



Мезомасштабное моделирование холодных вторжений в Арктике

Чечин Д.Г.

Научный руководитель
д.ф.-м. н. Репина И.А.

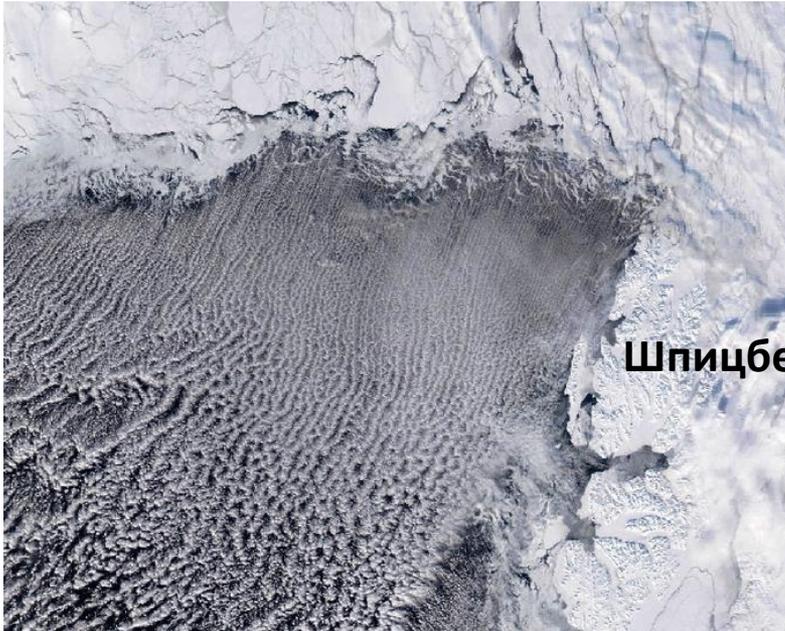
**НАУЧНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР**
Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова

6 декабря 2012 г

План

1. Обзор современного состояния исследований и постановка задач
2. Метод исследования:
 - 2.1. Негидростатическая модель NH3D
 - 2.2. Интегральная модель конвективного АПС
 - 2.3. Методика экспериментов
3. Верификация модели NH3D – моделирование холодного вторжения в проливе Фрама 4 марта 1993
4. Струйное течение ледового бриза:
 - 4.1. Некоторые аспекты физического механизма СТЛБ
 - 4.2. Чувствительность характеристик СТЛБ к внешним параметрам
5. Влияние пространственного разрешения на воспроизведение СТЛБ и энергообмен атмосферы и океана во время ХВ
6. Моделирование натекания холодного воздуха на полынью

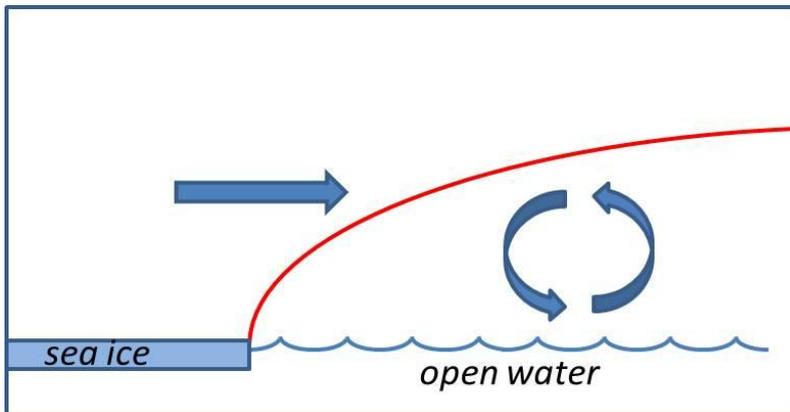
Холодные вторжения – типичный режим в прикромочной зоне в холодное время года



Холодное вторжение в проливе Фрама

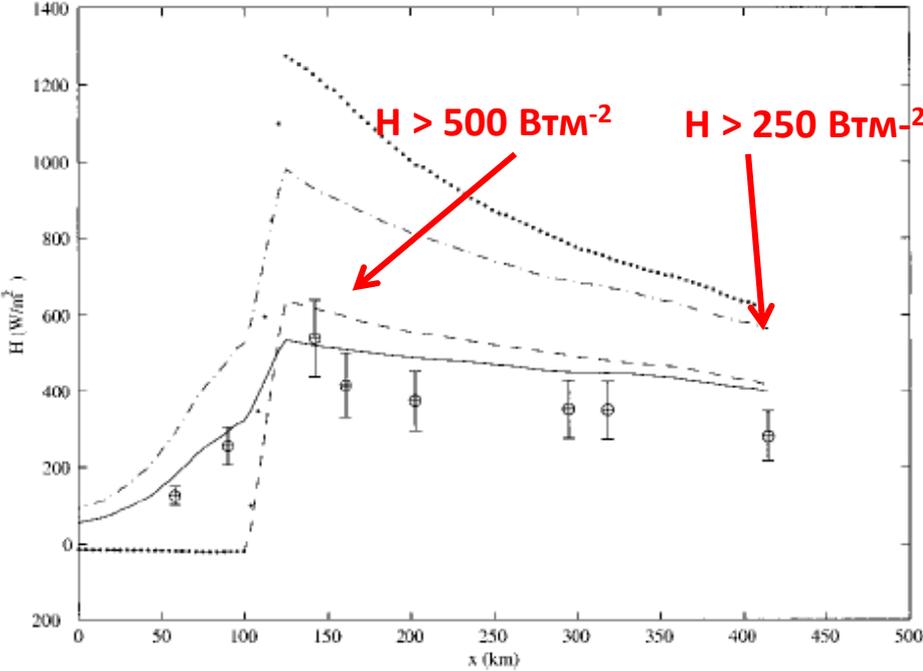
Характерные черты:

- Большие градиенты температуры подстилающей поверхности
- Интенсивный энергообмен атмосферы и океана
- Рост конвективного АПС
- Конвективные ролики и ячейки

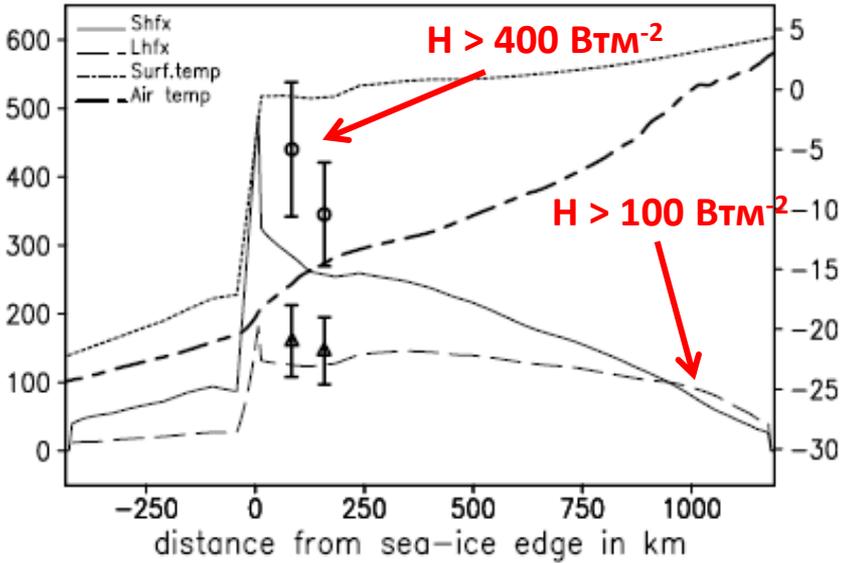


Наиболее важная черта ХВ - - интенсивный турбулентный энергообмен между атмосферой и океаном

