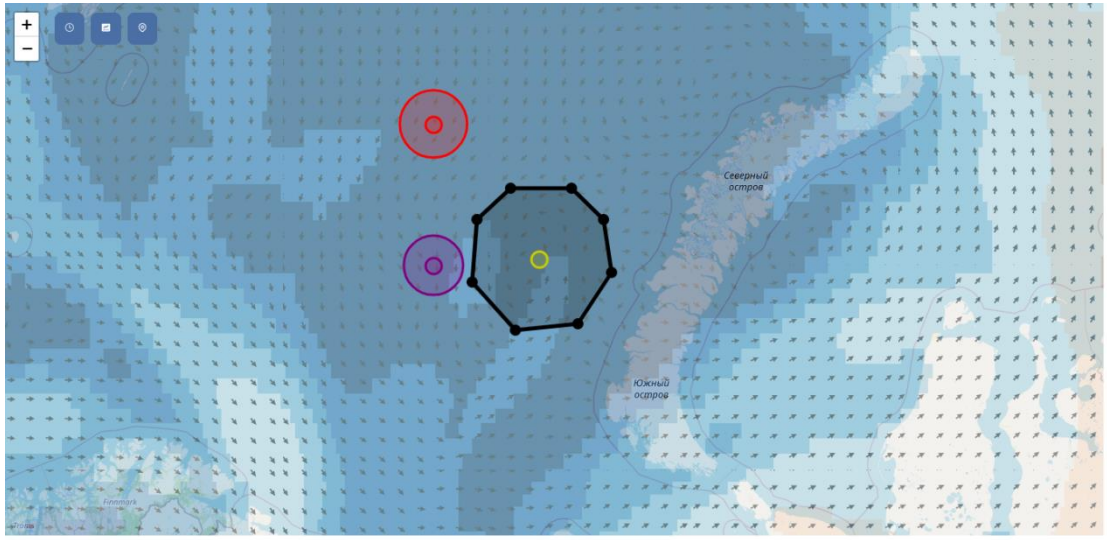
Основная масса – вихри размером от 200 до 500 км

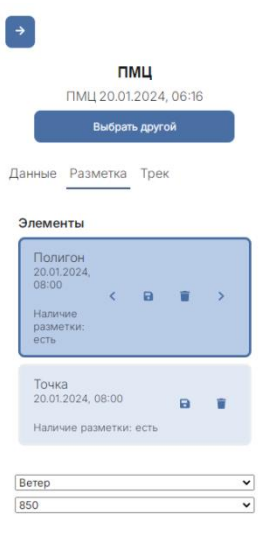
Разметка центров и областей ПМЦ

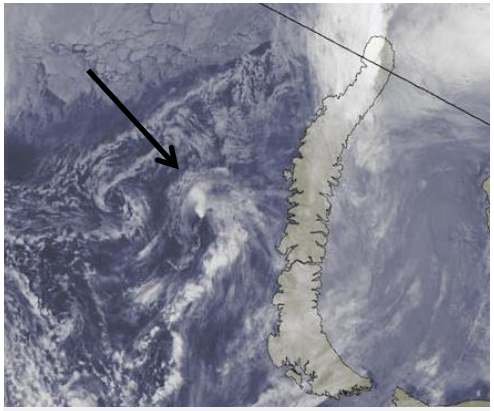


Реанализ	Шаг сетки	Шаг по времени	Кол-во модельных уровней	Домен	Период
ERA5	0.25˚ (≈ 31 км)	1 ч	137	глобальный	с 1940 г. по н.в.
NCEP-CFSv2	0.2˚ (≈ 22 км)	основной – 6 ч, прогнозы – 1 ч	64	глобальный	с 2011 г. по н.в.
MERRA-2	0.5° x 0.625° (≈ 55x50 км)	2D поля – 1 ч, 3D поля – 3 ч	72	глобальный	с 1980 г. по н.в.
ASRv2	15 км	3 ч	71	арктический регион (весь)	2000-2016 гг.
CARRA	2.5 км	основной – 3 ч, прогнозы – 1 ч	65	арктический регион (две зоны)	С 1990 по н.в.

