

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ...

... по следам воркшопа в ЕЦСПП в июне 2013 (Рединг, Англия)

**Виктор Степаненко**  
НИВЦ МГУ

**Чечин Дмитрий**  
ИФА им. А.М. Обухова РАН



### **Mission Statement**

„Promote cooperative international research enabling development of improved weather and environmental prediction services for the polar regions, on time scales from hourly to seasonal“

### **Year of Polar Prediction (YOPP) 2017-2018:**

#### **Aims:**

- Intensive observational and modelling period to advance polar prediction capabilities
- Research into forecast-stakeholder interaction
- Enhanced verification
- Education of students and early career scientists

### **Steering Group meeting of the Polar Prediction Project**

(NCAR, Boulder, USA, 1-3 October 2013)

# Основные проблемы параметризаций и воспроизведения физических процессов в численных моделях прогноза погоды

---

**1. Слоисто-кучевые облака со смешанной фазой**

**2. Устойчивый погранслои**

**3. Неоднородная подстилающая поверхность:**

- снег
- морской лед: разводья и полыньи, снежницы

**4. Мезомасштабные процессы (влияние шага сетки):**

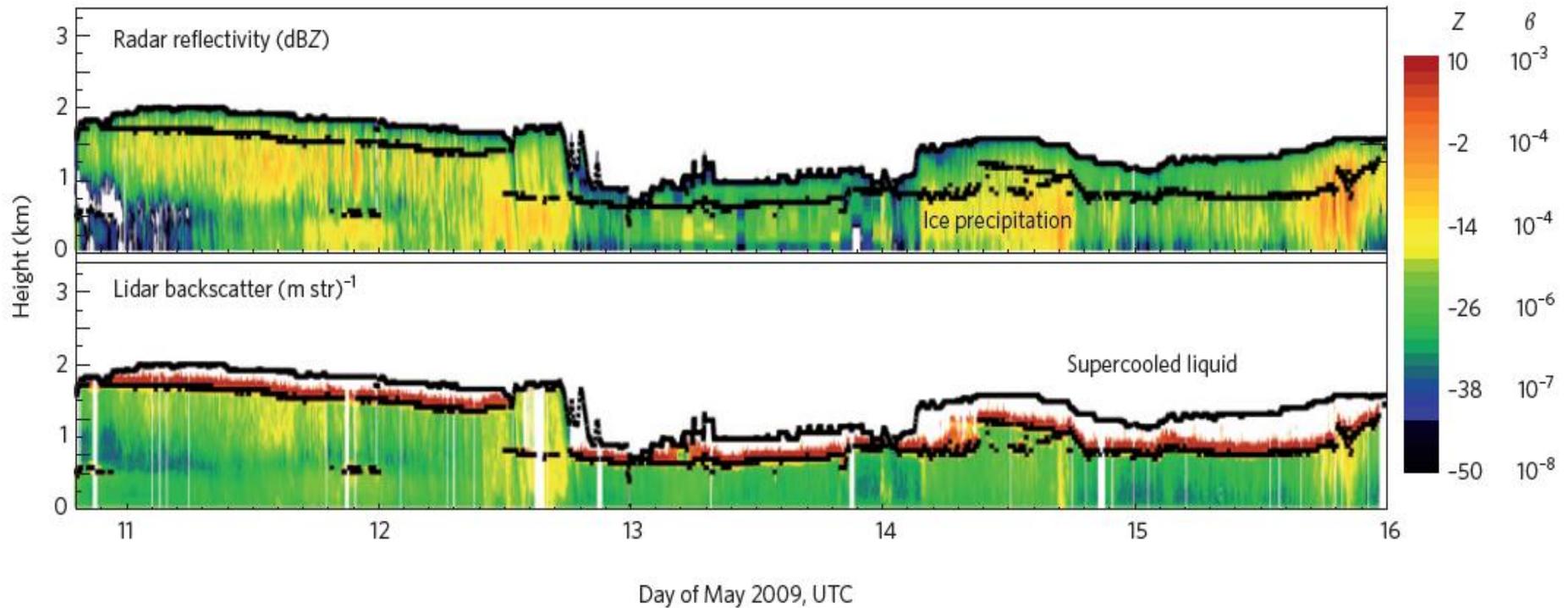
- струи (фены + барьерные ветры + ветры ущелий),
- полярные мезоциклоны

## Слоисто-кучевые облака со смешанной фазой в Арктике



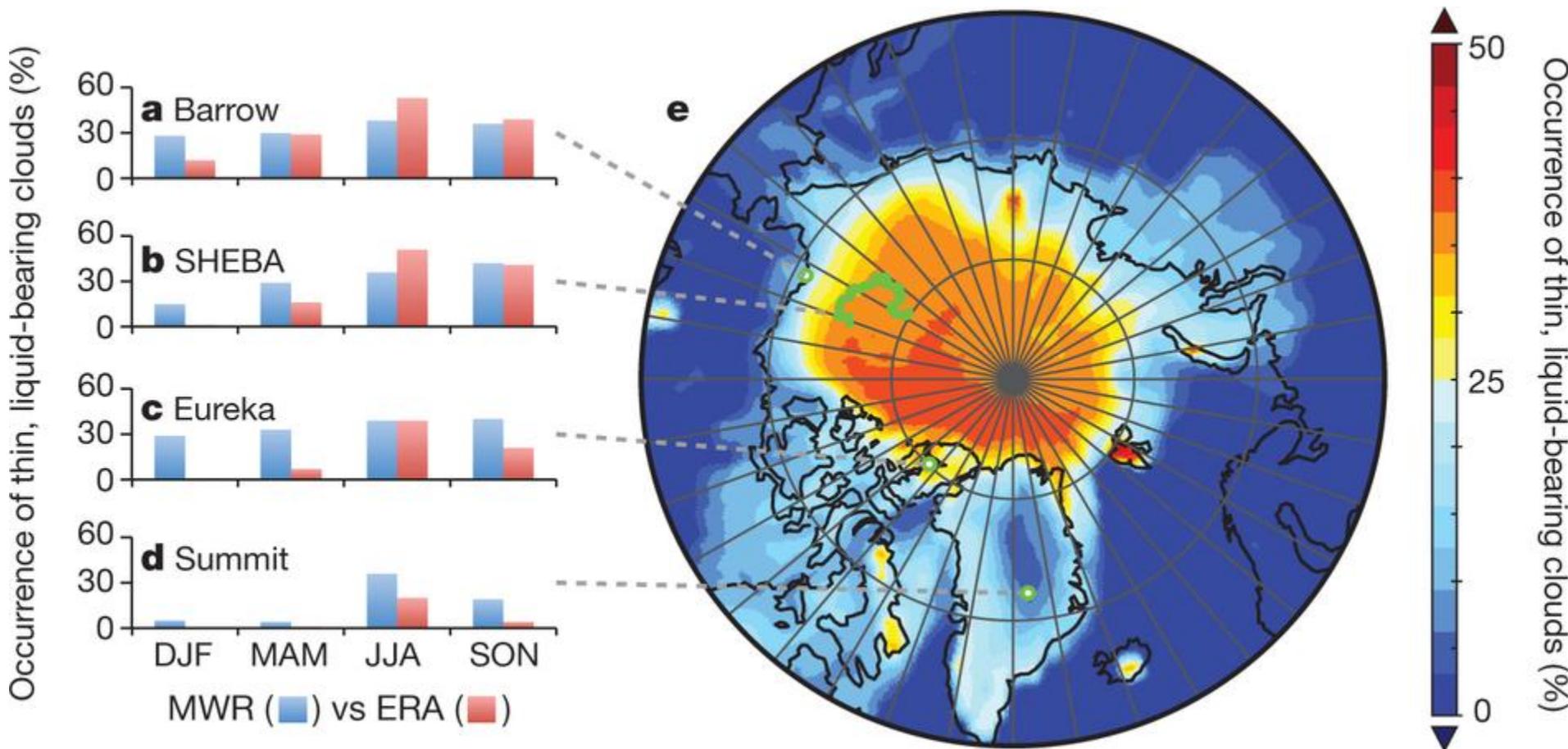
Барроу, Аляска, апрель 2008

# Типичное вертикальное строение



Morrison et al., Nature Geoscience, 2012

# Повторяемость облаков со смешанной фазой



Bennartz et al., Nature, 2013

# Слоисто-кучевые облака нижнего яруса со смешанной фазой в Арктике

---

## Характерные особенности:

- Повторяемость: 40 – 55 %
- Интервал температур: -40 .... 0 °C
- Часто возникают в условиях крупномасштабной адвекции влаги, но не связаны с прохождением фронтов и циклонов
- Толщина: 0.5 – 2 км
- Характерное время жизни: 1 – 10 суток (!!!) - не смотря на сильную неустойчивость (процесс Бержерона-Финдайзена)
- Сильно влияют на энергетический баланс поверхности:
  - Увеличение приходящей длинноволновой радиации
  - Прогрев поверхности, уменьшение устойчивости, потоки скрытого и явного тепла > 0

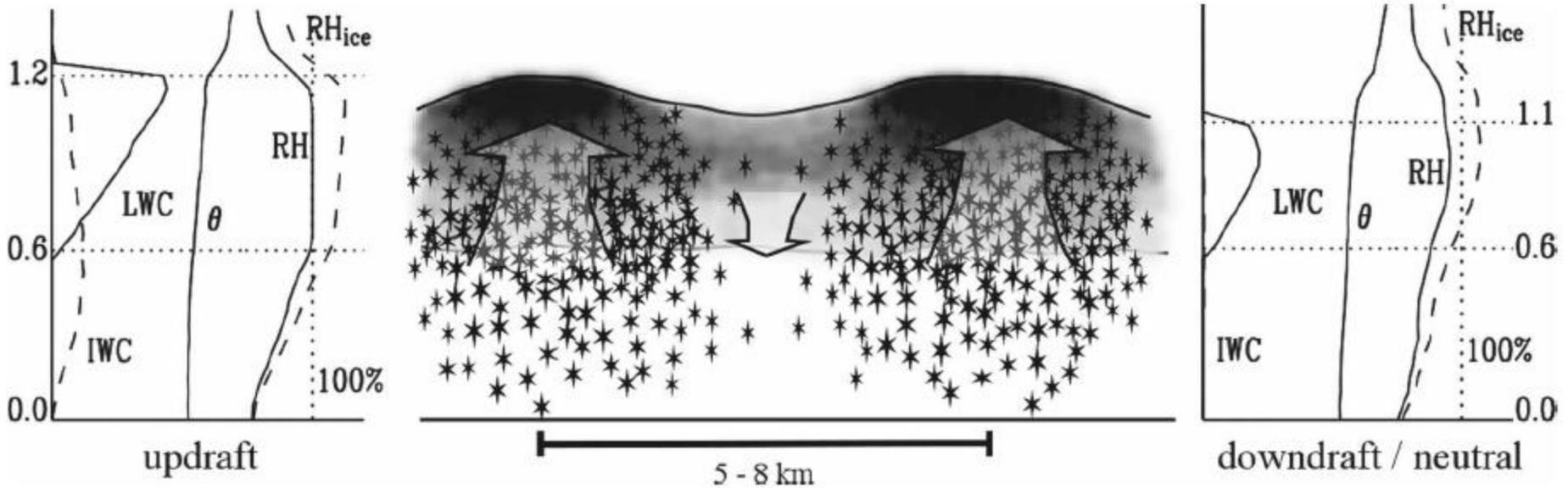
## Проблемы, отмеченные в отчете рабочей группы

---

- The description of liquid water below the freezing temperature (often referred to as super-cooled liquid water ... is often poorly represented in NWP models with parameterizations that are both qualitatively and quantitatively unsatisfactory.
- Hydrometeor phase conversion speed: An analysis of the AR4/CMIP5 models indicated that the speed of phase transition is generally too efficient in climate models and it happens on slower and longer time-scale in reality (persistence of cloud decks).
- The coupling of parameterizations of the planetary boundary layer, the formation of clouds (interacting with aerosols and Clouds Condensation Nuclei and Ice Nuclei, CCN/IN), and the occurrence of convection, is still neither qualitatively nor quantitatively satisfactorily represented in present NWP and Climate models.