Потоки явного тепла по данным самолетных пульсационных измерений:



Паговски и Мур, 2001

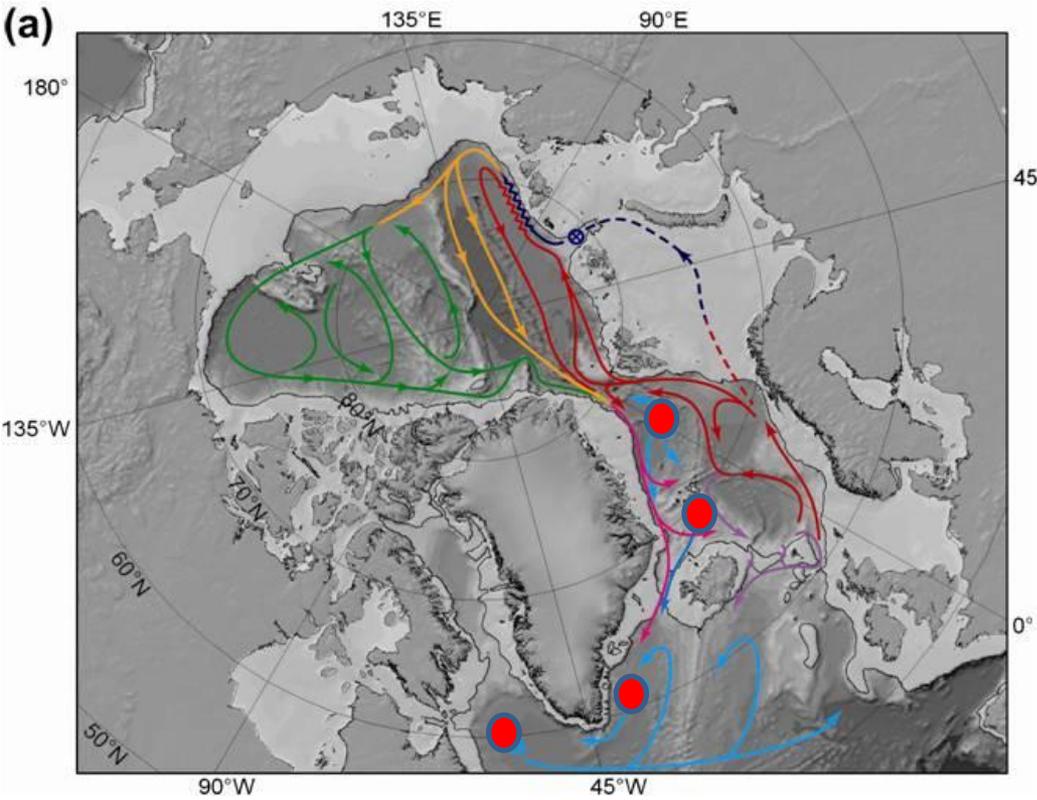


Вакер и др., 2005

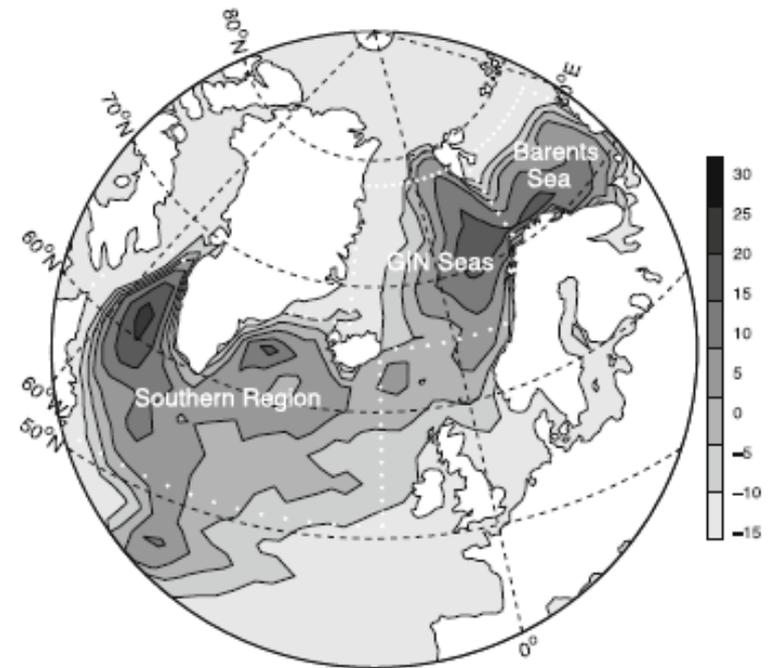
Поток тепла до $650 W/m^2$ (Брюммер, 1996)

Связь с глубокой конвекцией в океане

Районы, где наблюдается ГК



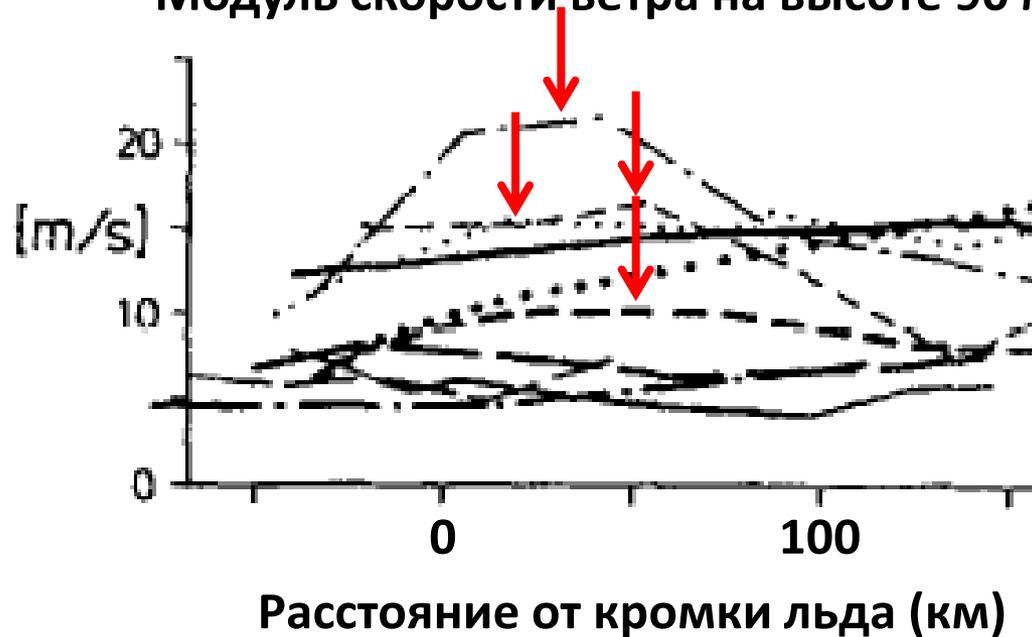
Индекс ХВ, согласно Кольстаду (2008)



Мезомасштабная изменчивость атмосферных параметров: низкоуровневое струйное течение ледового бриза (СТЛБ)

Брюммер, ВЛМ, 1996:

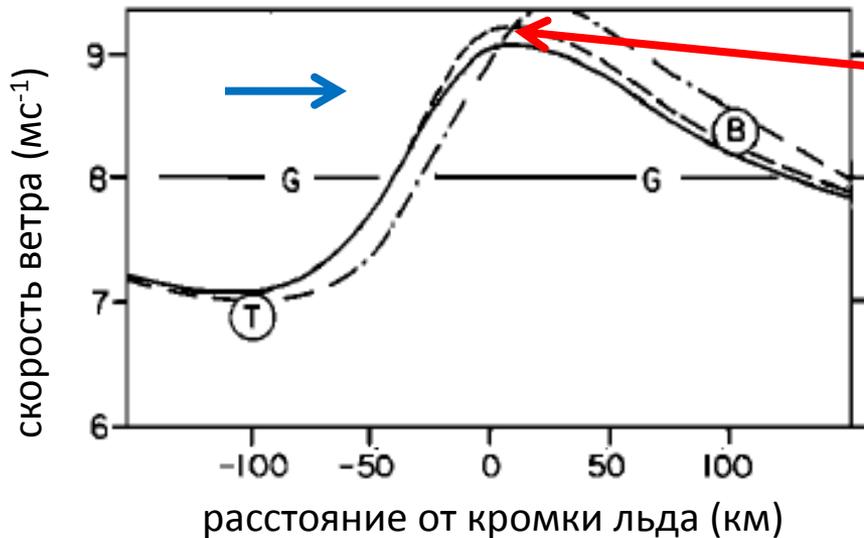
Модуль скорости ветра на высоте 90 м:



$$L \approx 100 \text{ км}$$

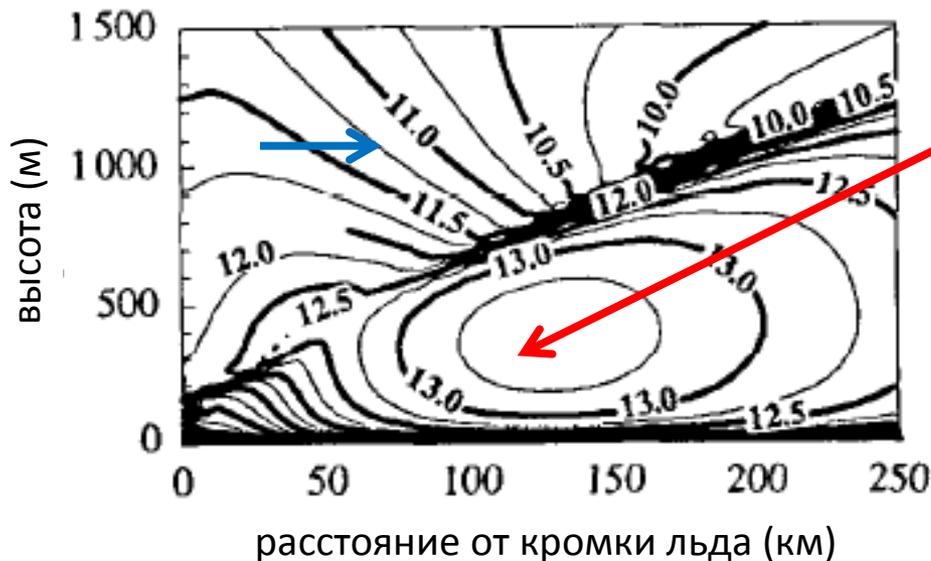
Эффект бароклинности вследствие прогрева АПС над открытой водой

Результаты численного моделирования:



На 12.5% больше
крупномасштабного
геострофического
ветра

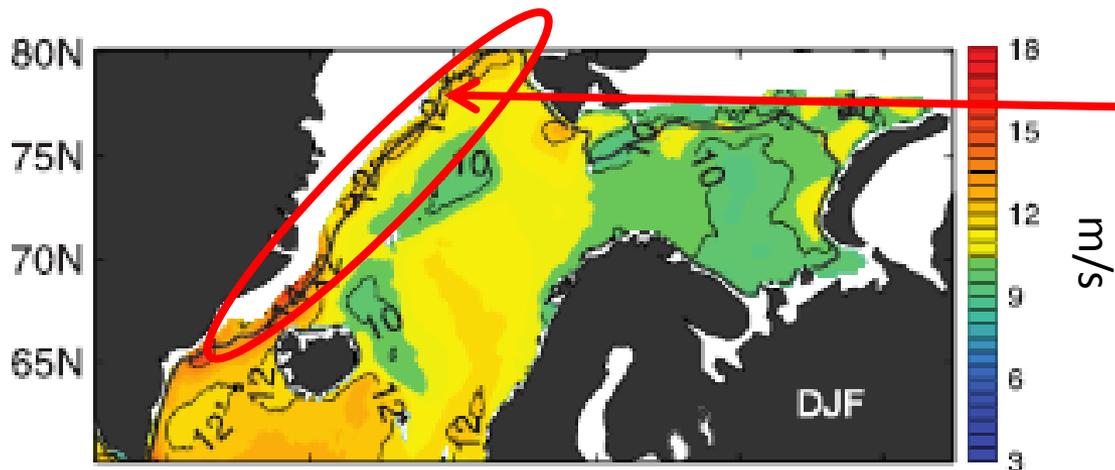
Рейнольдс, JGR, 1984



На 20% больше
крупномасштабного
геострофического
ветра

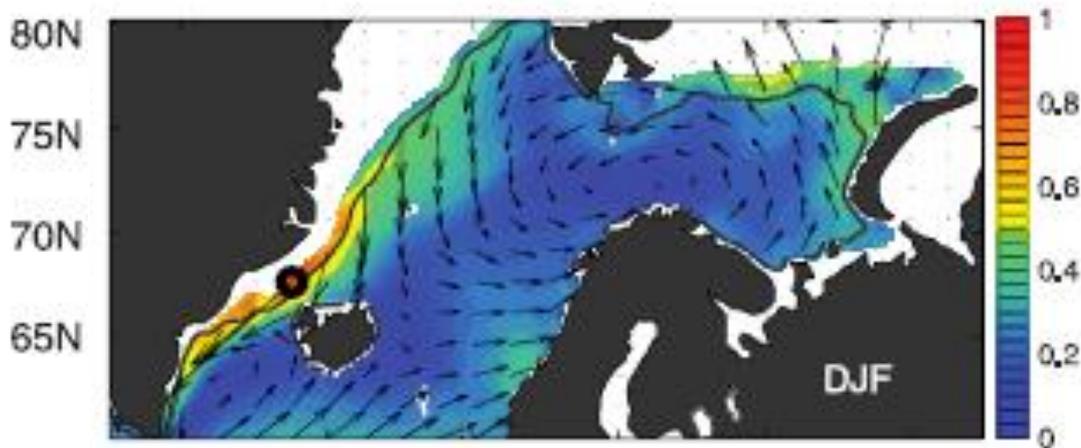
Люпкес и Шлюнцен, BLM, 1996

Кольстад, JGR, 2008:



Максимум скорости ветра вдоль кромки льда

QuikScat: Модуль приземной скорости ветра, осредненный за зимние месяцы 1999-2007



Выводы:

L = 100-200 км

M = 10-30%

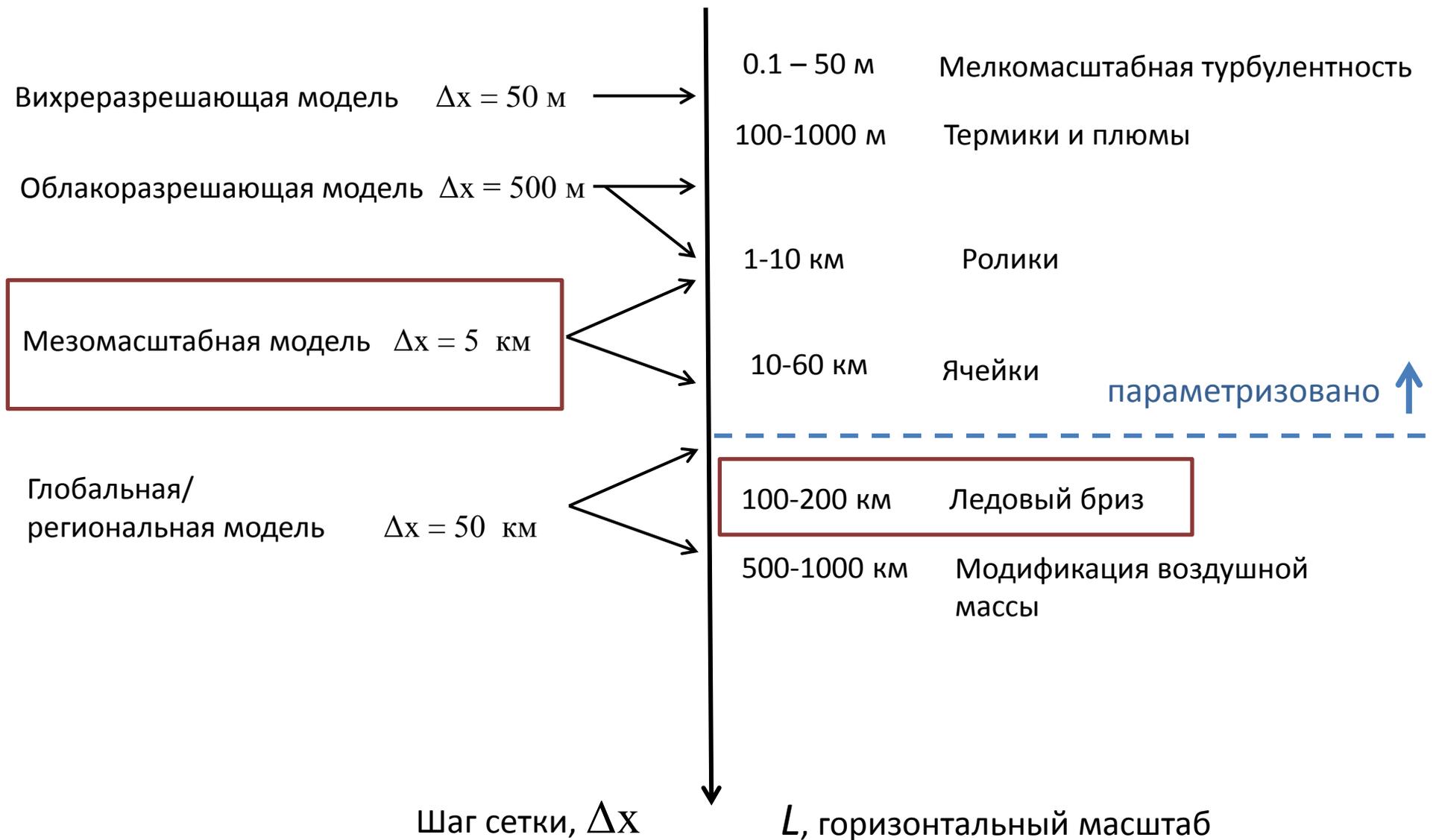
Расположение там, где потоки тепла максимальны

Осредненный вектор скорости ветра и повторяемость этого направления

Задачи:

1. Систематическое исследование характеристик СТЛБ в широком диапазоне внешних параметров, типичном для холодного времени года в полярных районах
2. Выявление физических механизмов, определяющих характеристики СТЛБ
3. Оценка эффекта пространственного разрешения региональных климатических моделей на мезомасштабную изменчивость метеорологических полей и турбулентных потоков

Выбор метода – как исследовать мультимасштабный феномен ХВ?



Трёхмерная негидростатическая модель NH3D (Miranda and James, 1992) – создана в Рединге, развивается в настоящее время в НИВЦ МГУ

Система уравнений – того же класса, что и широко используемые региональные климатические модели, модели прогноза погоды: WRF, COSMO, COAMPS, MESO-NH и тп.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t}(up_*) + \frac{\partial}{\partial x}(u^2p_*) + \frac{\partial}{\partial y}(vup_*) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(\dot{\sigma}up_*) = \\
 - p_* \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \sigma \frac{\partial p_*}{\partial x} \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} + fvp_* + p_*(D_u) \\
 \frac{\partial}{\partial t}(vp_*) + \frac{\partial}{\partial x}(uvp_*) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2p_*) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(\dot{\sigma}vp_*) = \\
 - p_* \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \sigma \frac{\partial p_*}{\partial y} \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} - fup_* + p_*(D_v) \\
 \frac{\partial}{\partial t}(\tilde{w}p_*) + \frac{\partial}{\partial x}(u\tilde{w}p_*) + \frac{\partial}{\partial y}(v\tilde{w}p_*) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(\dot{\sigma}\tilde{w}p_*) = \\
 - Sp_* \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} + p_* g \frac{\theta'}{\theta_s} + p_*(D_w) \\
 \frac{\partial}{\partial t}(\theta p_*) + \frac{\partial}{\partial x}(u\theta p_*) + \frac{\partial}{\partial y}(v\theta p_*) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(\dot{\sigma}\theta p_*) = -S\tilde{w}p_* \frac{\partial \theta_s}{\partial \sigma} + p_*(D_\theta) \\
 \frac{\partial}{\partial t}(p_*) + \frac{\partial}{\partial x}(up_*) + \frac{\partial}{\partial y}(vp_*) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(\dot{\sigma}p_*) = 0
 \end{aligned}$$

+ диагностическое эллиптическое уравнение для возмущения геопотенциала

Боковые граничные условия:

Условия Неймана или Дирихле или радиационные для u, v, θ, p_0

На нижней границе:

Параметризация потоков тепла и импульса на основе теории подобия Моница - Обухова

На верхней границе:

условие Неймана для u, v и θ

Численная реализация:

- разнесенная C-сетка Аракавы
- «чехарда» по времени с фильтром Аселина
- центральные разности для производных
- монотонная адвекция для скаляров
- численное сглаживание по горизонтали 4-го порядка – теперь монотонное

Параметризация турбулентного обмена, неустойчивая стратификация

1. Lupkes and Schlunzen(1996) модифицировали нелокальное турбулентное замыкание Holtslag and Moeng (1991) и показали его адекватность для случая холодного вторжения в проливе Фрама (METRAS $\Delta x = 4$ км)
2. Pagowski and Moore (2001) успешно использовали нелокальное замыкание Troen and Mahrt (1986) для воспроизведения ХВ в Лабрадорском море (MM5 $\Delta x = 7$ км)

Нелокальное замыкание: схемы TM86 и LS96

$$\overline{w'\theta'} = -K_H \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} - \Gamma \right)$$

$$\overline{w'u'} = -K_M \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

Γ - «контргradientный член»,
перенос тепла за счет крупных
вихрей

Параметризация турбулентного обмена, устойчивая стратификация

Vihma et al. (2003) показали адекватность локального замыкания для случая теплой адвекции с воды на лед.