Инструментарий интерактивной разметки

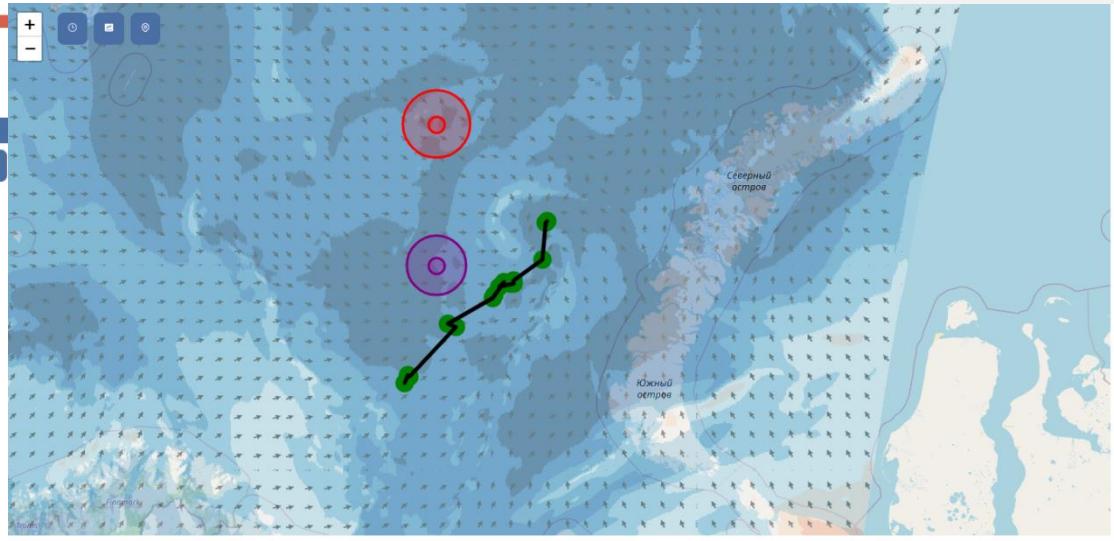


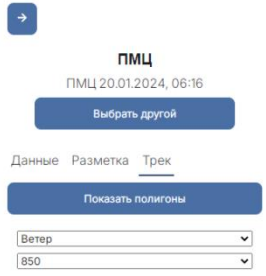




По спутниковым снимкам
20.01.2024 г. 06:16 – 07:56
Размер ~ 100 км





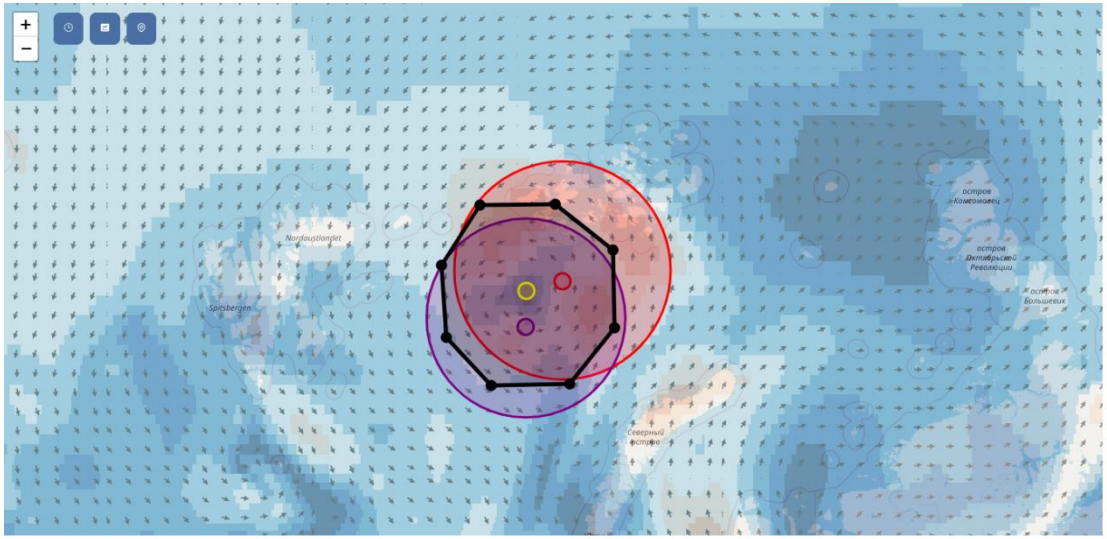


По реанализу

19.01.2024 20 ч –
20.01.2024 10 ч
Размер ~ 200 км



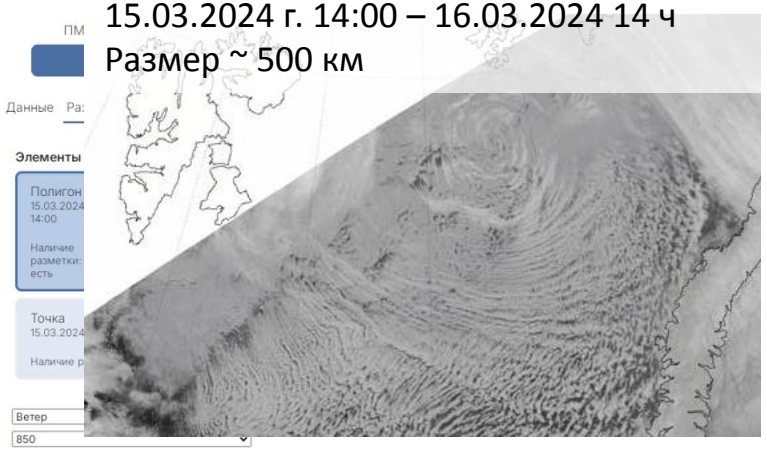
Инструментарий интерактивной разметки

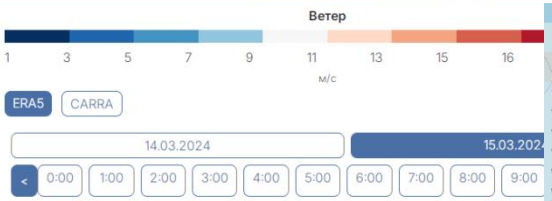


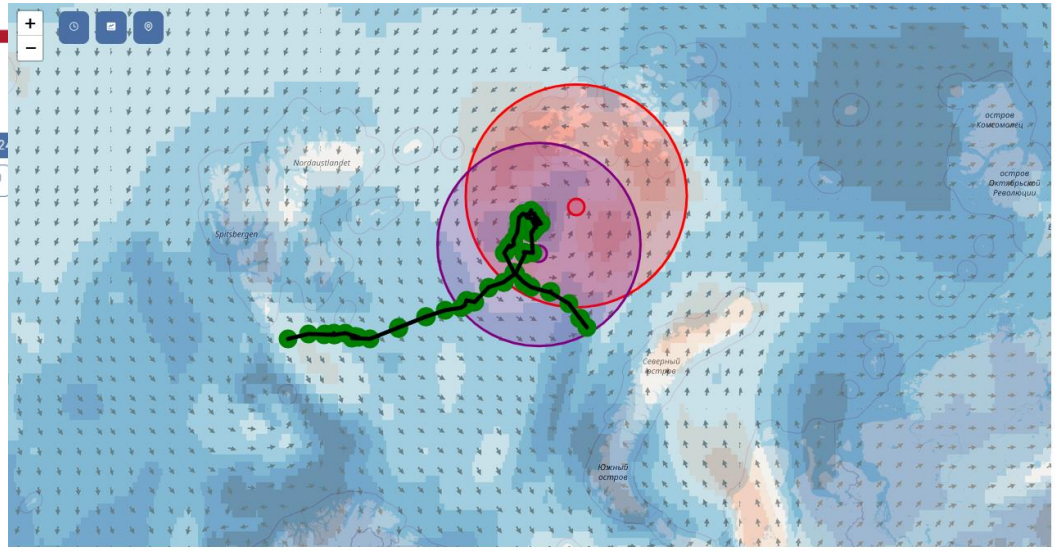
По спутниковым снимкам

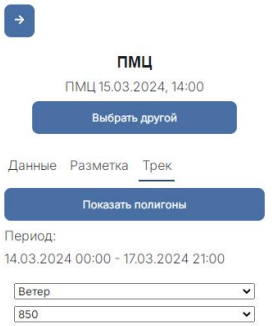
15.03.2024 г. 14:00 – 16.03.2024 14 ч

Размер ~ 500 км







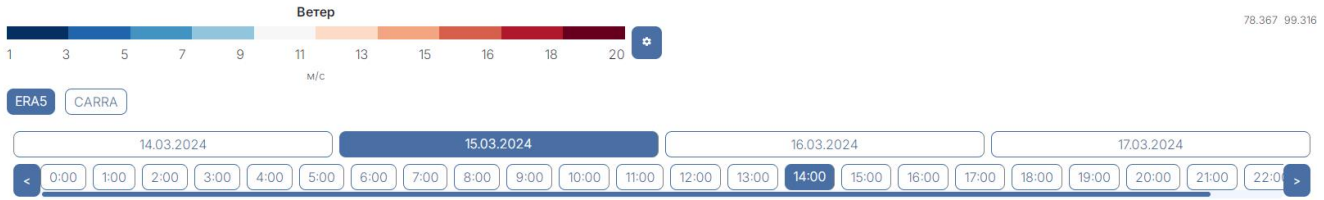


По реанализу

14.03.2024 00 ч –

17.03.2024 21 ч

Размер ~ 500 км



Разработка новой схемы выделения зон высокой вероятности обнаружения ПМЦ

wrfout_d01_2026-04-22_18%253A00%253A0…	wrfout_d01_2026-04-22_18%253A00%253A00_conv…	Local File
a46ws	4-6-km Storm Relative Winds	Geo2D
a911ws	Anvil Level/9-11-km Storm Relative Winds	Geo2D
as2ws	Surface-2km Storm Relative winds	Geo2D
bl6vs	Boundary Layer to 6 km Vertical Shear	Geo2D
boydI	Boyden Index	Geo2D
bradI	Bradbury Index	Geo2D
brn	Bulk Richardson Number	Geo2D
brns	Bulk Richardson Number Shear	Geo2D
cap	Maximum temperature difference of a lifted parcel and …	Geo2D
caph	CAP Height	Geo2D
ci	Convective Instability Index	Geo2D
crp	Craven Parameter	Geo2D
ct	Cross Totals	Geo2D
dci	Deep Convective Index	Geo2D
dl1	LFC-LCL	Geo2D
dl2	EL-LFC	Geo2D
dls	Deep Layer Shear	Geo2D
dss1	Surface-1km Storm Relative Directional Shear	Geo2D
dss3	Surface-3km Storm Relative Directional Shear	Geo2D
dti	Delta-T Index	Geo2D
dvxvy	10 m Vx Vy Difference between two neighboring grids	Geo2D
dvxvy2	10 m Directional Difference between neighboring grids …	Geo2D
dws1	Surface-1km Wind Speed Difference	Geo2D
dws2	Surface-2km Wind Speed Difference	Geo2D
dws3	Surface-3km Wind Speed Difference	Geo2D
ebvs	Effective bulk shear	Geo2D
ehi	Energy Helicity Index	Geo2D
ei	Energy Index	Geo2D
esrh	Effective SRH	Geo2D
hel1	Integrated helicity over the lowest 1 km	Geo2D
hel3	Integrated helicity over the lowest 3 km	Geo2D
hi	Humidity Index	Geo2D
jeffm	Modified Jefferson Index	Geo2D
ki	K Index	Geo2D
kim	Modified K Index	Geo2D
km3cape	3kmCAPE	Geo2D

100 индексов

tt	Total Totals	Geo2D
ttm	Modified Total Totals	Geo2D
uvv	Upward Vertical Velocity	Geo2D
v850	850 gPa Wind Speed	Geo2D
vgp	Vorticity Generating Parameter	Geo2D
vrt	Vorticity	Geo2D
vt	Vertical Totals	Geo2D
XLAT	XLAT	Geo2D
XLONG	XLONG	Geo2D
XTIME	XTIME	1D
yonI	Yonetani Index	Geo2D

Поля индексов

Разметка областей ПМЦ

Статистический анализ

Оценка информативности (предварительный отбор)