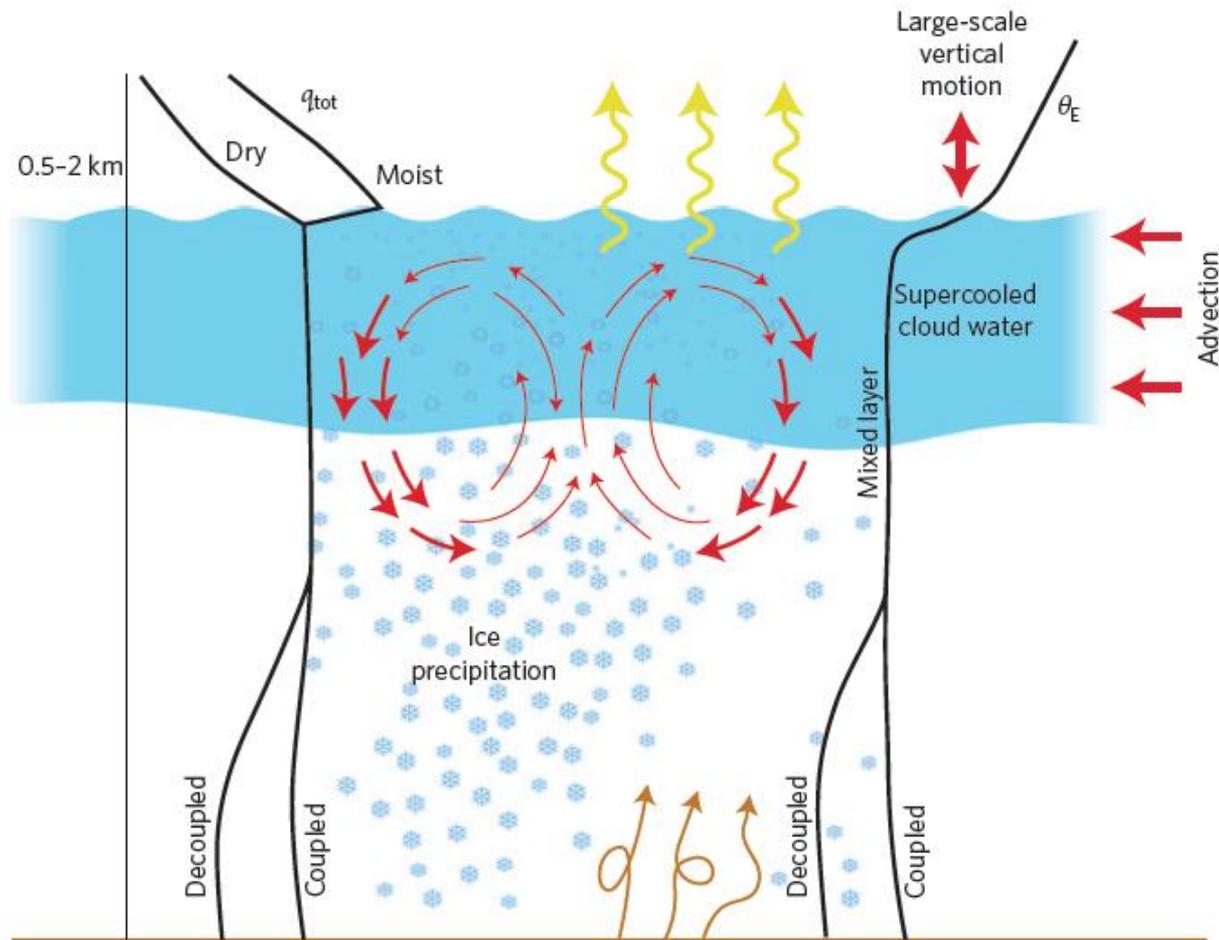
# Почему жидкая фаза не переходит в твердую?

Корреляция между вертикальными движениями и содержанием капель воды и кристаллов льда в облаках



Shupe et al., JAS, 2008

# Источники влаги



Morrison et al., Nature Geoscience, 2012

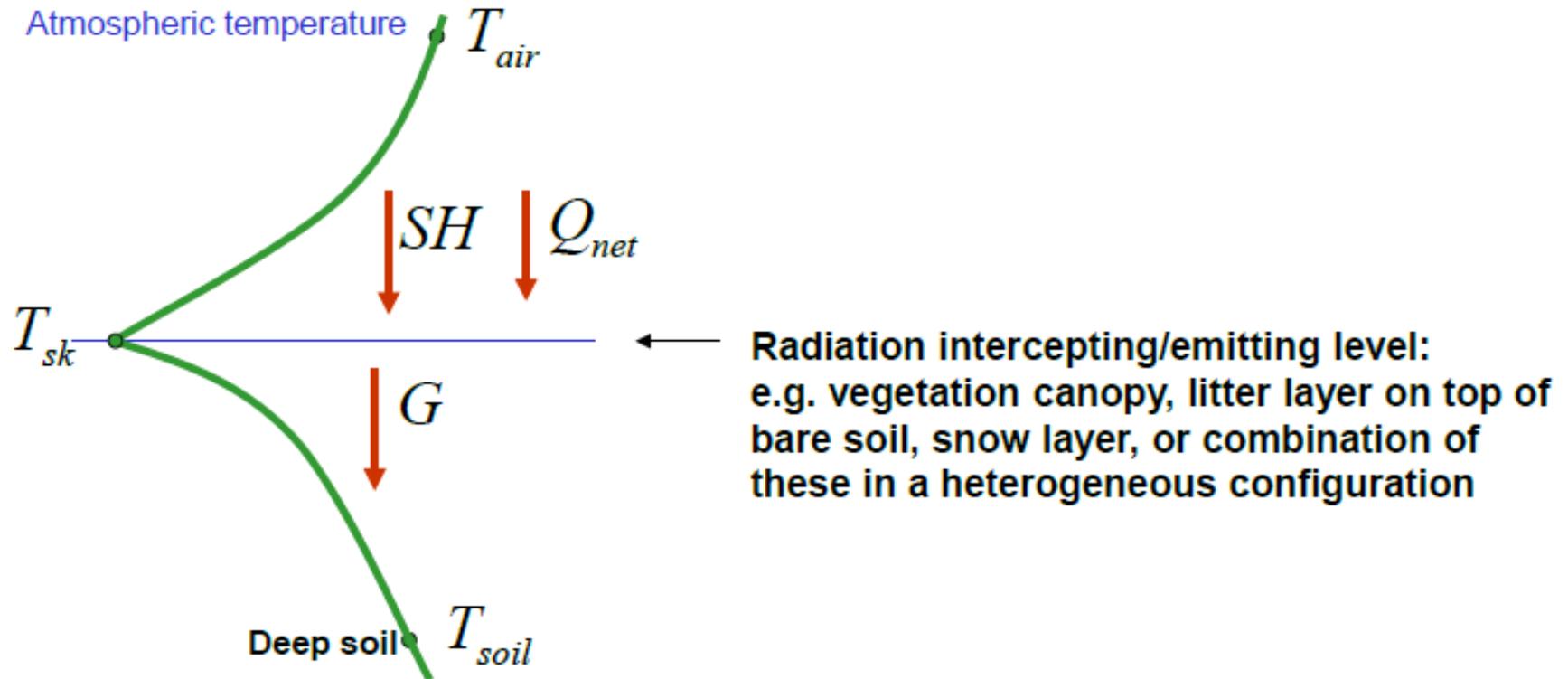
## Рекомендации, содержащиеся в отчете

---

- Evaluate the representation of mixed-phase clouds in NWP and climate models using observational knowledge readily available, as for instance the SHEBA field campaign over sea-ice or ice-sheet based observatories such as Dome-Concordia or South Pole.
- Large Eddy Simulations (LES) linked with sufficiently realistic surface parameterizations are advocated as a way forward for enhanced process understanding. A stronger involvement of large-scale modellers in LES research may be beneficial for ensuring research uptake for the benefit of NWP.
- Substantial research is still needed to understand polar cloud processes.

# Устойчивый пограничный слой

В холодное время года и ночью:



из презентации Белжарса

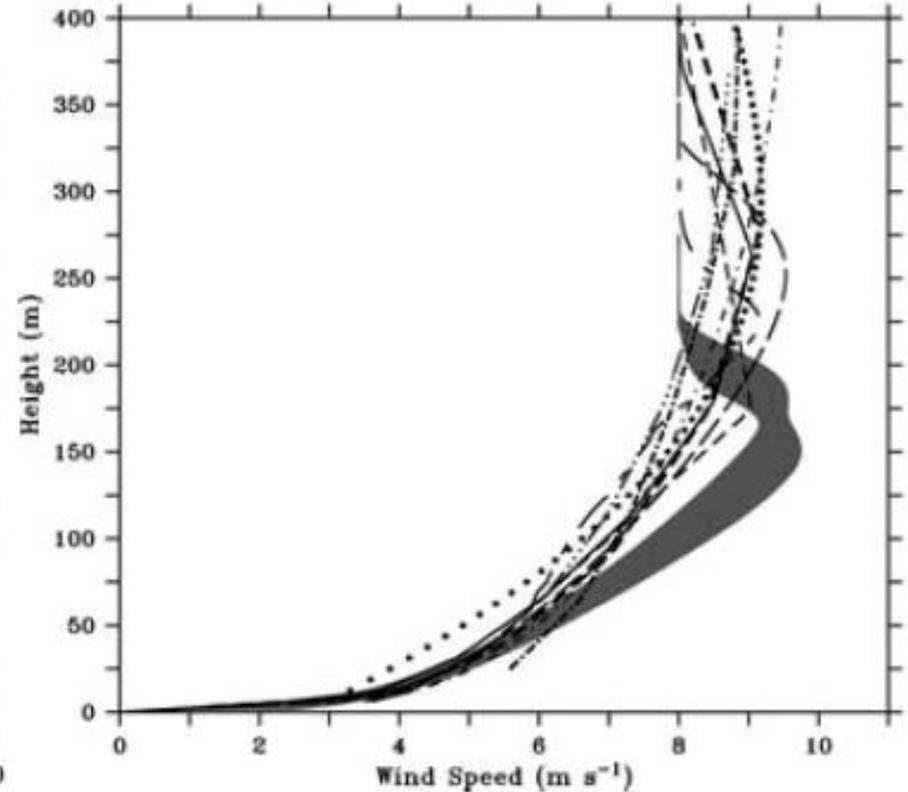
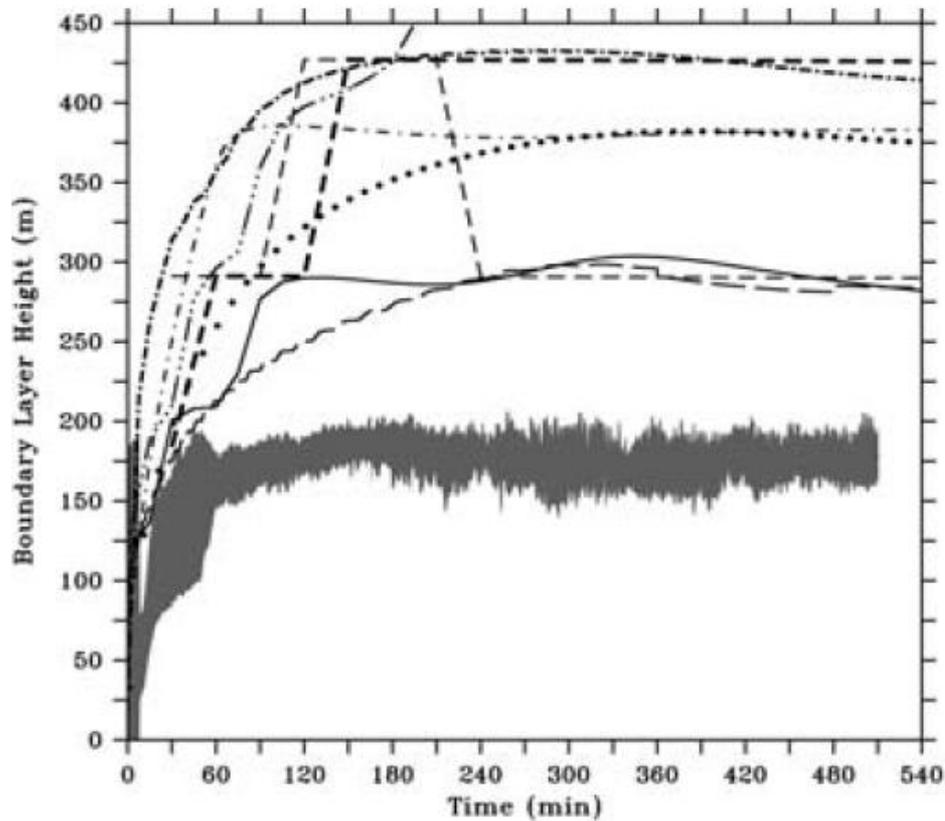
## Проблемы, отмеченные в отчете рабочей группы:

---

The realistic representation of wintertime inversions in a stably stratified atmosphere in NWP models is often limited by the parameterization of atmospheric vertical diffusion and surface coupling. Vertical diffusion is generally too strong but reduces near-surface temperature errors at the expense of realistic vertical moisture, energy and momentum transport.