Локальное замыкание

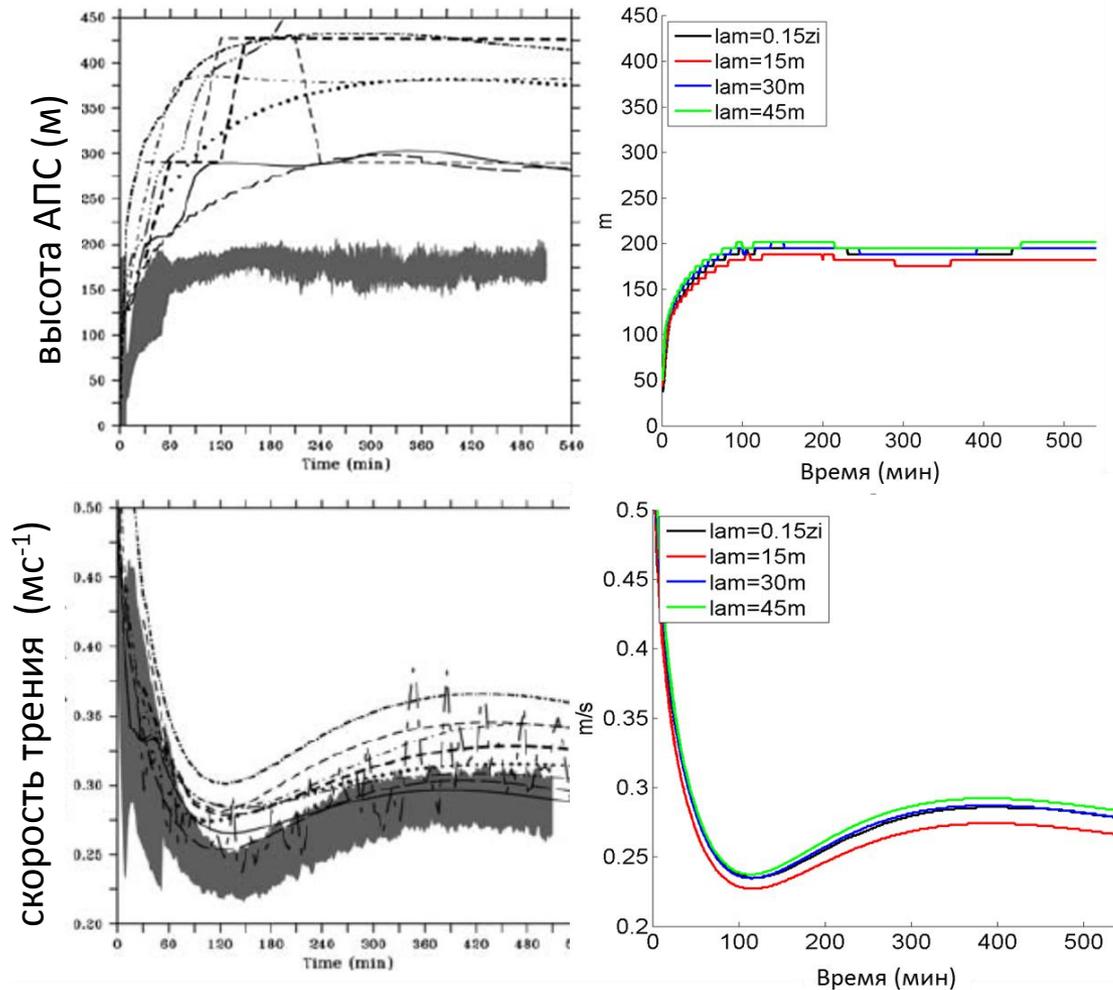
$$\overline{w'\theta'} = -K_H \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}$$

$$\overline{w'u'} = -K_M \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

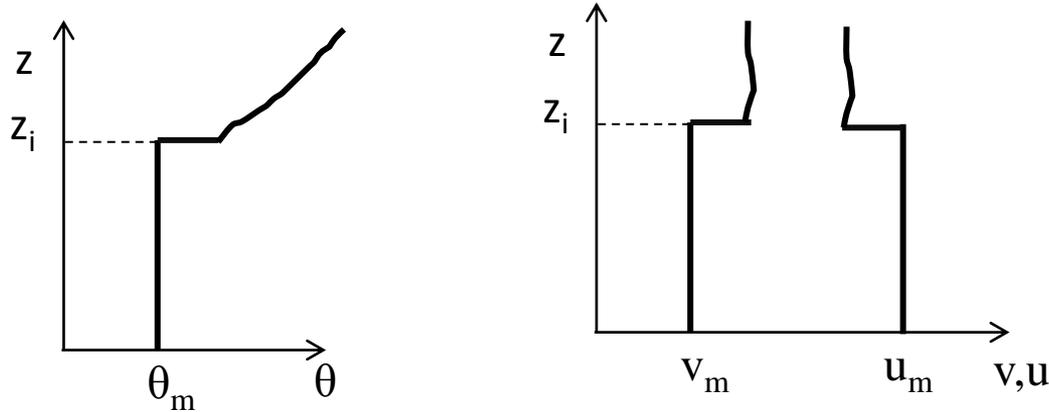
$$K_M = l_n^2 \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| (1 - 5Ri)^2$$

$$K_H = K_M$$

Эксперимент GABLS (Cuxart et al., 2005):



Интегральная модель перемешанного АПС



4 прогностических уравнения:

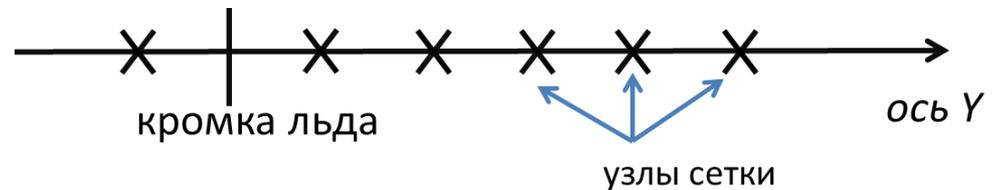
$$\frac{du_m}{dt} = -fv_g + fv_m + \frac{w_e(u_+ - u_m)}{z_i} + \frac{(\overline{u'w'})_s}{z_i},$$

$$\frac{dv_m}{dt} = fu_g - fu_m + g\theta_m \int_H^{z_i} \theta^{-2} \frac{\partial \theta}{\partial y} dz + \frac{g(\theta_m - \theta_+)}{\theta_+} \frac{\partial z_i}{\partial y} + \frac{gz_i}{2\theta_m} \frac{\partial \theta_m}{\partial y} +$$

$$+ \frac{w_e(v_+ - v_m)}{z_i} + \frac{(\overline{v'w'})_s}{z_i},$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{w_e(\theta_+ - \theta_m)}{z_i} + \frac{(\overline{w'\theta'})}{z_i},$$

$$\frac{dz_i}{dt} = w_e + w_{z_i}.$$



Методика экспериментов

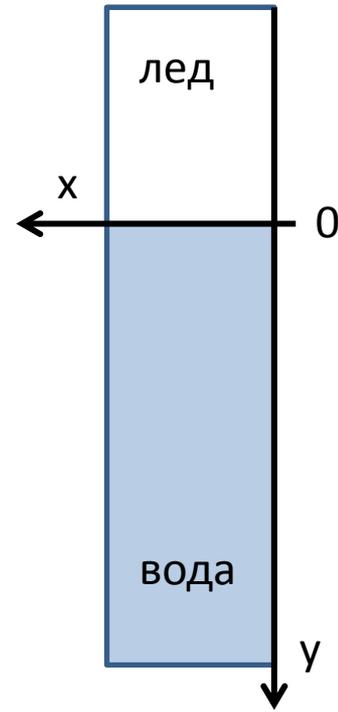
Крупномасштабный баротропный форсинг:

U_g, V_g – постоянные в пространстве и времени

Подстилающая поверхность – на севере лед ($z_{0,ice}, T_{ice}$), на юге открытая вода ($z_{0,water}, T_{water}$)