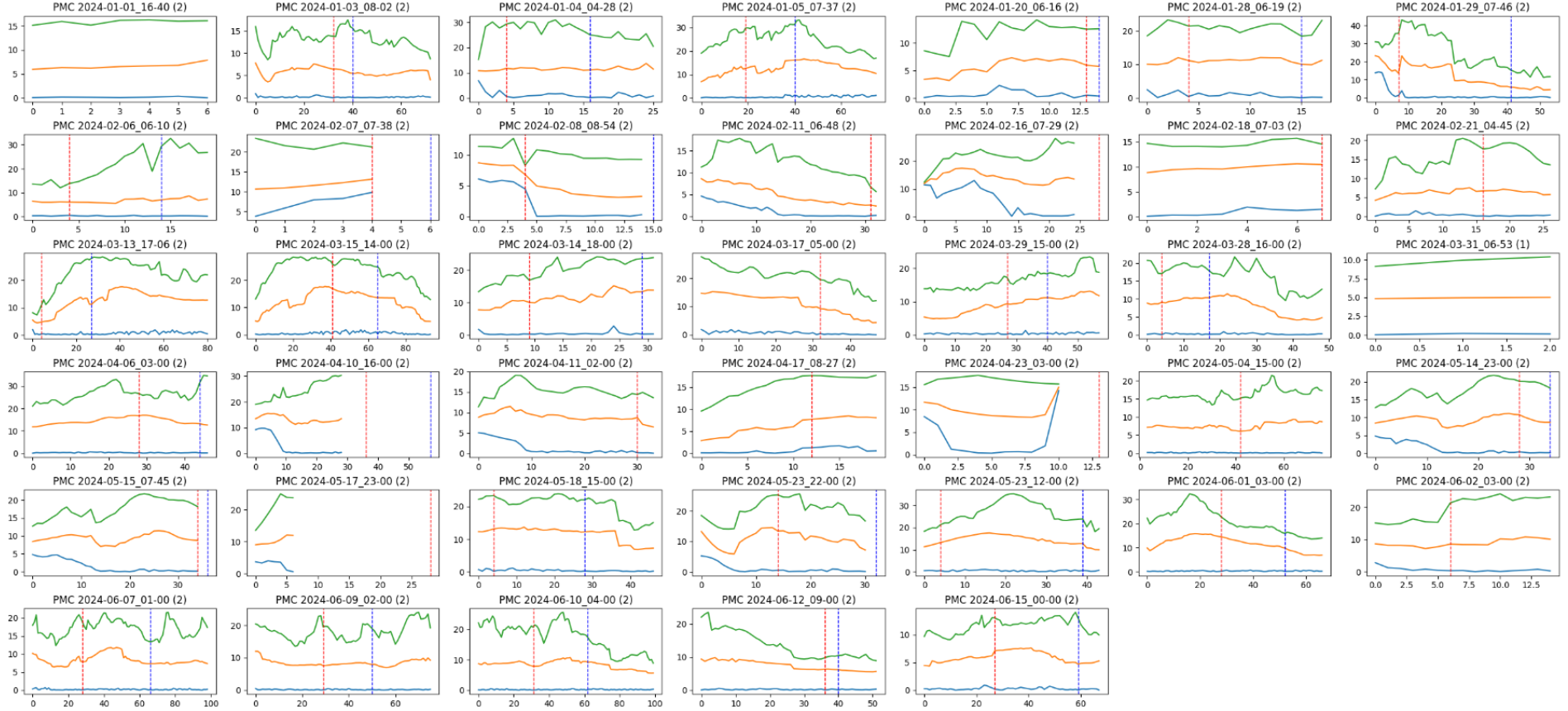
Машинное обучение

Тестирование новой композиции индексов

Построение траектории ПМЦ по новой методике

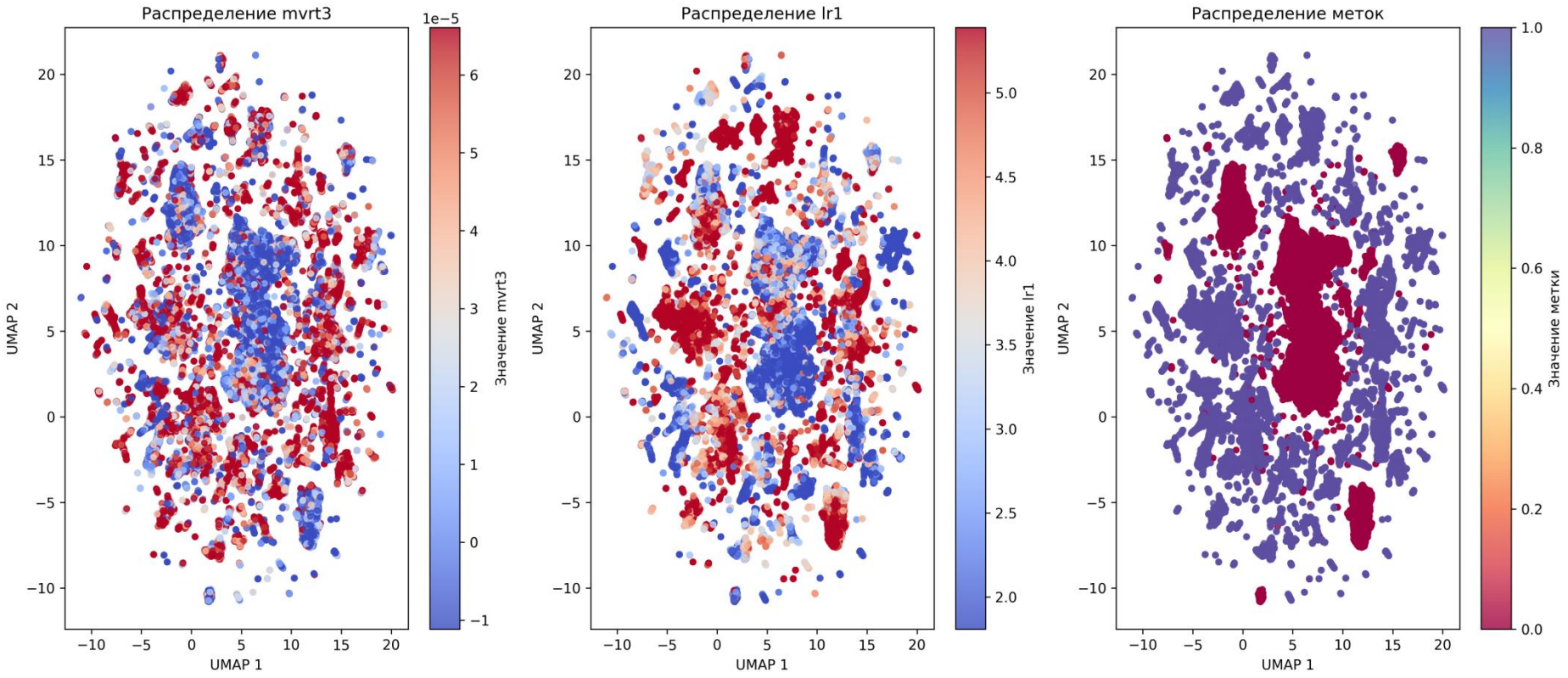
Размеченные ПМЦ

- Период: первая половина 2024 г.
- Количество случаев: 40 вихрей, из них 39 с интенсивностью ПМЦ (скорость ветра > 10 м/с)
- Всего элементов разметки: 1453
- Средняя длина траектории: 43 ч