## Турбулентный обмен в устойчивом пограничном слое

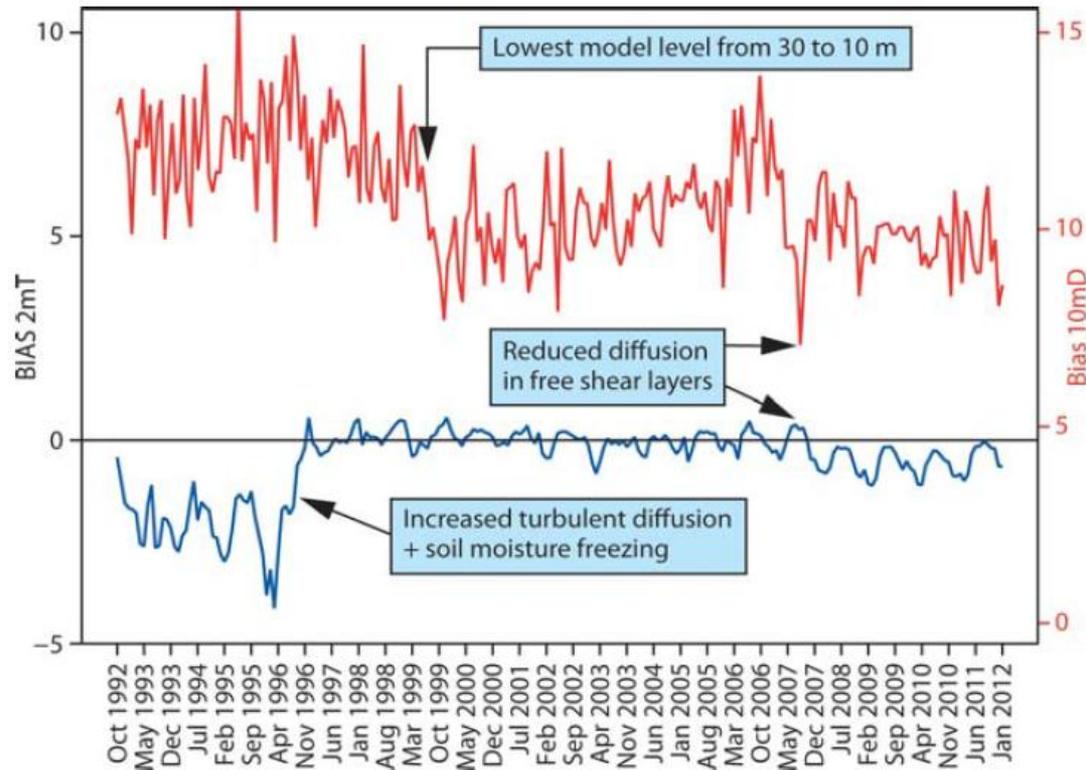
Результаты эксперимента GABLS-1 (Cuxart et al., 2006)



Коэффициенты турбулентного обмена завышены в моделях прогноза погоды – универсальные функции от числа Ричардсона с «длинным хвостом»

## Турбулентный обмен в устойчивом пограничном слое

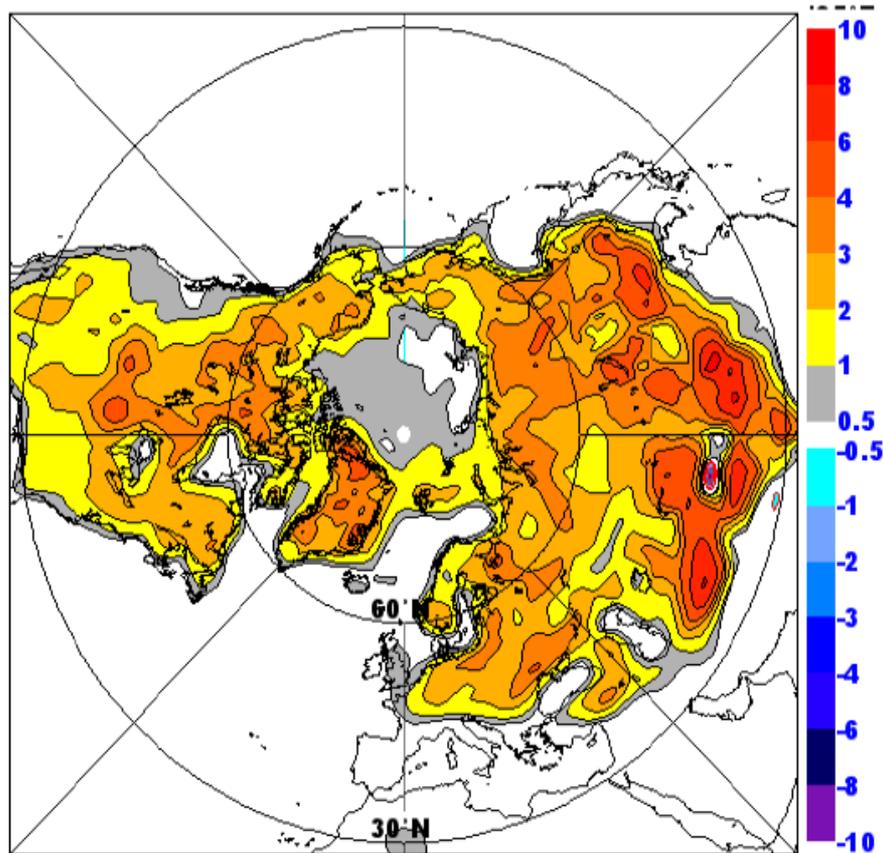
Коэффициент турбулентного обмена в устойчивом пограничном слое очень удобный способ «исправлять» систематические ошибки прогноза (Sandu et al., 2013):



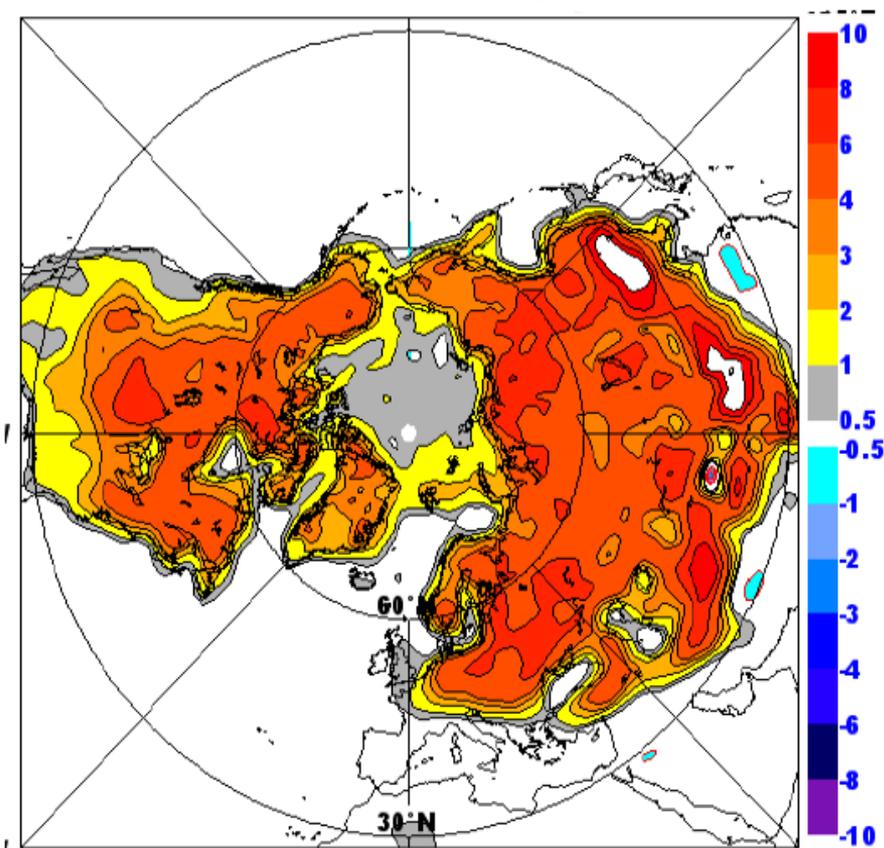
Средняя ошибка оперативной модели ECMW для станций на суше. Синяя кривая – T2m; Красная – направление ветра на 10 м.

## Difference in 2m temperature for January 1996

Revised BL - Control



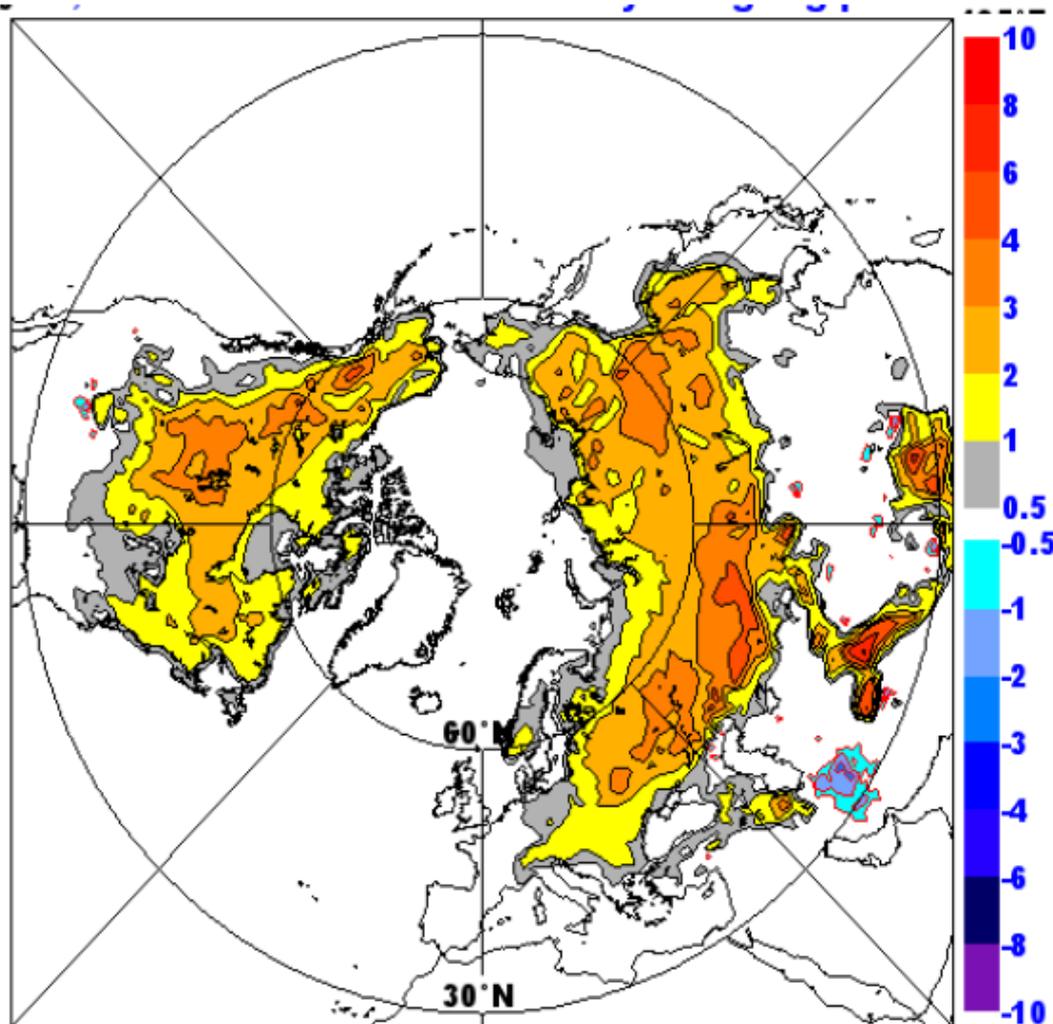
Revised BL & soil freezing - Control



из презентации Белжарса

# Difference in 2m temperature for January 1996

old snow scheme – new snow scheme



The new snow scheme (Dutra et al. 2010) has lower conductivity and therefore the winter temperature drops more over snow.

Insulating snow also increases the model sensitivity to boundary layer diffusion.

из презентации Белжарса

## Рекомендации:

---

- Pursue an integrated approach so that cloud, PBL and surface exchange schemes “work well together” preserving process relationships as diagnosed from observations. We recommend testing with LES. Also implementing parameterizations addressing known issues is proposed (e.g. a prognostic mixed-phase cloud scheme).
- Test and possibly implement a multi-layer snow scheme for NWP applications. It is acknowledged that more physics leads to more variability which may increase RMSE locally but reduce biases.