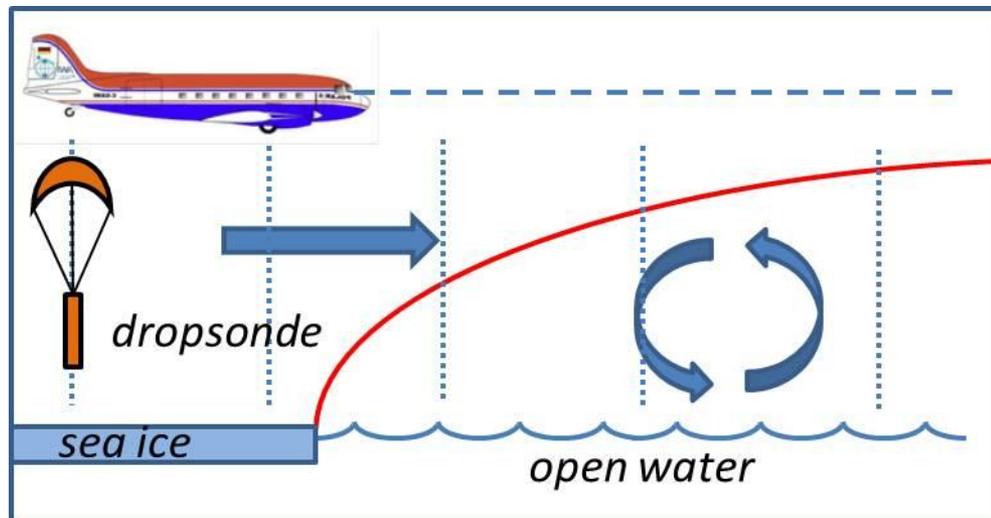
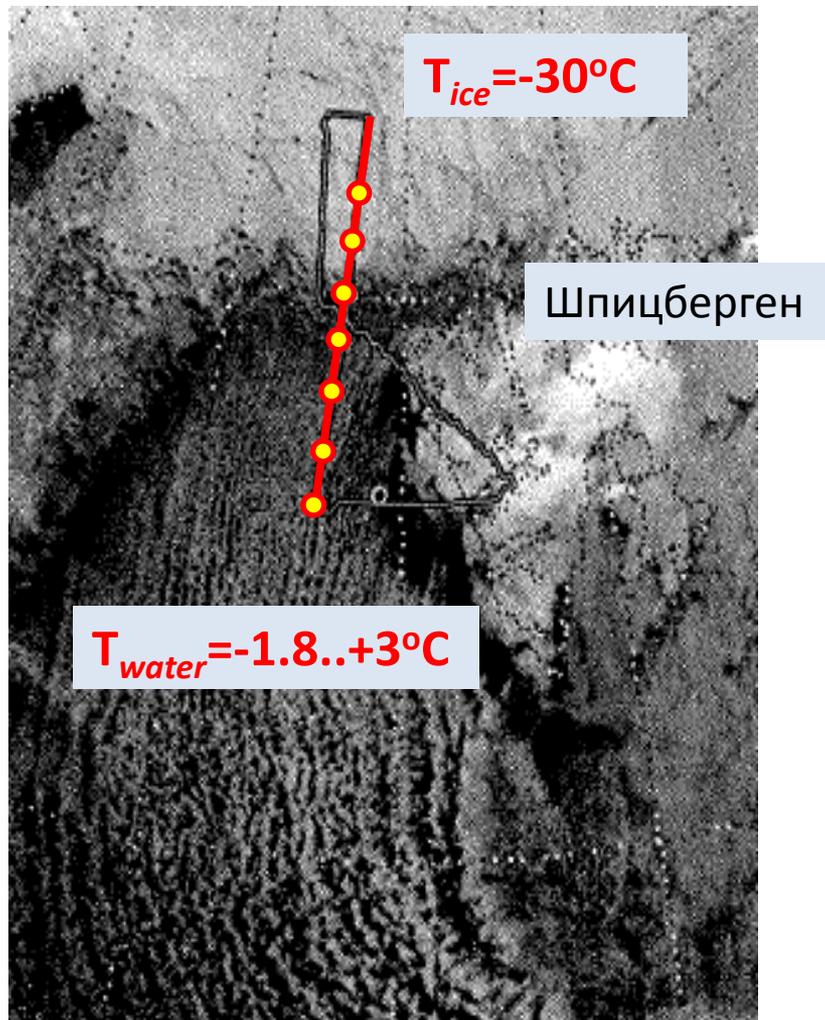
Идеализация:

1. Квази-двумерная задача
2. Пренебрегаем микрофизикой и радиацией



Верификация модели NH3D

Основной эксперимент: ХВ в проливе Фрама



Параметры эксперимента:

$$U_g = -6.2 \text{ мс}^{-1}$$

$$V_g = -9.4 \text{ мс}^{-1}$$

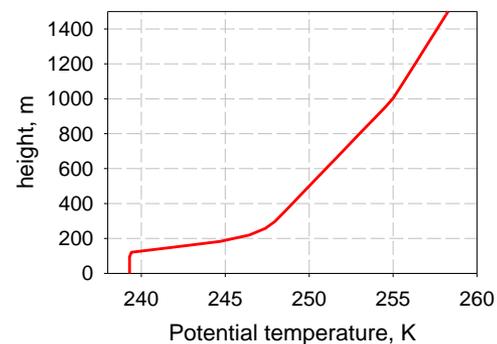
$$T_{ice} = -30^{\circ}\text{C}$$

$$T_{water} = -1.8...+3^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta x = 1.25 \text{ km}$$

25 уровней ниже 1000 м

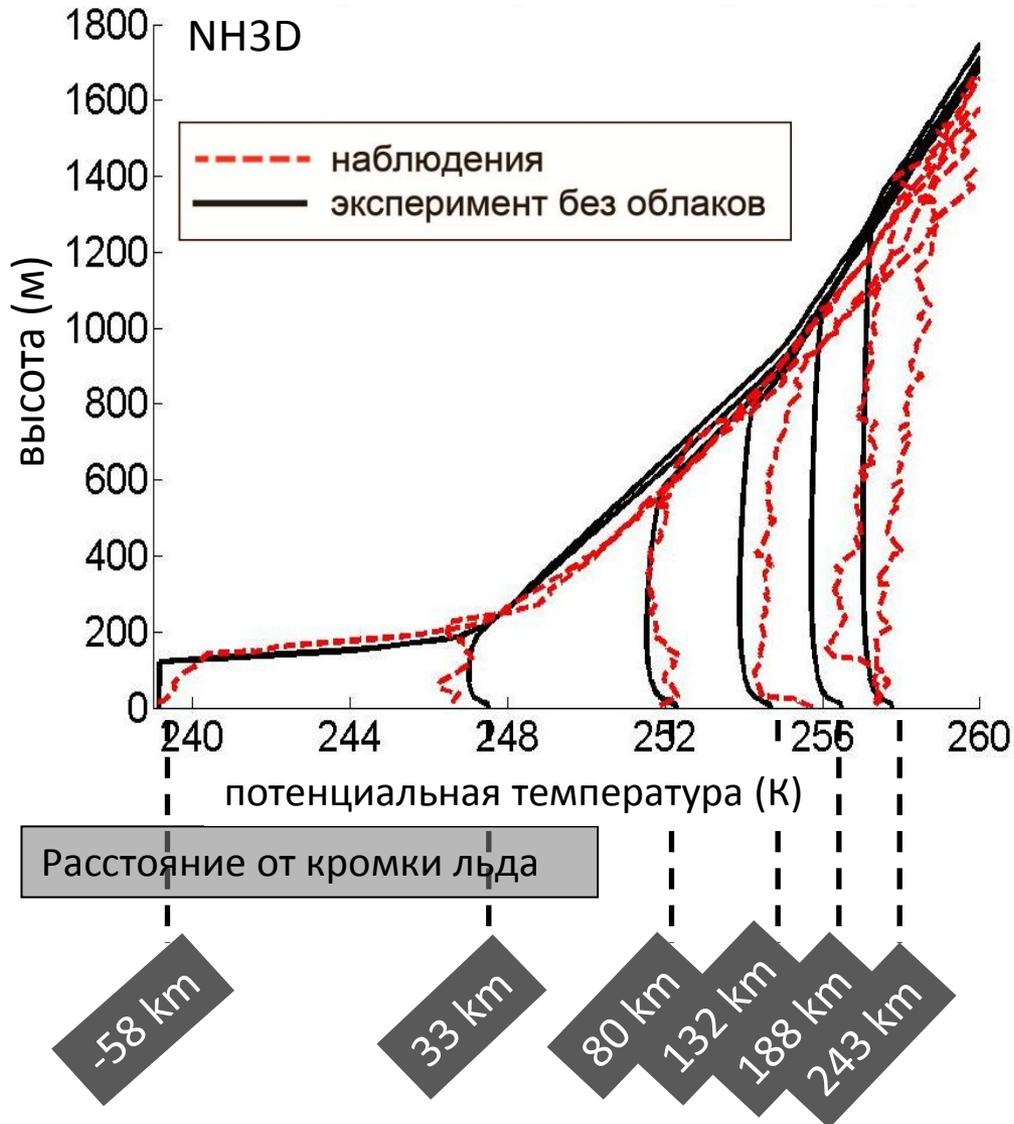
Initial potential temperature profile, K