Двумерное представление вектора признаков с помощью UMAP

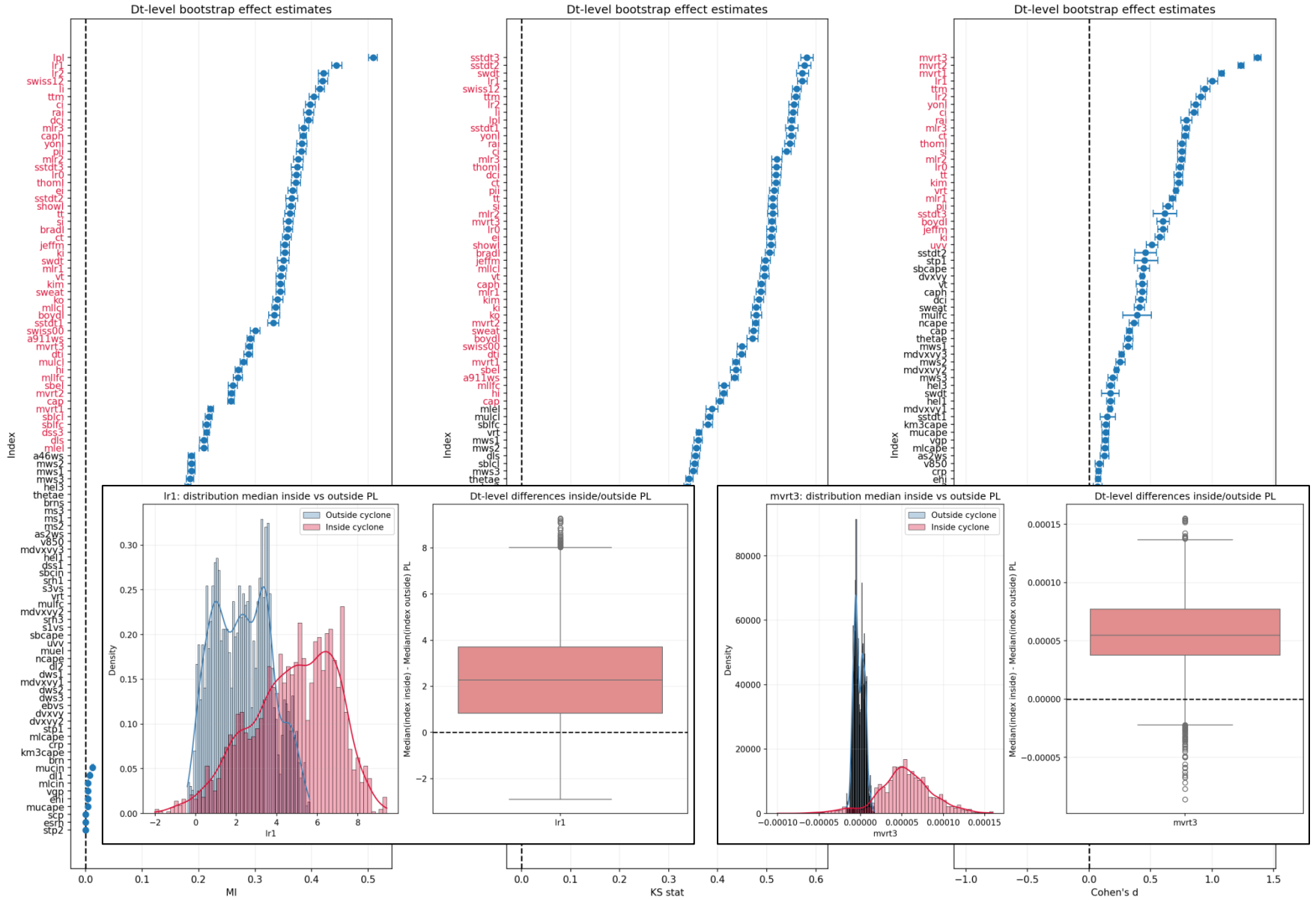
Показана принципиальная возможность используемого набора признаков разграничить анализируемые ситуации: область ПМЦ (фиолетовые зоны) и фоновая область (бордовые зоны).



В областях ПМЦ значения завихренности в слое 0-3 км и температурного градиента в слое 0-1 км чаще всего выше, чем в фоновой области.

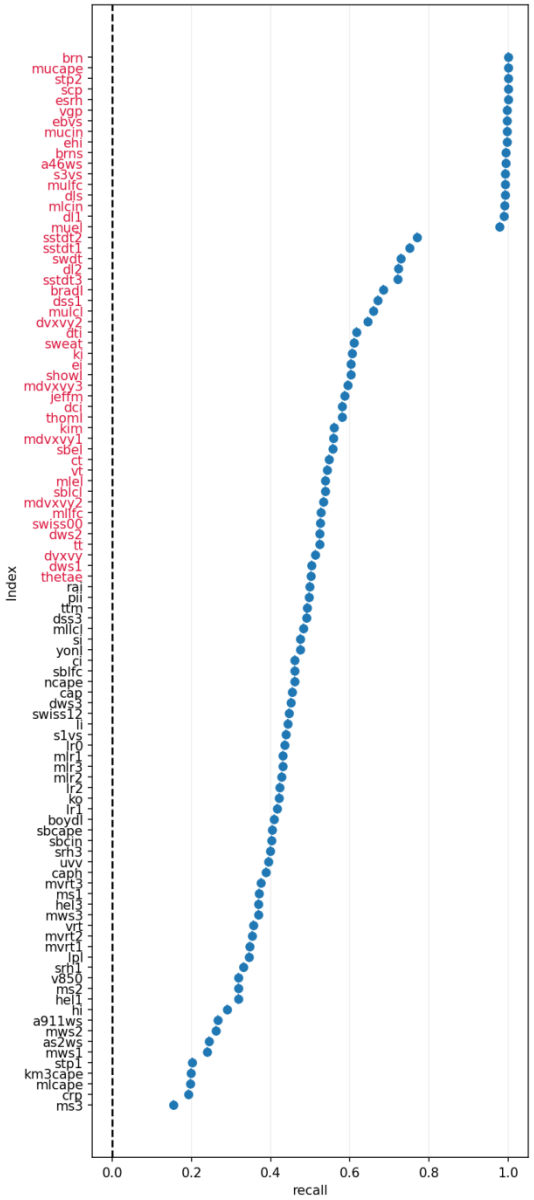
Ранжирование индексов по наличию полезного сигнала

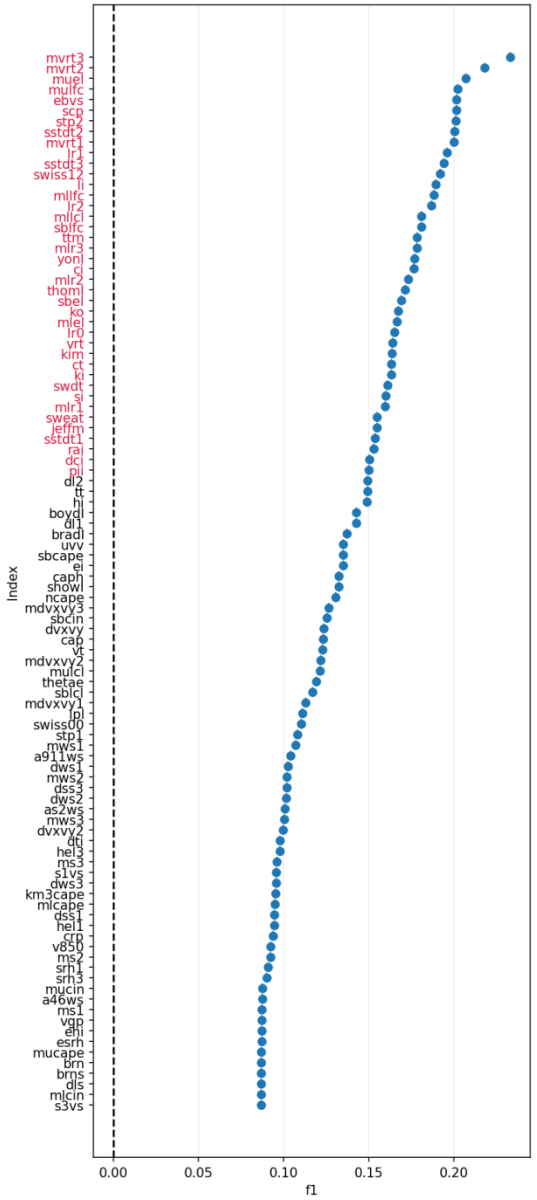
Метрики: Mutual Information , KS-статистика, Cohen's d, Point-biserial r, Cliff's delta