Проект в рамках GASS	Описание
Polar Clouds Project	Вихреразрешающее моделирование (LES) облаков со смешанной фазой
GABLS-3	LES-моделирование устойчивого бароклинного АПС
Grey Zone Project	Мультимасштабное (в том числе LES) моделирование облачности в когерентном АПС во время холодного вторжения
EUCLIPSE-GCSS Intercomparison	Сравнение LES и одномерных моделей для случая перехода Sc → мелкая конвекция в АПС

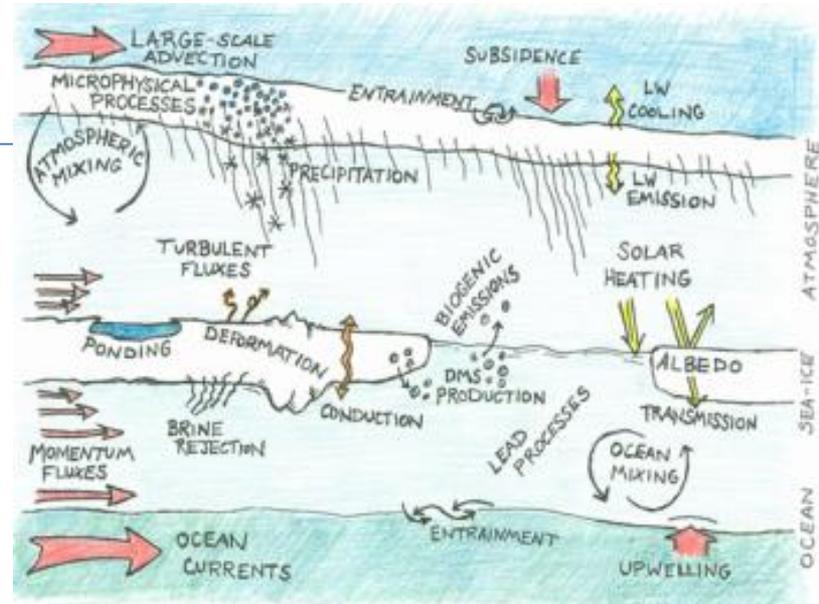
## Наблюдения

### Эксперимент MOSAiC 2017-2018 гг

Суперобсерватория на дрейфующем льду по аналогии с СП

### Создание суперобсерваторий в Арктике:

- NOAA Arctic Atmospheric Observatories (включая Тикси и СП)
- Pan-Eurasian Experiment (PEEX) (идея на счет ББС МГУ)



# Параметризация потоков с неоднородной поверхностью



- проблема применимости теории подобия приземного слоя (горизонтальная неоднородность, изменение потоков по вертикали)
- агрегирование потоков с разных типов подстилающей поверхности внутри ячейки

# Методы агрегирования потоков

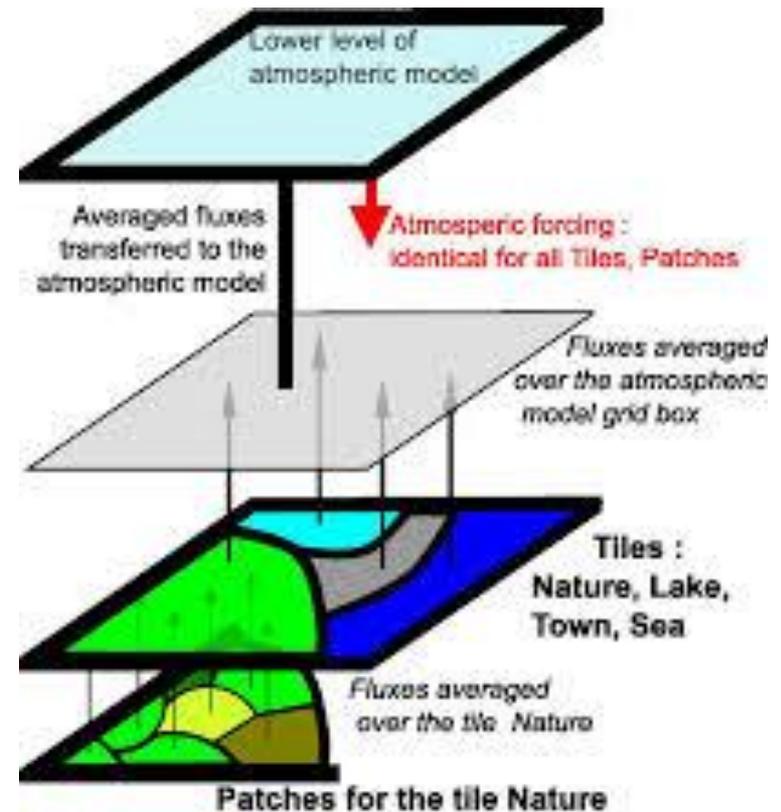
- **Метод эффективных параметров** ( $z_0$ ,  $C_d$ , свойства почвы и другие параметры осредняются внутри ячейки модели – см работы Pielke, Claussen и др., начало 1990-х)

- **Классический мозаичный метод (mosaic, tile approach)** : коэффициенты обмена рассчитываются для каждого типа, потоки с разных типов суммируются с площадными весами; для всех типов атмосферный форсинг считается одинаковым

$$\langle H \rangle = \sum_{i=1}^n \rho c_p f_i C_H^i \langle V_z \rangle (\theta_s^i - \langle \theta_z \rangle)$$



Нижний уровень модели должен быть выше **уровня смешения** (Claussen, 1995), но недостаточно высоко, чтобы теория М-О выполнялась



SURFEX tiling and coupling with an atmospheric model

# Распространение мозаичного подхода по вертикали (Molod et al., 2003; 2004)

Первый уровень современных моделей опустился ниже 20-30 м, так что разрешаются внутренние пограничные слои → необходимость обобщения мозаичного метода

тенденция среднего по ячейке



$$\left(\frac{\partial G_\alpha}{\partial t}\right)_{\text{total}} = \left(\frac{\partial G_\alpha}{\partial t}\right)_{\text{grid}} (G_{\alpha_1}, G_{\alpha_2}, \dots) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial G_\alpha}{\partial t}\right)_{\text{turb}}^n (G_{\alpha_1}, G_{\alpha_2}, \dots, T_{\beta_1}^n, T_{\beta_2}^n, \dots) \times f_n,$$



тенденции, индивидуальные для типов поверхности (турбулентные потоки)



$$\left(\frac{\partial G_\alpha}{\partial t}\right)_{\text{turb}}^n \propto \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'g'_\alpha})^n$$

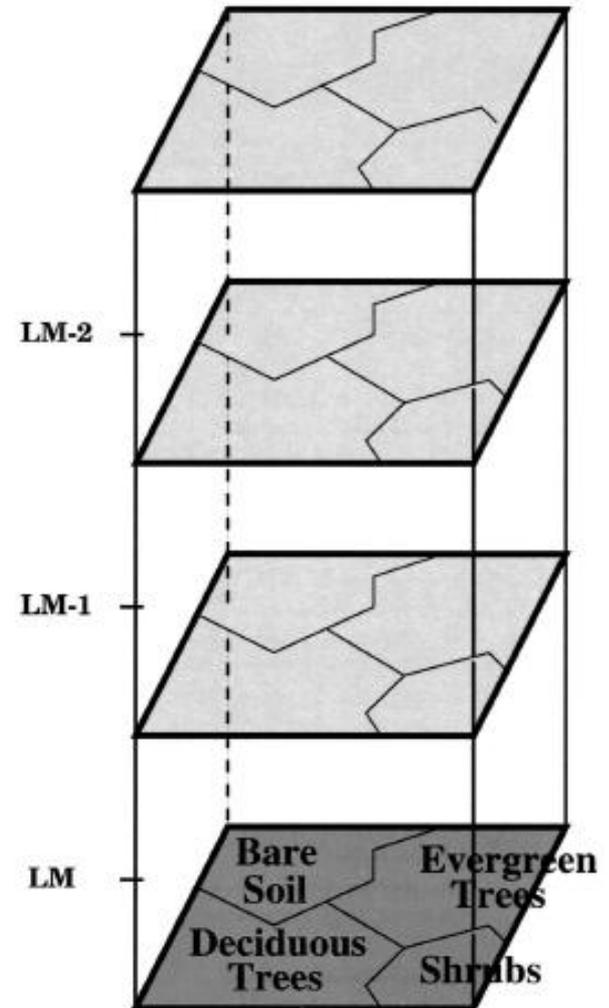


FIG. 1. Schematic of the extended mosaic technique. The vertical axis indicates the GCM model levels, where LM is the lowest level and the level number increases as we ascend in the column.

тенденции определяемые только на масштабе ячейки (градиент давления, радиация и т.д.)

# Обобщение мозаичного метода Аролы (Arola, 1999) (1)

- случай неоднородностей поверхности более 10 км (высота смешения выше нижнего модельного уровня)

оценка масштабов  
на уровне смешения

интерполяция метеовеличин  
на нижний модельный уровень

$$u_*^i = \frac{\langle U_{I_b} \rangle k}{\left[ \ln \left( \frac{I_b}{Z_{0M}^i} \right) - \psi_M \left( \frac{I_b}{L^i} \right) \right]},$$

$$\theta_*^i = \frac{(\langle \theta_{I_b} \rangle - \theta_s^i) k}{\left[ \ln \left( \frac{I_b}{Z_{0H}^i} \right) - \psi_H \left( \frac{I_b}{L^i} \right) \right]},$$

$$q_*^i = \frac{(\langle q_{I_b} \rangle - q_s^i) k}{\left[ \ln \left( \frac{I_b}{Z_{0H}^i} \right) - \psi_H \left( \frac{I_b}{L^i} \right) \right]},$$

$$U_z^i = \frac{u_*^i}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{Z_{0M}^i} \right) - \psi_M \left( \frac{z}{L^i} \right) \right],$$

$$\theta_z^i = \theta_s^i + \frac{\theta_*^i}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{Z_{0H}^i} \right) - \psi_H \left( \frac{z}{L^i} \right) \right],$$

$$q_z^i = q_s^i + \frac{q_*^i}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{Z_{0H}^i} \right) - \psi_H \left( \frac{z}{L^i} \right) \right].$$

«перемешивание профилей»

$$U_z^{i,new} = g_U U_z^i + (1 - g_U) \langle U_z \rangle,$$

$$\theta_z^{i,new} = g_\theta \theta_z^i + (1 - g_\theta) \langle \theta_z \rangle,$$

$$q_z^{i,new} = g_q q_z^i + (1 - g_q) \langle q_z \rangle,$$



расчет потоком  
над каждым типом и  
мозаичное агрегирование

# Обобщение мозаичного метода Аролы (Arola, 1999) (2)

- случай неоднородностей поверхности менее 10 км (высота смешения ниже нижнего модельного уровня)

оценка масштабов

на нижнем модельном уровне

$$u_* = \frac{\langle U_z \rangle k}{\left[ \ln\left(\frac{z}{z_{0M}}\right) - \psi_M\left(\frac{z}{L}\right) \right]},$$

$$\theta_* = \frac{(\langle \theta_z \rangle - \theta_s) k}{\left[ \ln\left(\frac{z}{z_{0H}}\right) - \psi_H\left(\frac{z}{L}\right) \right]},$$

$$q_* = \frac{(\langle q_z \rangle - q_s) k}{\left[ \ln\left(\frac{z}{z_{0H}}\right) - \psi_H\left(\frac{z}{L}\right) \right]}.$$

интерполяция метеовеличин  
на уровень смешения

$$U_{I_b} = \frac{u_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{I_b}{z_{0M}}\right) - \psi_M\left(\frac{I_b}{L}\right) \right],$$

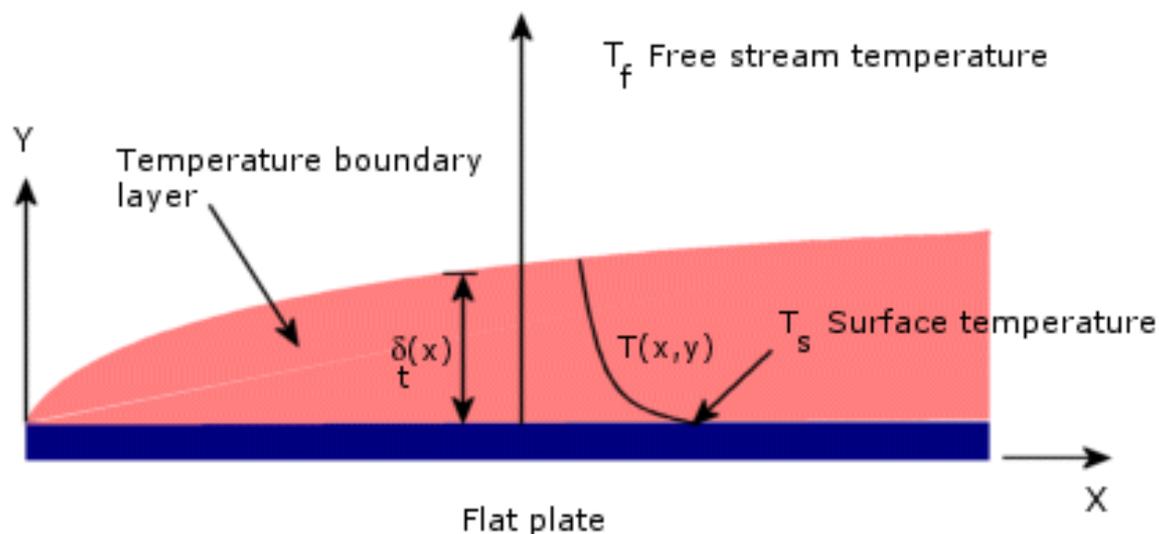
$$\theta_{I_b} = \theta_s + \frac{\theta_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{I_b}{z_{0H}}\right) - \psi_H\left(\frac{I_b}{L}\right) \right],$$

$$q_{I_b} = q_s + \frac{q_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{I_b}{z_{0H}}\right) - \psi_H\left(\frac{I_b}{L}\right) \right].$$

расчет потоков  
с разных  
типов поверхности  
для уровня  
смешения,  
агрегирование потоков

# Применимы ли эти параметризации для Арктики?

- Конвективный пограничный слой



- отсутствует высота смешения, для которой выполнялась бы теория подобия
- потоки по высоте внутри КПС меняются линейно