4th Марта 1993, кампания AWI REFLEX II

Сравнение с наблюдениями

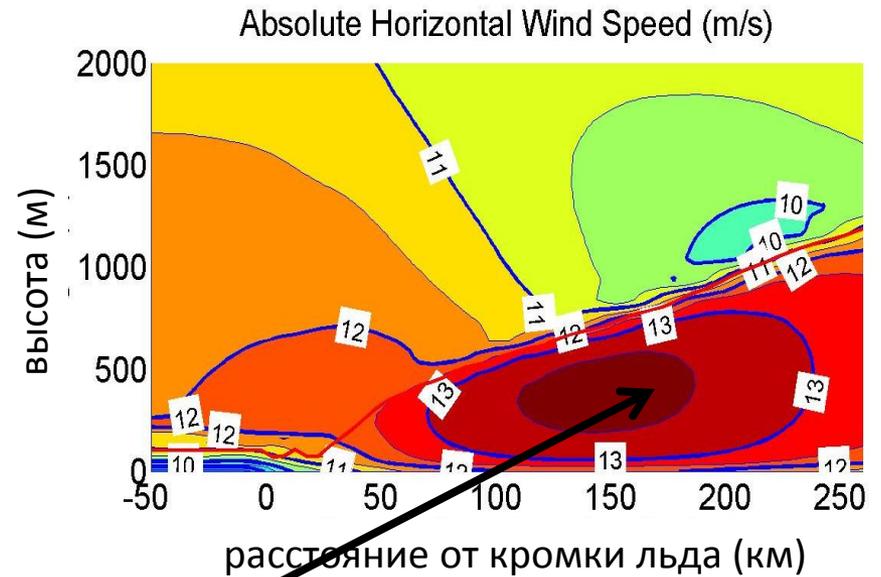
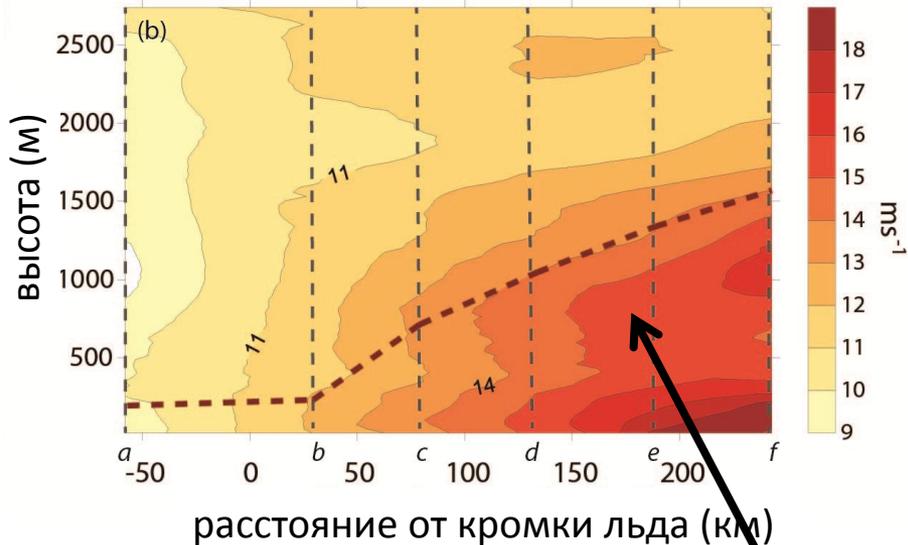
Вертикальные профили потенциальной температуры (K)



Сравнение с наблюдениями

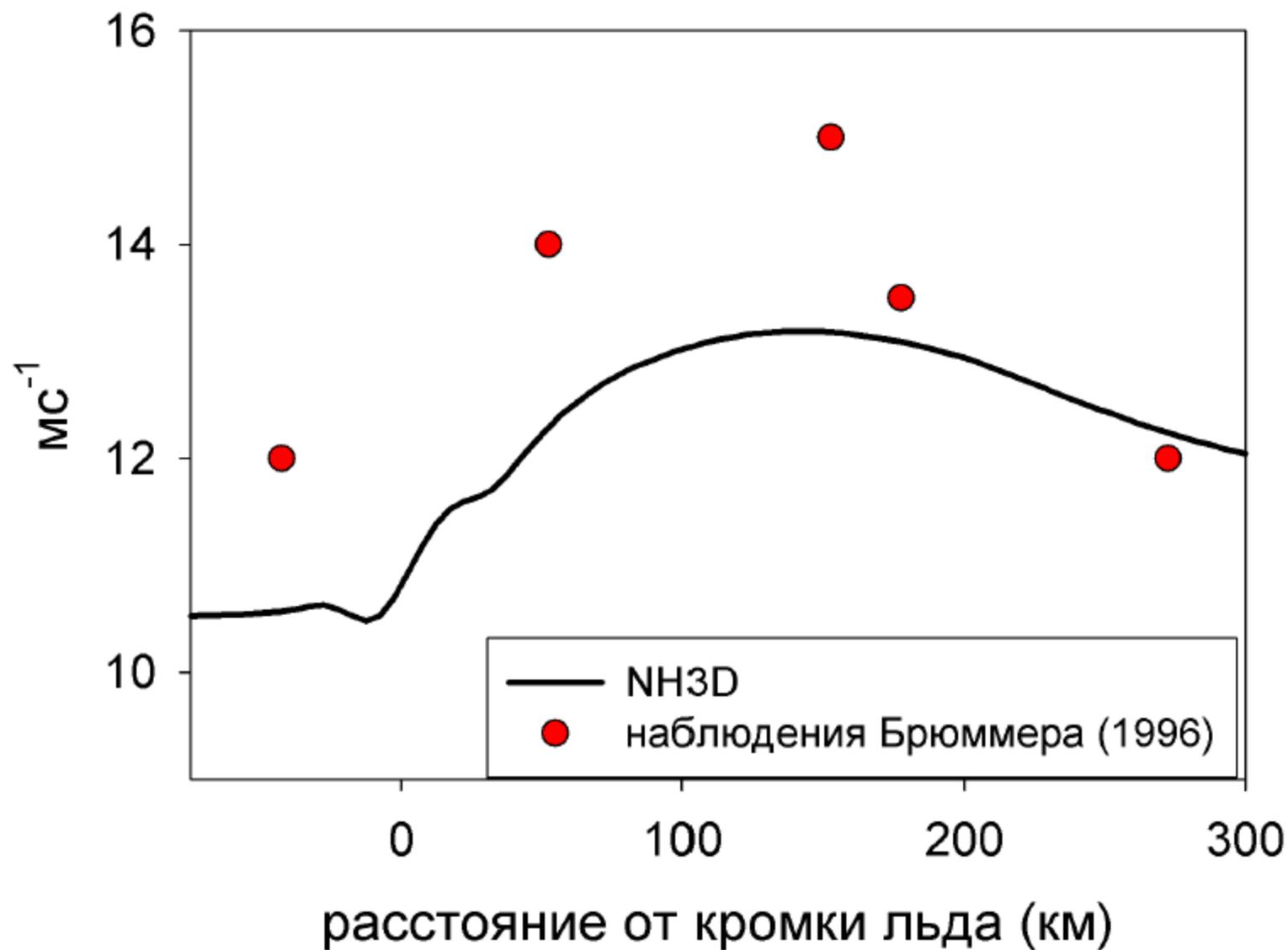
Модуль скорости ветра (мс^{-1}):