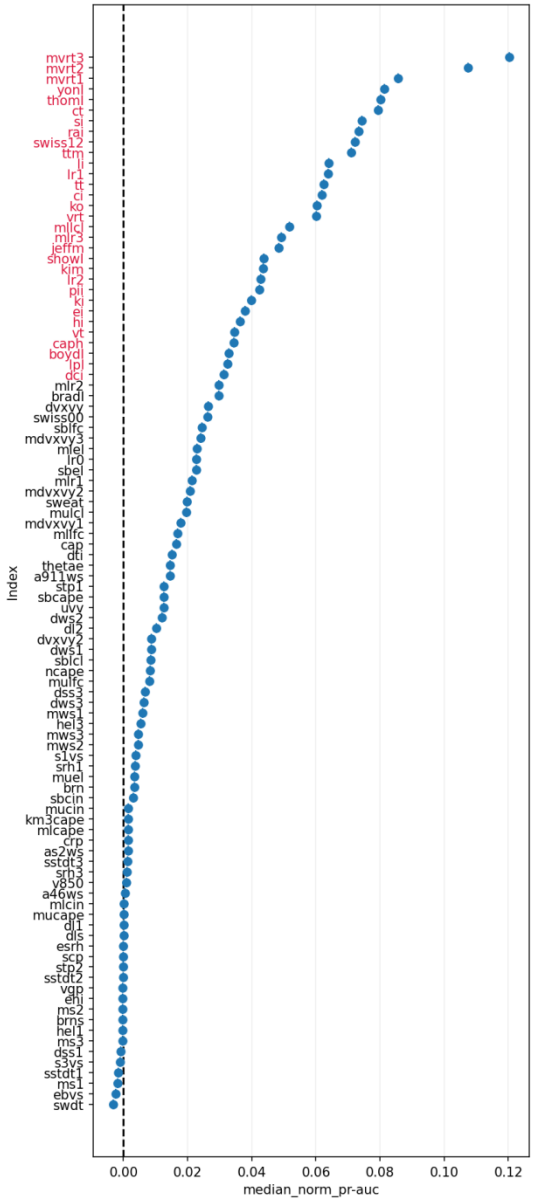


Ранжирование индексов по разделительной способности с учетом пространственной точности

Метрики: recall, precision, f1 (dice), IoU, ROC-AUC, PR-AUC



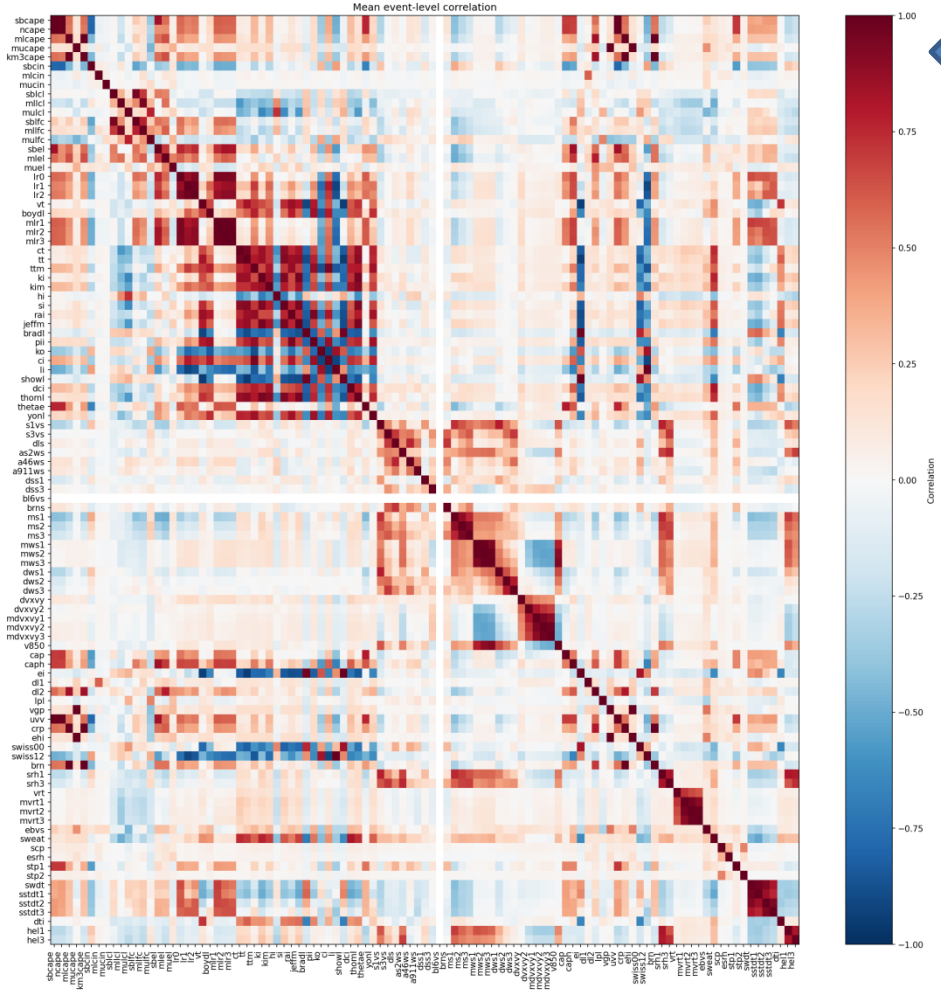




Отобранные индексы и их корреляция

- **Индексы, отобранные по всем метрикам:**
  mvrt3, mvrt2, mvrt1, yonI, thomI, ct, si, raI, swiss12, ttm, li, lr1, tt, ci, ko, mllcl, mlr3, jeffm, kim, lr2, pii, boydI, mlr2, lr0, mlr1, ki (26 шт.)

- **Индексы, отобранные по большинству метрик:**
  vrt, showI, ei, hi, vt, sstdt3, sstdt2, swdt, mllfc, muel, sblfc, mulfc, ebvs, sbel, mlel, sstdt1, dci, sweat (18 шт.)



Тепловая карта, построенная на основе коэффициента корреляции Спирмена

Ярко красные и ярко синие области - зоны высокой корреляции. Бледные области – зоны слабой корреляции.