# Коэффициент трения о неоднородную поверхность льда

- Простые эмпирические связи с концентрацией льда (Andreas et al., 2010)

$$10^3 C_{dn10} = 1.500 + 2.233 A - 2.233 A^2$$

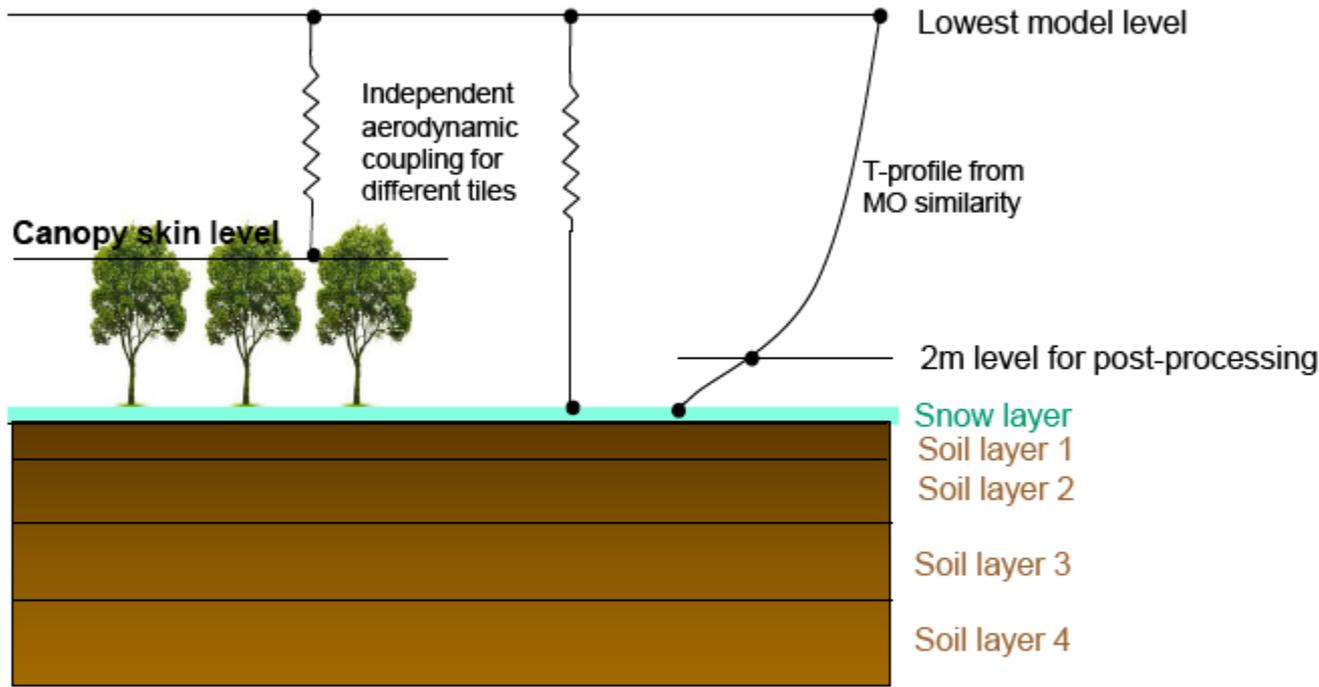
- Разделение трения на касательное трение и трение формы (Luerkes and Birnbaum, 2005; Luerkes et al., 2012)

$$C_{dn10} = (1 - A) C_{d,w} + A C_{d,i} + C_{d,f} .$$

- Рассматривается только нейтральная стратификация
- Изменение коэффициента трения в маргинальной зоне мало по сравнению с фоновыми условиями, но может быть локально важно для моделей дрейфа льда

# Пример эффекта нарушения горизонтальной однородности (Beljaars et al.)

The two relevant tiles are:  
(i) tile with snow under vegetation and (ii) tile with exposed snow



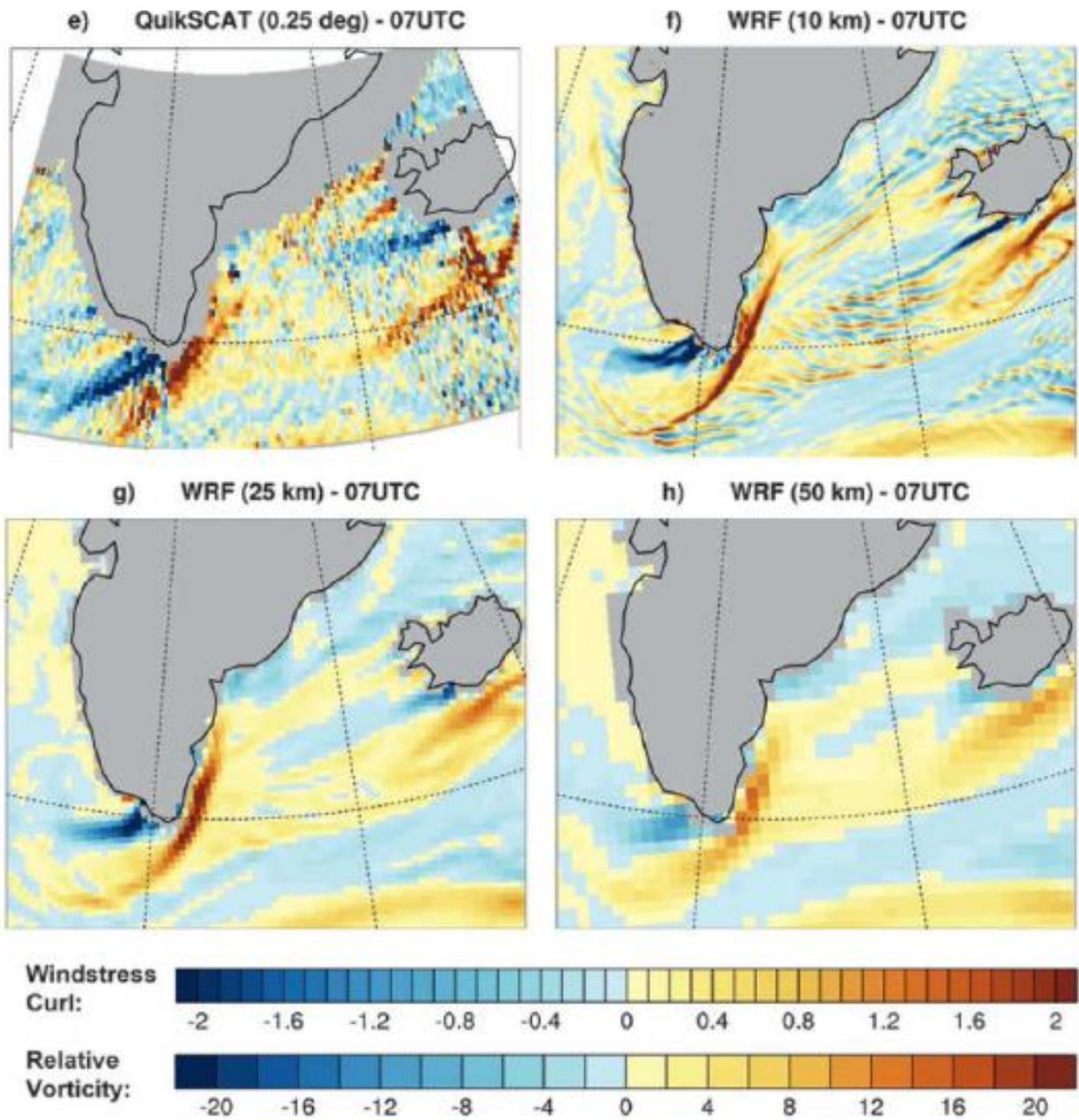
Even if the forest is dominant, the vertical interpolation to the 2m level is done for the exposed snow tile (SYNOP stations are always in a clearing).

During day time, the forest heats the atmosphere. At sunset the exposed snow tile becomes very stable cutting off turbulent exchange. Therefore snow temperature and T2 drop too much. In reality forest generated turbulence will maintain turbulent exchange over the clearing and prevent extreme cooling.

# Мезомасштабные процессы в высоких широтах

- Фены (бора), барьерные эффекты, «мысовые» струи (tip jets), щелевые ветры, полярные мезоциклоны
- с ними связаны наиболее экстремальные погодные условия
- чувствительность модельных циркуляций к разрешению
- роль параметризации обмена с поверхностью

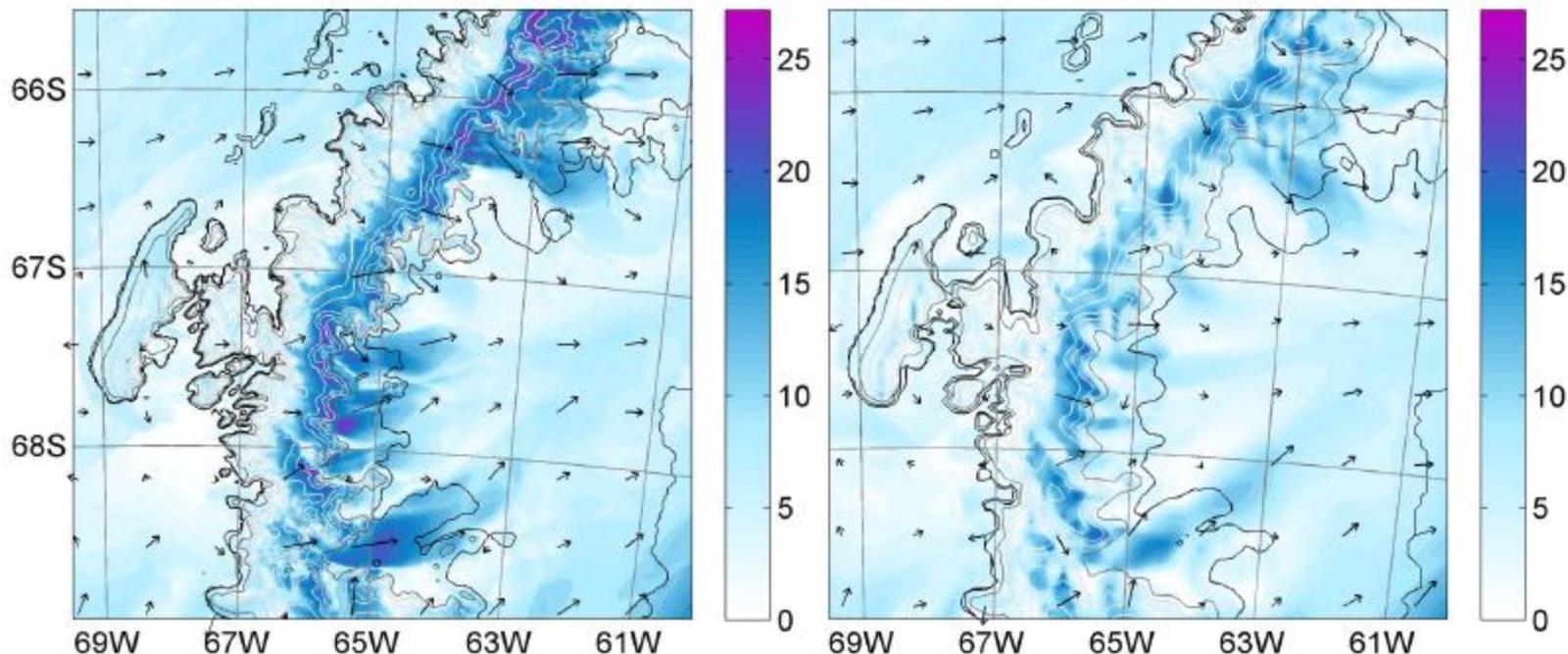
From Renfrew,  
ECMWF-WWRP  
/ThorpeX Polar  
Prediction  
Workshop –  
24-27 June 2013



From: DuVivier and Cassano, 2013, Mon Wea Rev, "Evaluation of WRF Model Resolution on Simulated Mesoscale Winds and Surface Fluxes near Greenland"