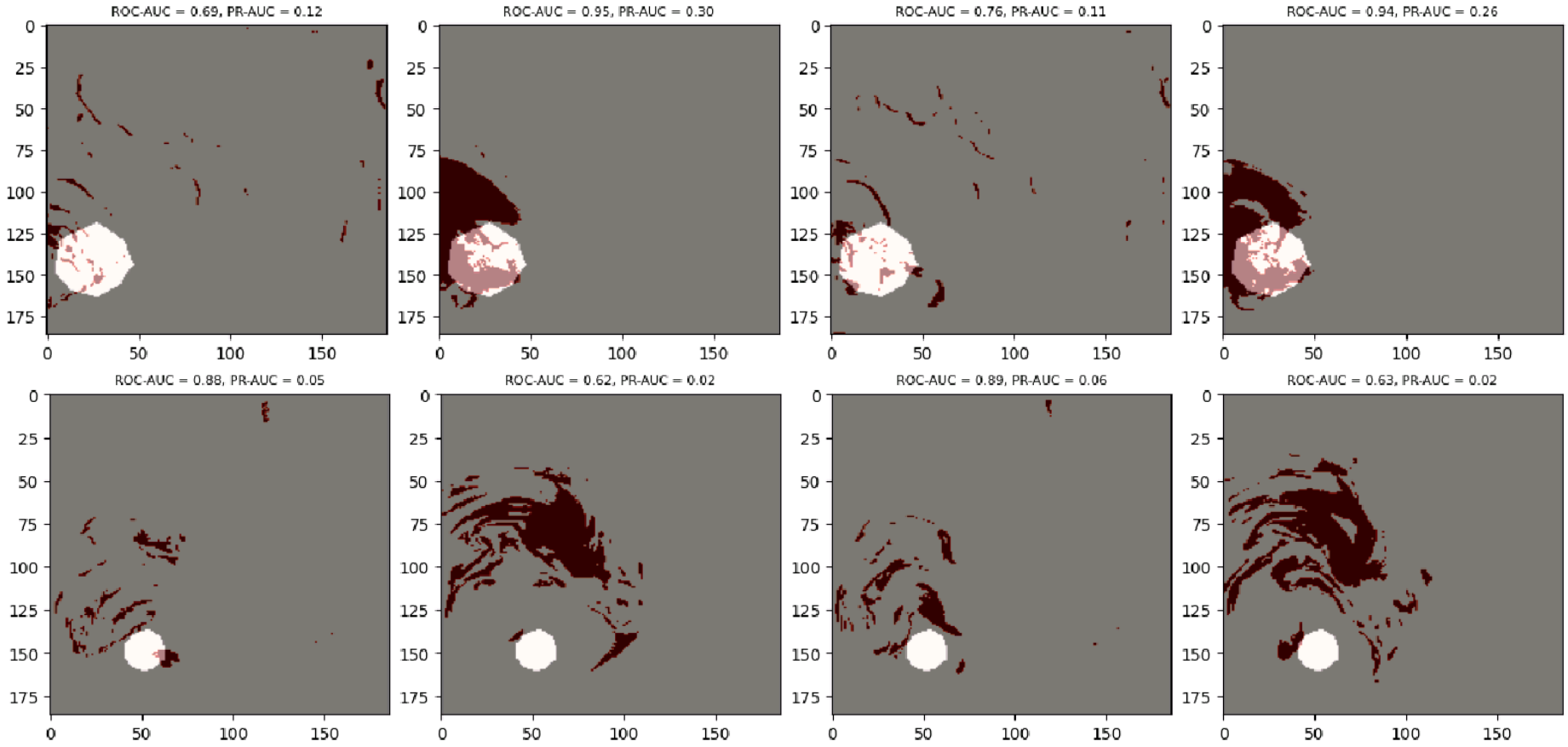
Два варианта новой пороговой схемы

✓ **вариант №1 (10 индексов)**
завихренность: mvrt3
нижняя граница облачности: mllcl
температурный градиент: mlr3
конвективная облачность: boydI, ct, ttm, thomI yonI, raI, swiss12

✓ **вариант №2 (22 индекса)**
завихренность: vrt
перепад температур: sstdt3
верхний уровень конвекции: muel, mlel, sbel
уровень свободной конвекции: mulfc, sblfc
конвективная облачность: showI, hi, dci, sweat
сдвиг ветра: ebvs

Оценка эффективности пороговых схем

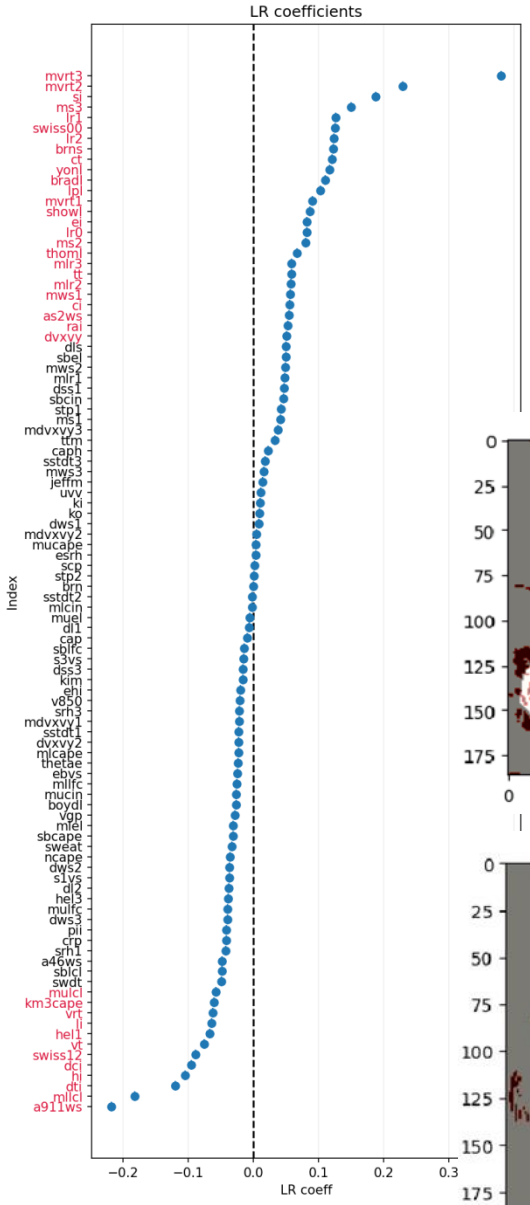
Новая схема №1



Заблаговременность прогноза	Метрика PR-AUC		
	Текущая схема	Новая схема №1	Новая схема №2
24 ч	0.09	0.33	0.24
0 ч	0.11	0.42	0.42

Добавление 12 индексов не приводит к повышению точности выделения области ПМЦ (вероятно дополнительные индексы вносят шум).

Отбор индексов на основе L1-регуляризации логистической регрессии



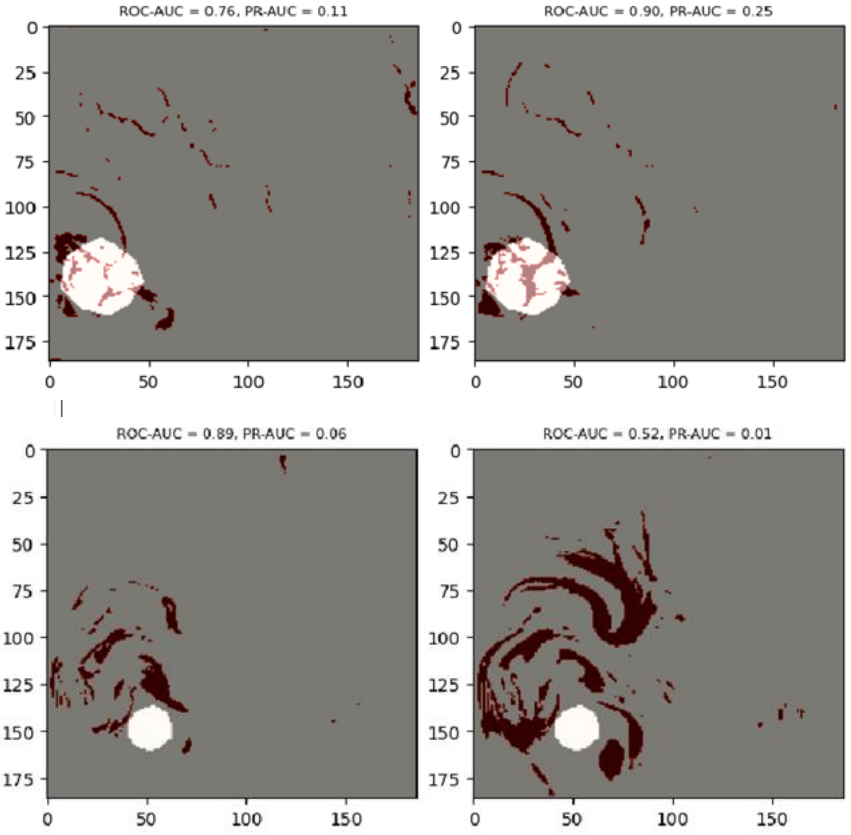
Вариант №3 логистическая регрессия

$z=Xw+b$ $p=\sigma(z)=1/(1+e^{-z})$

Отобранные индексы:

mvrt3, mvrt2, si, ***ms3***, lr1, swiss00, lr2, brns, ct, yonI, bradI, lpl, mvrt1, showI, ei, lr0, ***ms2***, thomI, mlr3, tt, mlr2, ***mws1***, ci, ***as2ws***, rai, dvxvy, mulcl, km3cape, vrt, li, hel1, vt, swiss12, dci, hi, dti, mllcl, ***a911ws*** (38 шт.)

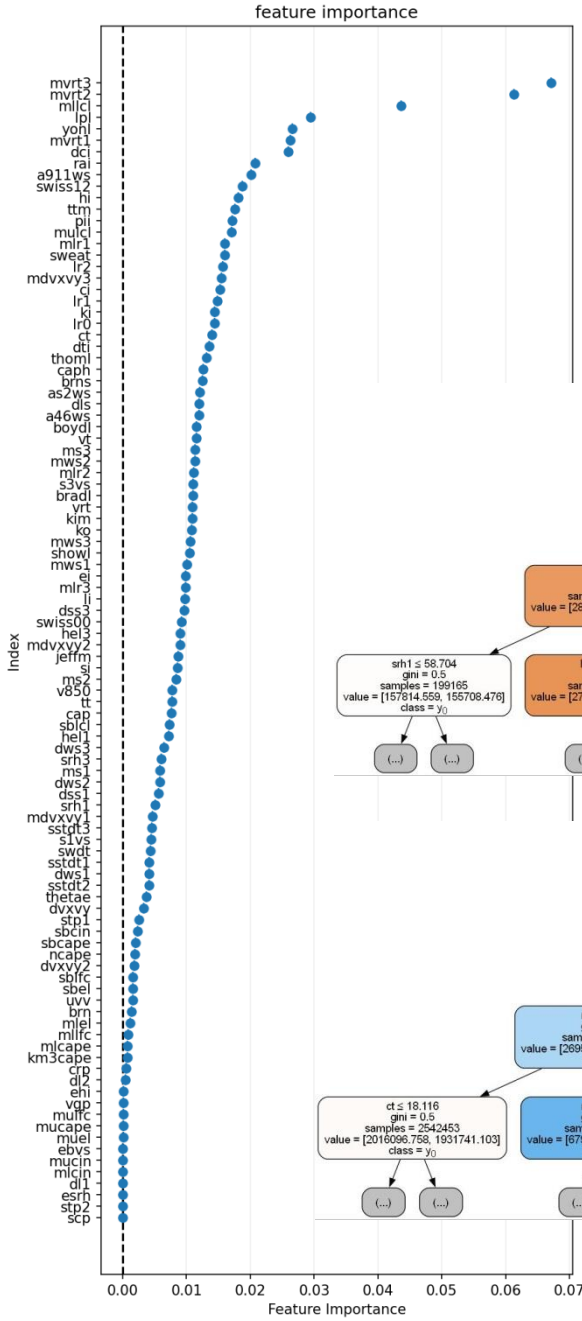
В этом варианте выявлена значимость и группы динамических индексов поля ветра (скорость, сдвиг).



Заблаговременность прогноза	Метрика PR-AUC	
	Текущая схема	Лог. регрессия
24 ч	0.09	0.40
0 ч	0.11	0.44

Логистическая регрессия лучше пороговых схем.

Выделение зон ПМЦ на основе случайного леса

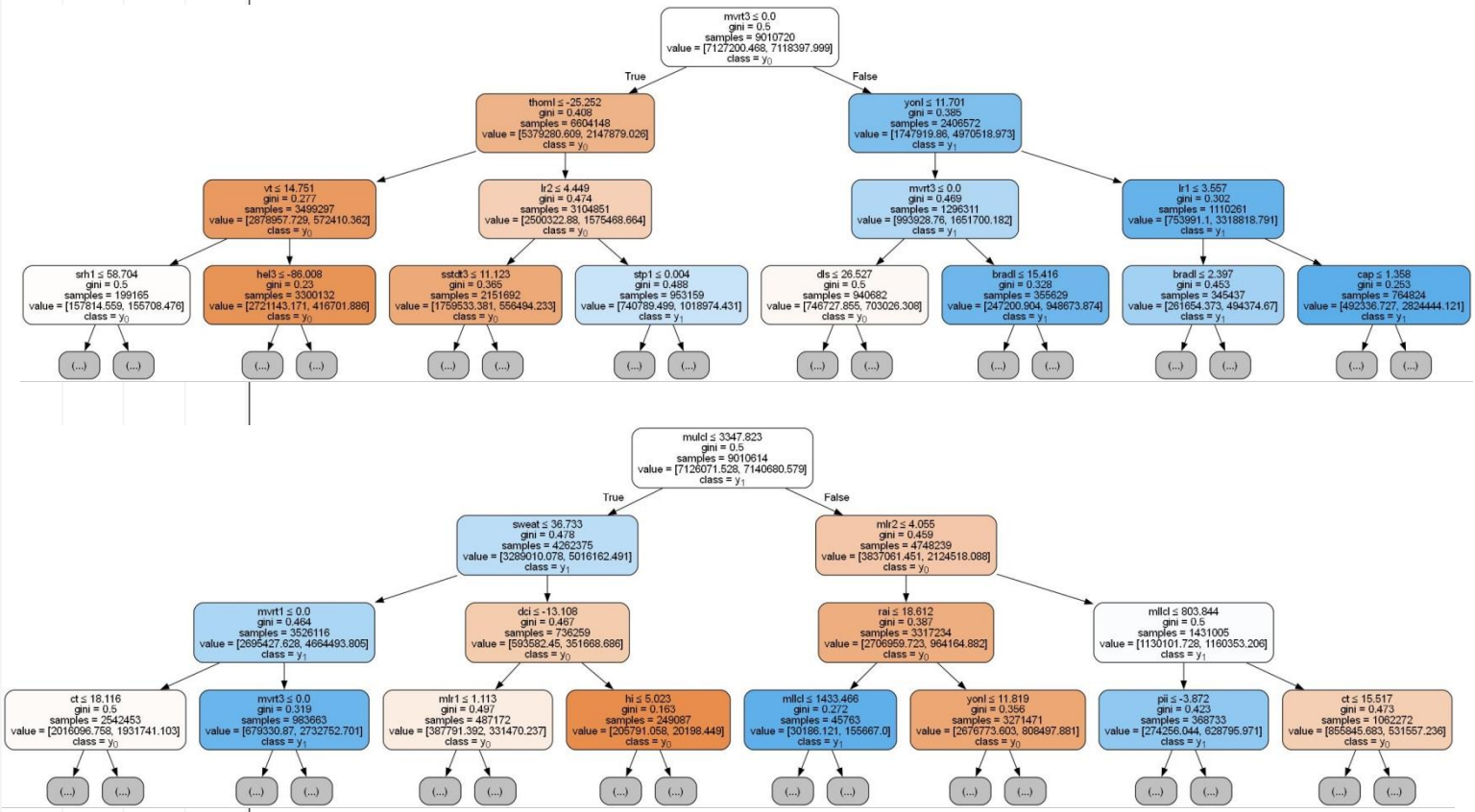


Топ-7 индексов:

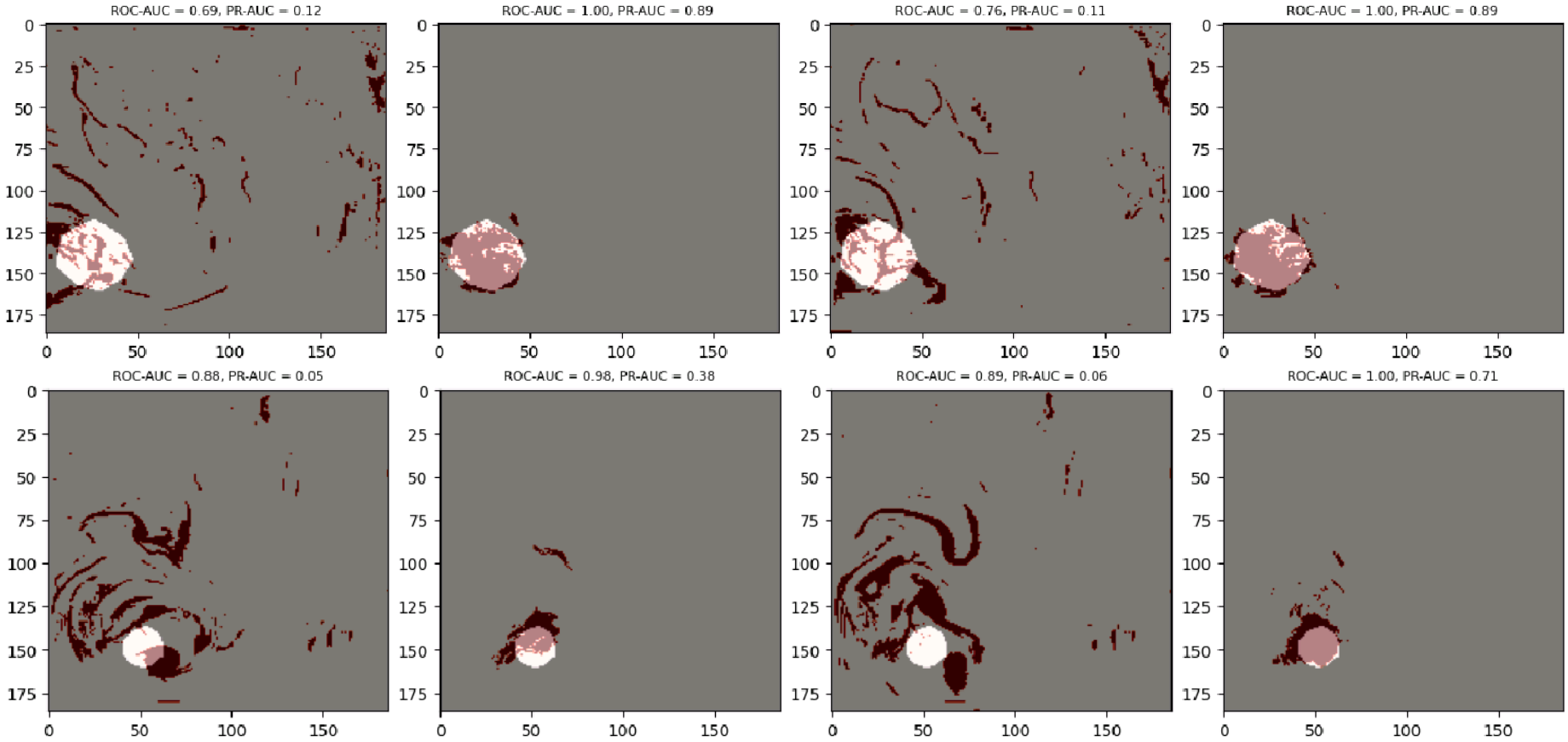
mvrt3, mvrt2, mllcl, lpl, yonl, mvrt1, dci - завихренность, нижняя граница облачности, конвективная неустойчивость