# Ледовый шельф Ларсена (Renfrew)

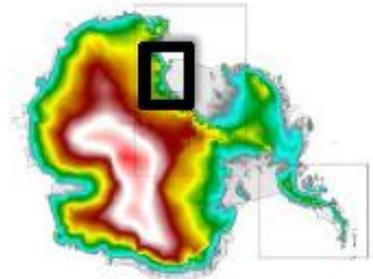
MetUM 1.5 km versus 4 km – 5 Feb 2011



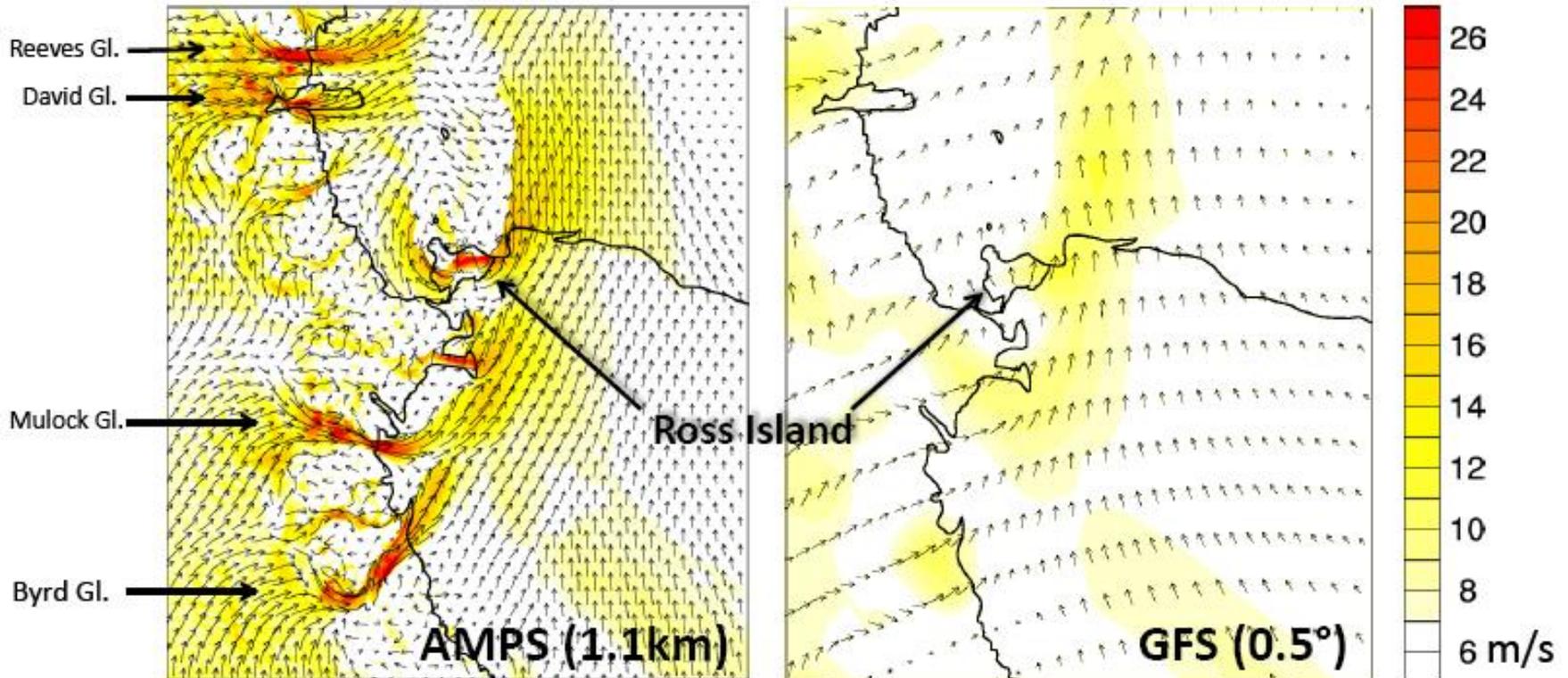
- 1.5 km grid size (76L) is required to simulate these polar foehn jets (gap flows).
- In addition surface exchange and BL parameterization is vital.

# Polar WRF, Bromwich et al.

## Benefits of high resolution Example in the McMurdo region



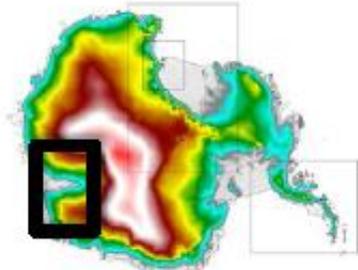
12h forecast of 10m wind field for 12UTC 17 June 2013



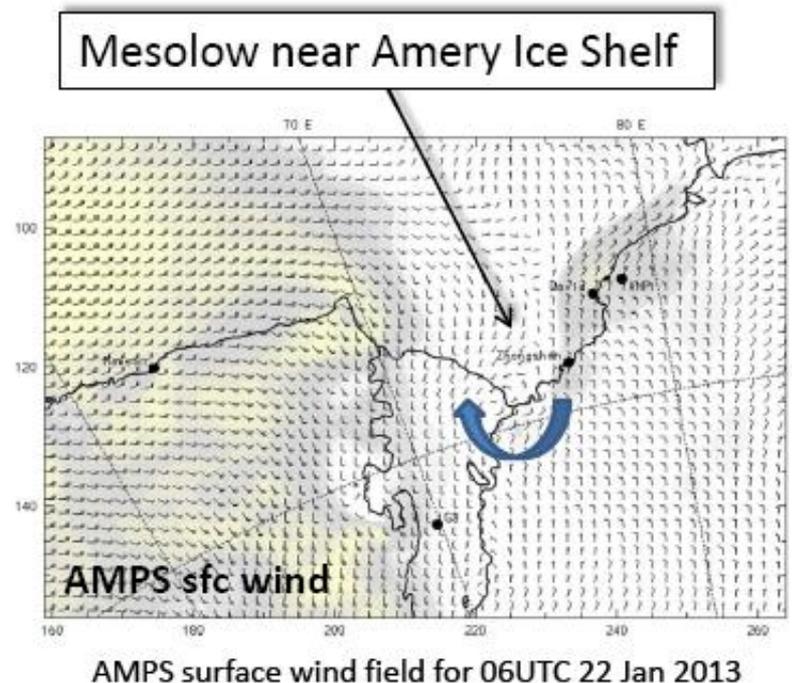
# Polar WRF, Bromwich et al.

## Benefits of high resolution

Example with the Prydz Bay Mesolow



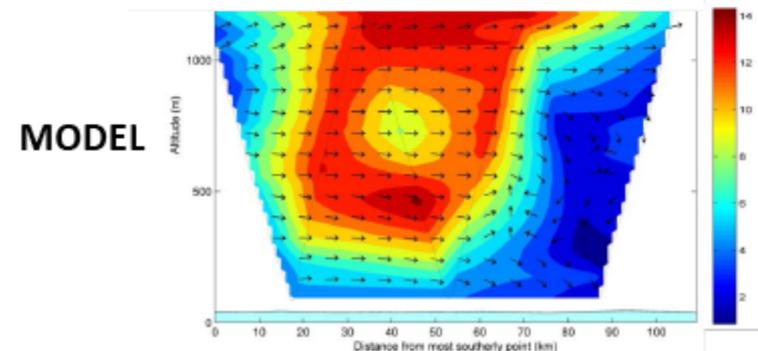
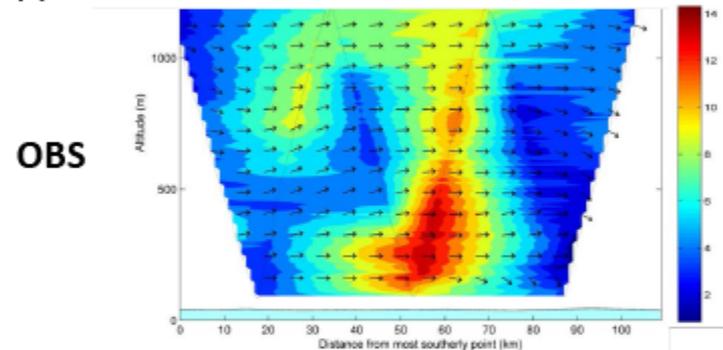
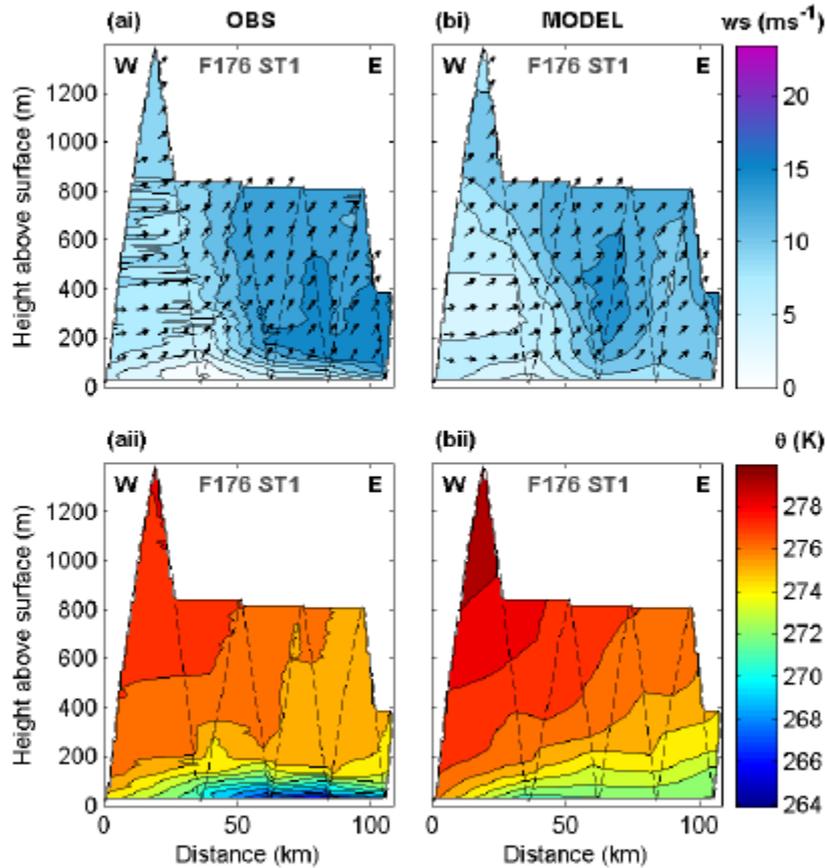
- Common occurrence during summer forecasting season, and throughout the year
- Brings low cloud and precipitation affecting aviation operations
- Shallow, transient, mesoscale feature
- Successfully forecast by AMPS, not the global forecast models



# Ледовый шельф Ларсена – продолжение (Renfrew)

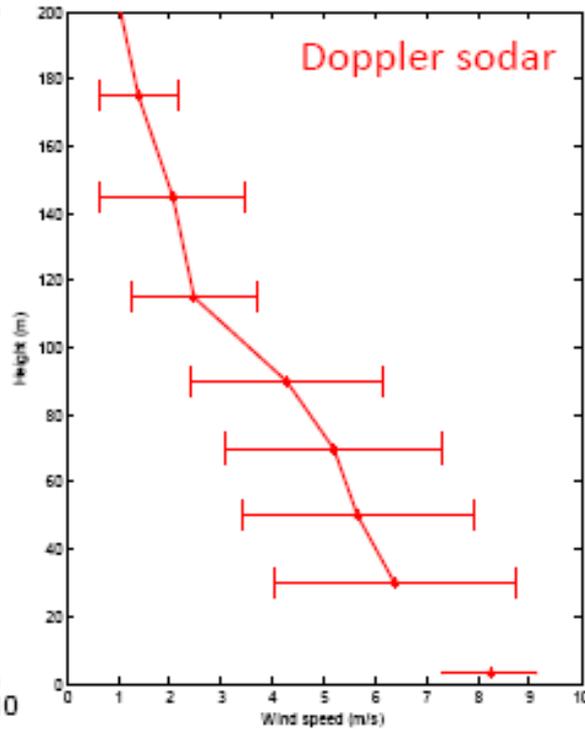
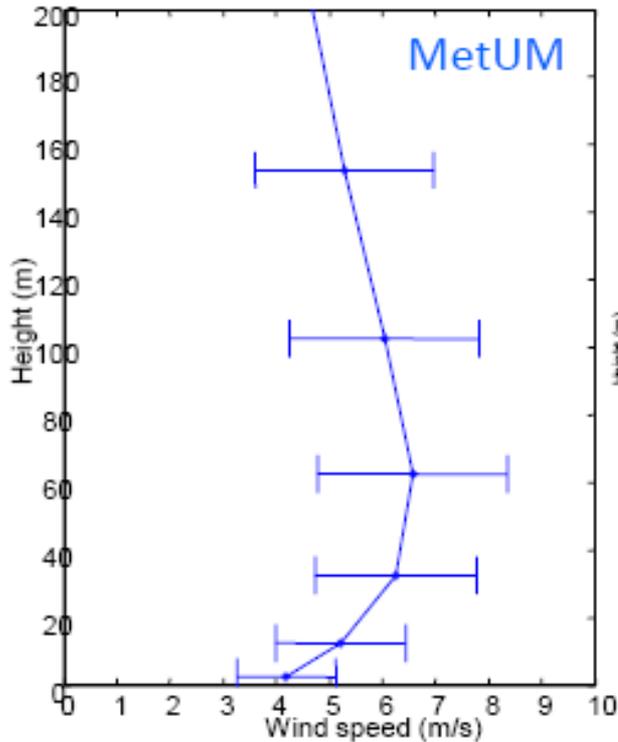
## Observations versus model

- **Left: along jet** - shows warm föhn air reaching ice shelf with cold boundary layer to the east
- **Below: across jet wind speed** - shows model captures jet magnitude and approximate structure



Met Office UM simulations at 1.5 km are able to capture most aspects of observed jet structure

# Катабатический ветер (Антарктида)



Nighttime comparison from  
summer-time case study –  
February 2002

MetUM at 4 km and 70L

From Renfrew,  
ECMWF-WWRP  
/ThorpeX Polar  
Prediction  
Workshop –  
24-27 June 2013