Гиперпараметры Random Forest

- n_estimators: 50
- max_depth: None
- min_samples_leaf: 20
- min_samples_split: 2



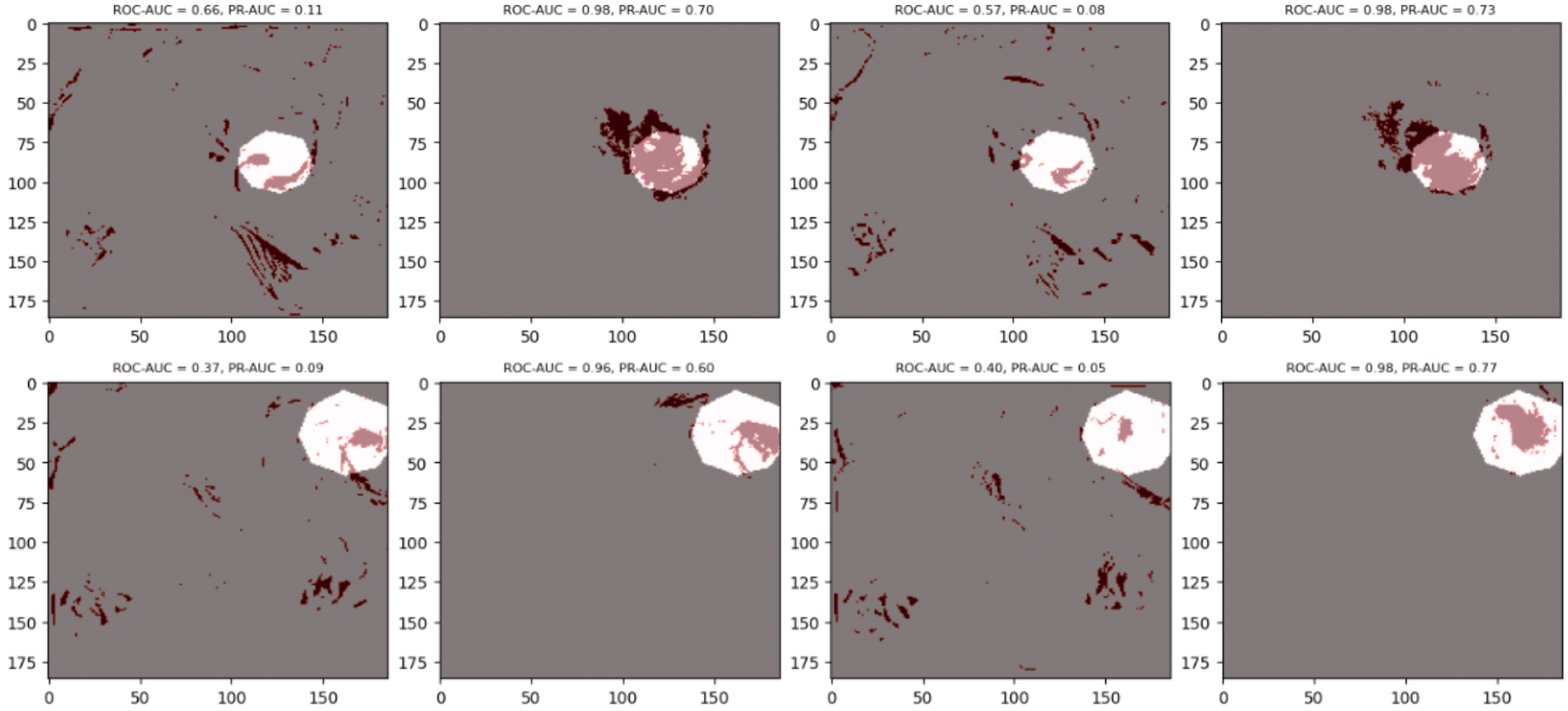
Оценка эффективности случайного леса



Заблаговре-менность прогноза	Метрика PR-AUC				
	Текущая схема	Новая схема №1	Новая схема №2	Лог. регрессия	Случайный лес
24 ч	0.09	0.33	0.24	0.40	0.98 (F1=0.72)
0 ч	0.11	0.42	0.42	0.44	0.85 (F1=0.73)

Оценка эффективности случайного леса

Новые случаи, не вошедшие в обучающую выборку



Заключение

- В НПО «Тайфун» разработан **исследовательский прототип технологии** подготовки прогнозов ПМЦ для акватории Баренцева и Карского морей. Прогноз строится на основе результатов выявления зон высокой вероятности обнаружения ПМЦ в модельных данных. Для локализации зон используется специально **отобранный набор индексов** неустойчивости, рассматриваемых в композиции.

- С целью усовершенствования методики выявления ПМЦ проводится работа по **разметке областей** циклонов и их центров на базе данных реанализа ERA5 и CARRA с опорой на ранее сформированную базу данных ПМЦ, построенную на основе спутниковых снимков. Наличие такой разметки позволяет проследить весь путь развития циклона, в то время как информация в базе ограничена тем набором спутниковых снимков, которые были доступны на момент их анализа.

- На текущий момент с использованием разработанного инструментария интегративной разметки **восстановлены области и траектории** 40 ПМЦ (с часовой дискретностью), относящихся к первой половине 2024 г. Работа будет продолжена.

- С использованием различных метрик проведен **отбор индексов**, наилучшим образом разграничивающих зоны существования ПМЦ и несвязанные с ПМЦ области (фон). Определены характерные пороговые значения этих индексов. В рамках проведенного анализа нашли подтверждение связи ранее уже используемых индексов (в первую очередь завихренность), а также выявлены новые потенциально востребованные в последующей работе информативные индексы. В частности установлено, что из четырех вариантов завихренности наиболее информативен вариант расчета **средневзвешенной завихренности в слое 0-3 км**, значимы оказываются и **температурно-влажностные индексы**, изначально разработанные для прогноза конвекции умеренных широт.

- Протестированы **четыре варианта** схем локализации зон ПМЦ: две пороговые схемы с соответственно 10 и 22 индексами, логистическая регрессия с L1-регуляризацией, модель случайного леса. Все они превосходят текущую схему по метрике PR-AUC.

- Наилучшие результаты показал вариант **случайного леса**. Продолжается работа по подбору оптимальных гиперпараметров данной модели.