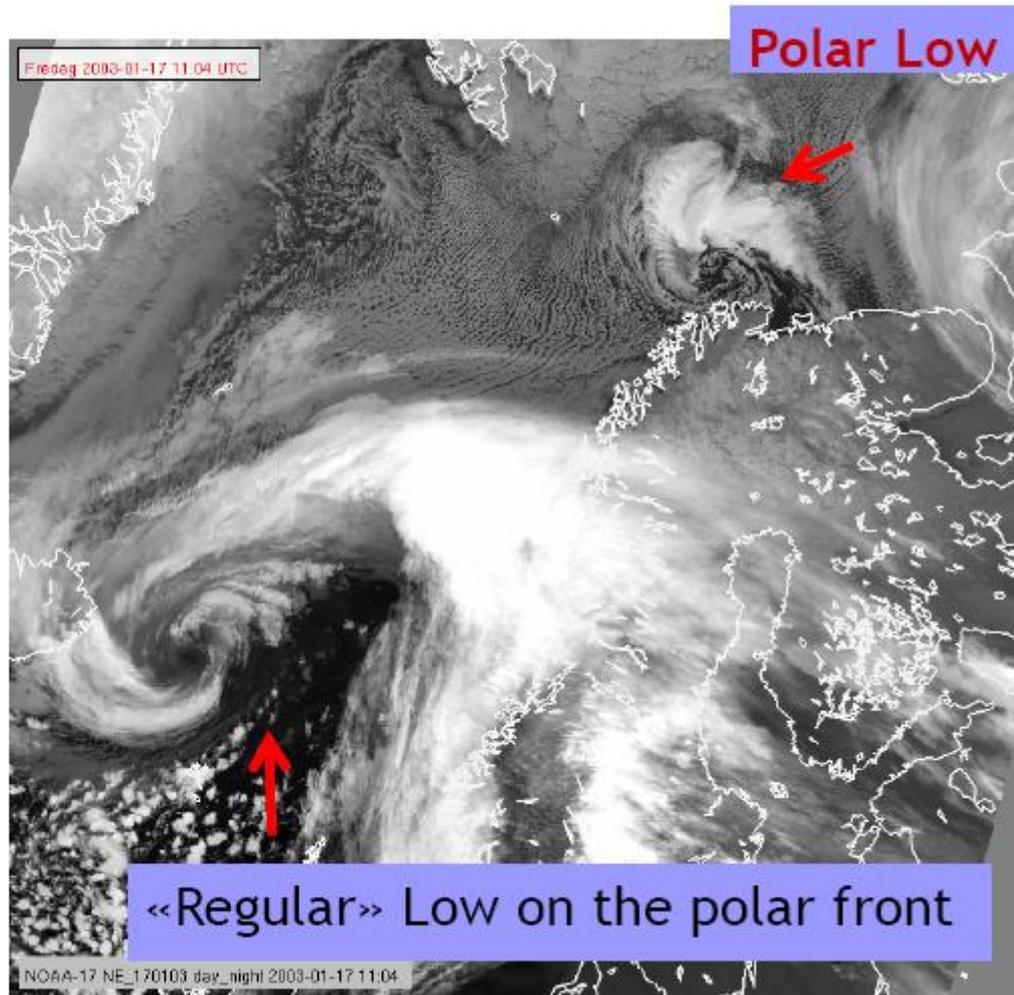
# Заключения по барьерным, «мысовым» (tip flows), и кatabатическим течениям (Renfrew)

- Synoptic situation and orography controls the jets location, timing and magnitude
  - As predictable as synoptic-scale flow
  - e.g. Barrier effect doubles peak wind speeds
- Resolution: ~10 km and 40-76 L seems necessary
  - MetUM simulations good (12 km & 76 L; 4 km for Katabatic)
  - WRF simulations good at 10 km, but 25 & 50 km grid size don't capture gradients
  - ERAI representation (80 km) ok for climatology, but similar concerns about diffuse gradients
- Parameterizations
  - Sea-ice & SST fields and surface exchange vital
  - What can be done to capture sharp vertical gradients?
  - Poor representation of katabatic flows in vertical (SBL parameterization problems?)

# Интенсивные полярные мезоциклоны (polar lows, from Iversen, ECMWF)

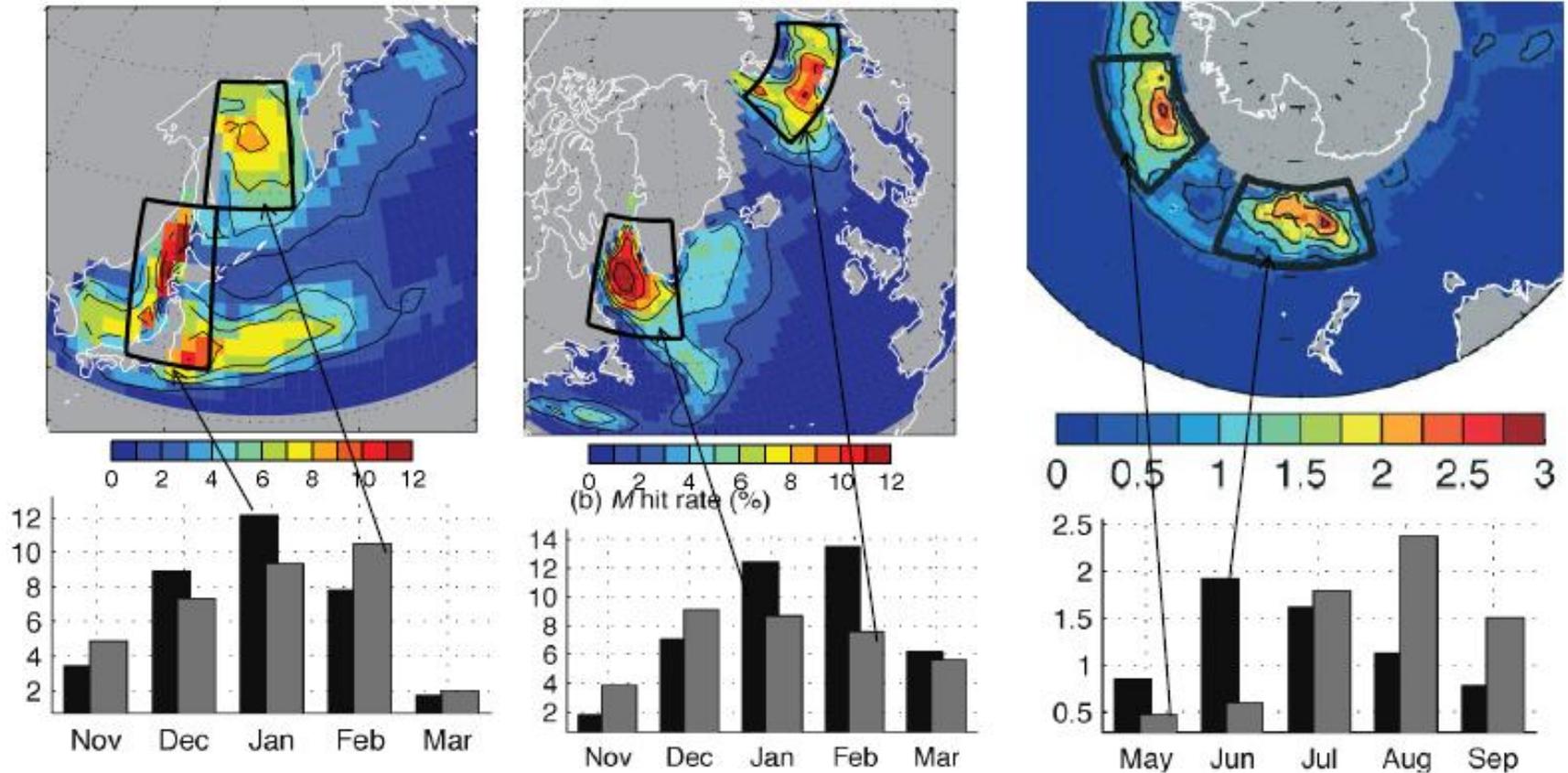
## The polar low:

- A small-scale, rapidly developing and fairly intense cyclone over ice-free ocean
- October - May
- Rapidly changing weather
- Gale or storm force winds
- Severe snow intensity



# MCAO ( $M > 3.4$ )-Hit Rate 1989-2010, ERA Interim

$$M = \frac{L}{Z} (\ln \theta_S - \ln \theta_{700}) \quad L = 7 \times 10^5 \text{ m}$$



**Additional requirements are needed for PLs to actually occur:**

**E.g.: upper-level PV anomaly:  $p_{2pvu} > 470$  hPa**

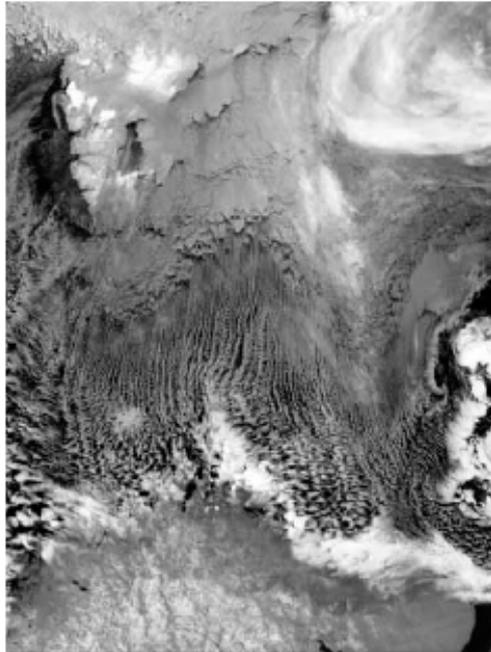


Figure 1 - NOAA 17 - 09:14 UT on December 21, 2003

## Factors Limiting the Predictability of Polar Lows

### Trigger mechanisms:

- Initial analysis of polar
  - Low-level baroclinic zones (e.g. «old occlusions»)
  - upper-level PV anomalies
- Resolution of sharp surface contrasts
  - SST, sea-ice, topography
- Resolution of associated ABL features:
  - low-level fronts and jets

### Growth mechanisms:

- Vertical fluxes in unstable, windy marine ABL
- deep convective cloud parameterizations
  - vertical profile of released latent heat
- Mixing processes in upper ocean:
  - SST-feedbacks
- Baroclinicity and APE-release

IPY-Thorpex - Rømskog 14-16. Januar 2009

# Weather forecasters' awareness

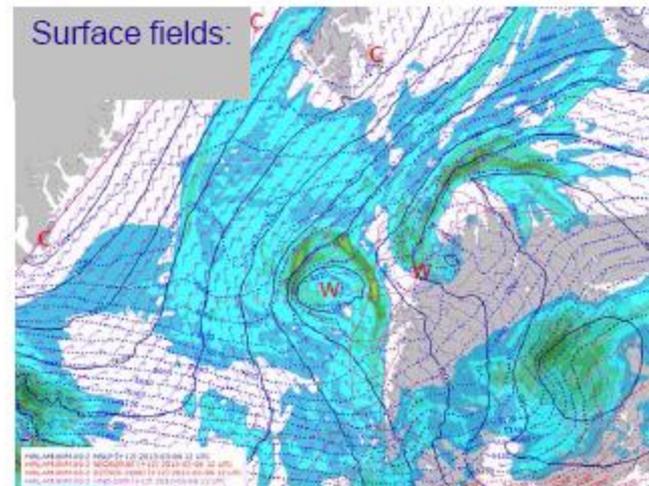
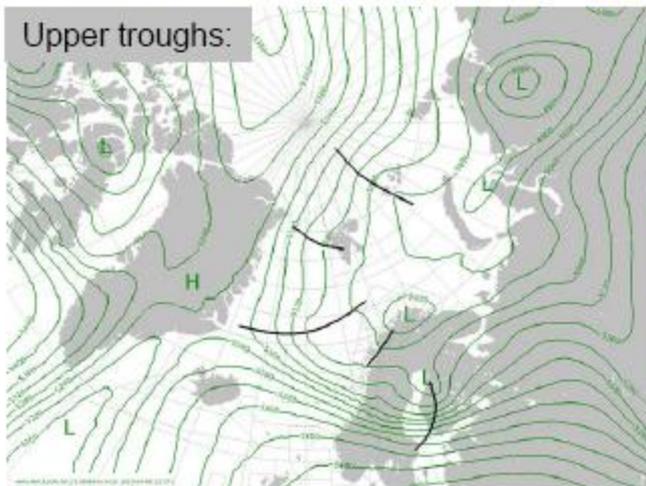
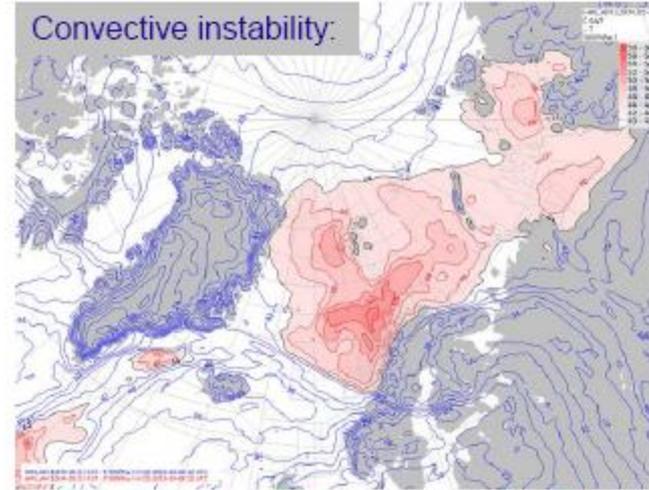
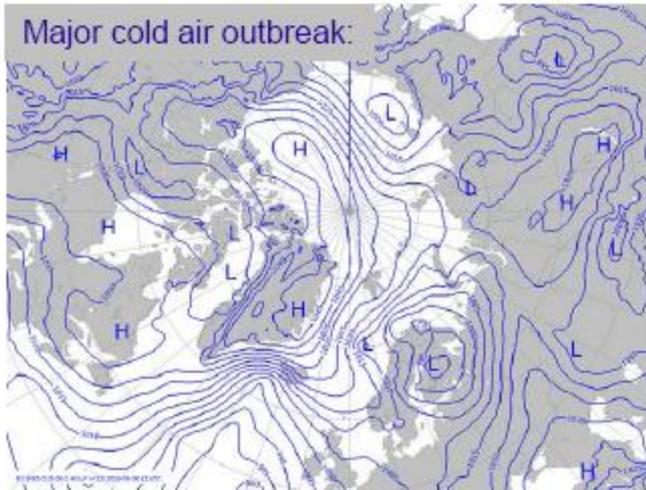
- **MCAO: Major Cold Air Outbreak:**
- **$SST - T(500\text{hPa}) > 43\text{ }^\circ\text{C}$**
- **Potential Vorticity  $> 2\text{ PVU}$**
- **Trough at 500 hPa**

Areas with high potential  
for PL development

## Aided by:

- **Satellite images**
- (High-res.) **model forecasts**
  - Experience: often not reliable

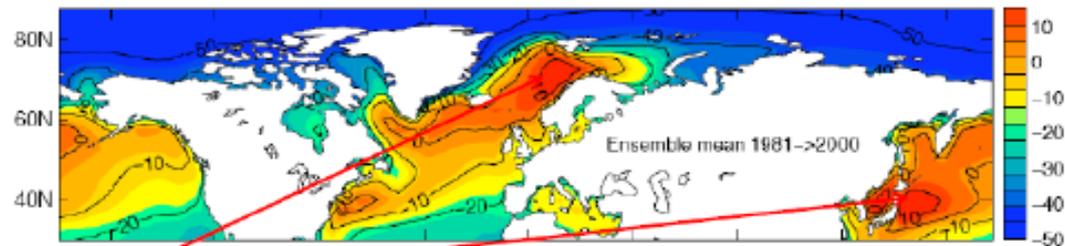
# Используемые для анализа возможности возникновения РЛ результаты моделей



Kolstad and Bracegirdle, 2007, Clim Dyn:

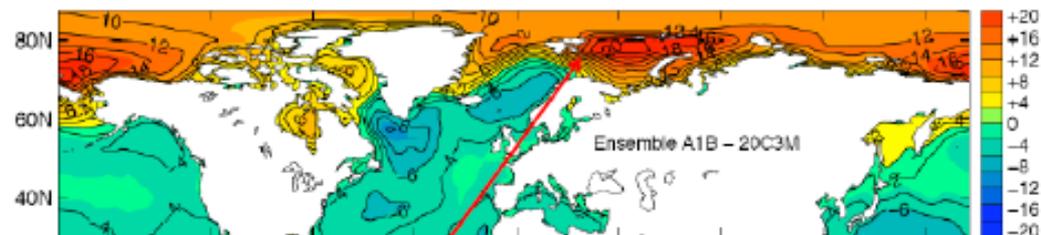
## Marine cold-air outbreaks in the future: an assessment of IPCC AR4 models

Where do we find polar lows today?



Red: Marine cold air outbreaks => polar lows

### Polar Lows in the Future



Blue: Fewer polar lows than now

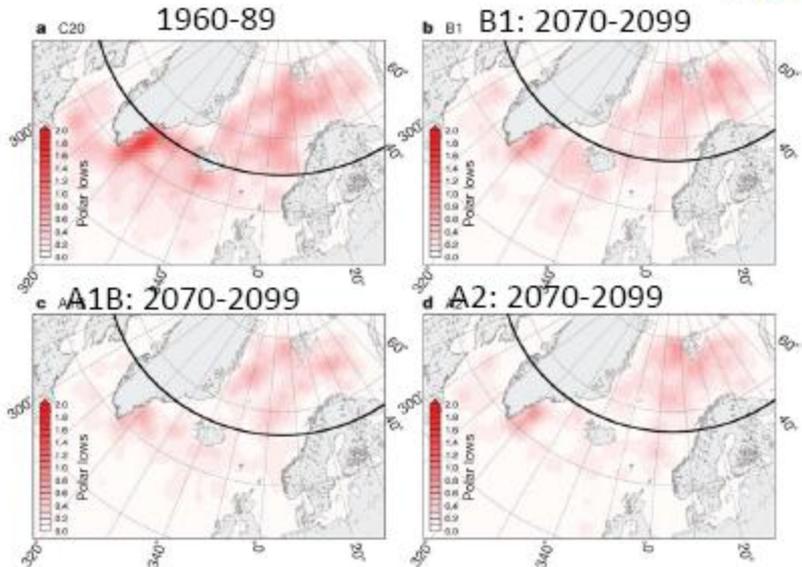
Red: More numerous polar lows than now

Note increase in the Barents Sea

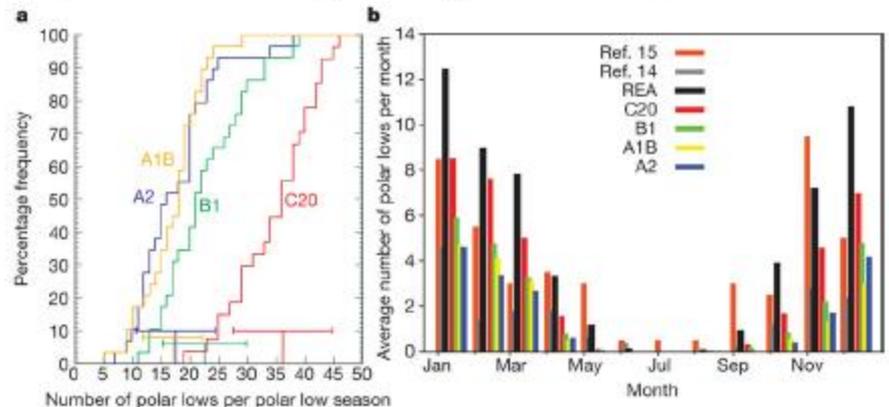
# Downscaled IPCC AR4 projections

M Zahn & H von Storch, 2010

Nature 467, 309-312 (2010) doi: 10.1038/nature09388



Projected  
Polar low density distribution.

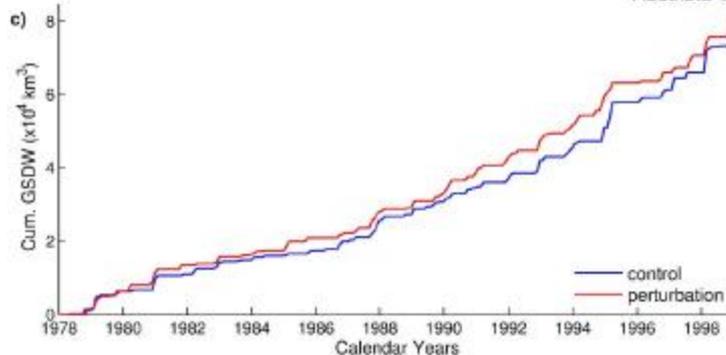
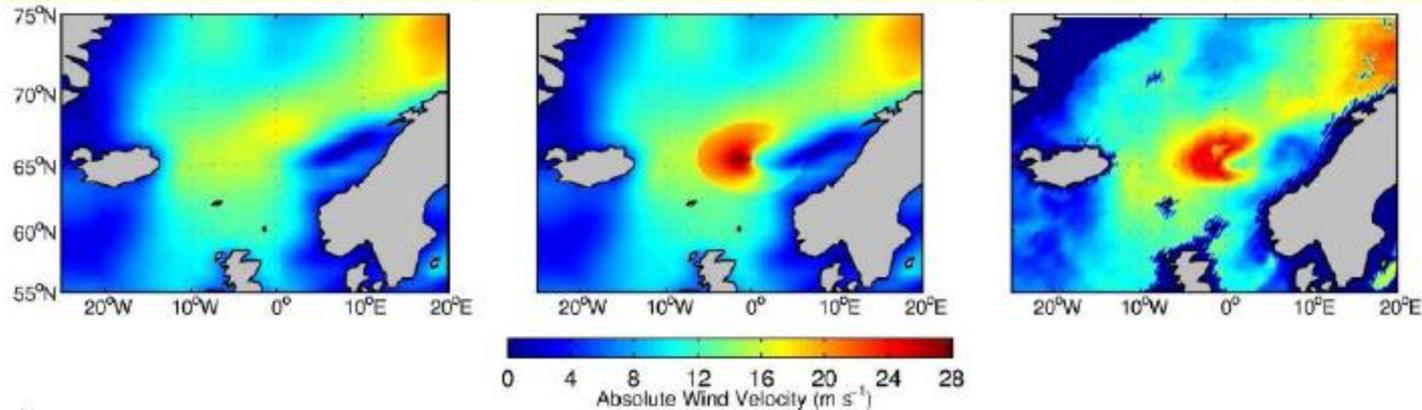


Number of polar lows per polar low season and the seasonal cycle.

**Condrón & Renfrew (2012), *Nature Geoscience***

## 'Missing' polar lows enhance deep-water formation in the Nordic Seas

**a)** Standard ERA-40 data; **b)** ERA-40 + PL parameterized; **c)** satellite data (SSM/I)



The cumulative volume of GSDW formed in the Control (blue) and Perturbation (red) experiments. The total production of Greenland Sea Deep Water increases by  $4.1 \times 10^3 \text{ km}^3$  (5.3 %) in the experiment with parameterized PL.

**Can missing PL-driven ocean mixing also influence the seasonal forecast quality?**

# Заключение по предсказуемости PL

- Почему некоторые PL предсказываются хорошо, другие – плохо? – диагностика механизмов в плохо предсказанных PL
- Чего не хватает для успешного прогноза? спутниковых и наземных наблюдений, методов оценки неопределенности начального состояния и параметров модели (ансамбли прогнозов), высокого пространственного разрешения (нужно ли разрешать отдельные облака?), адекватной параметризации конвекции, обратной связи с температурой поверхности, деталей распределения льда



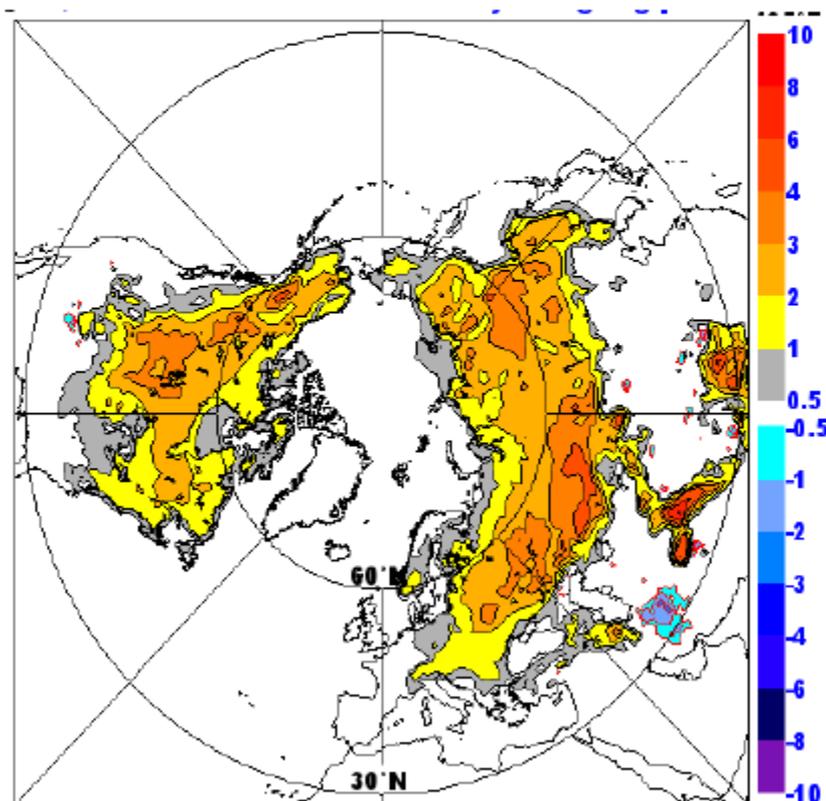
**Спасибо за внимание!**

# Влияние новой модели снежного покрова на приземную температуру (Beljaars et al.)

Difference in 2m temperature for January 1996

From long “relaxation” integrations starting 1 Oct 1995

old snow scheme – new snow scheme



The new snow scheme (Dutra et al. 2010) has lower conductivity and therefore the winter temperature drops more over snow.

Insulating snow also increases the model sensitivity to boundary layer diffusion.