Измерения со сбрасываемых зондов

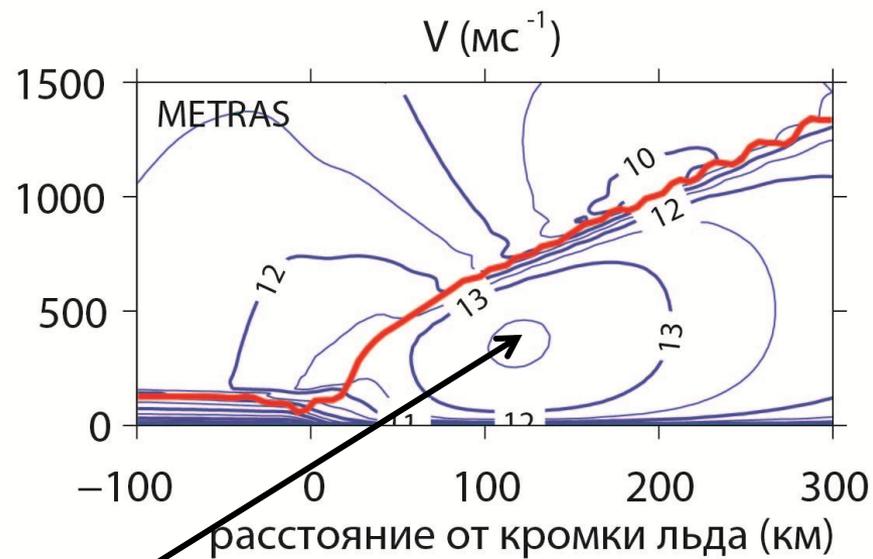
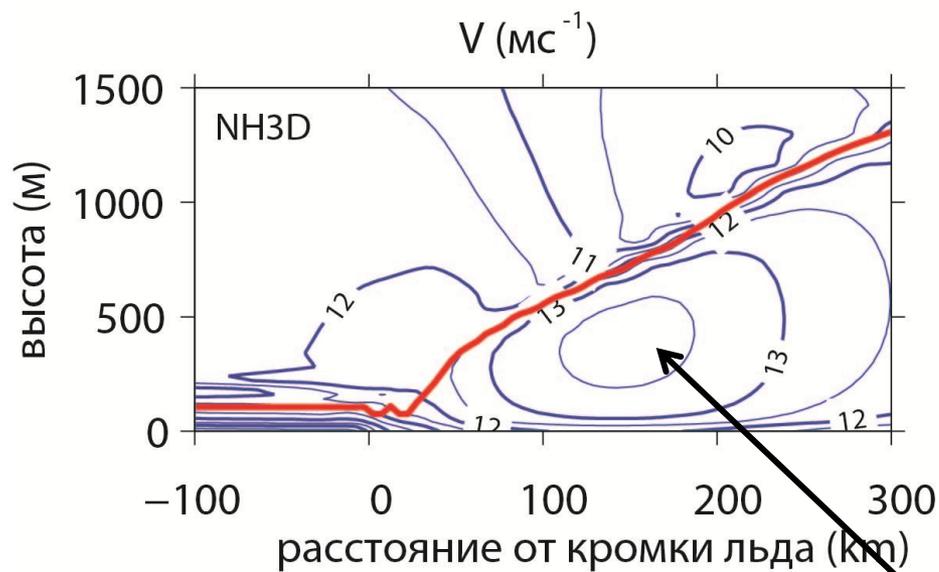
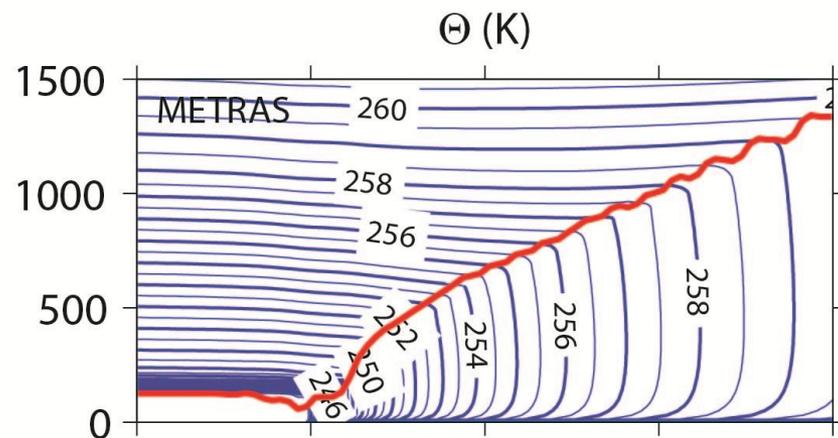
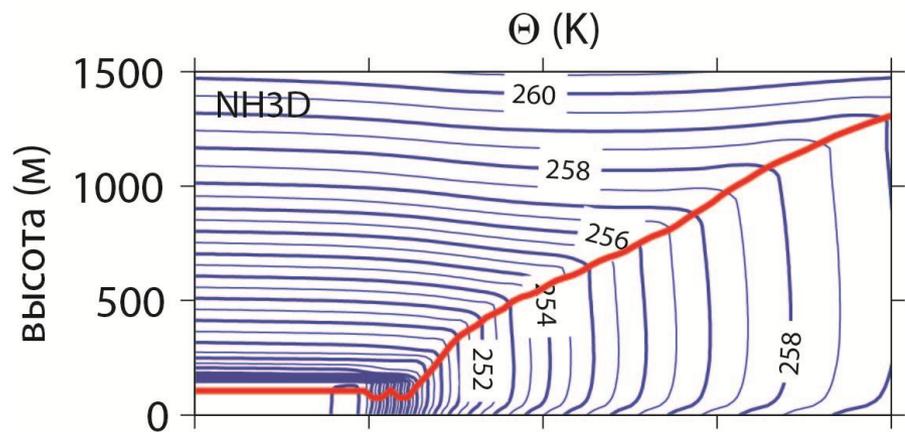


Максимум скорости ветра внутри АПС – **низкоуровневое струйное течение ледового бриза (СТЛБ)**

Модуль скорости ветра на высоте 90 м

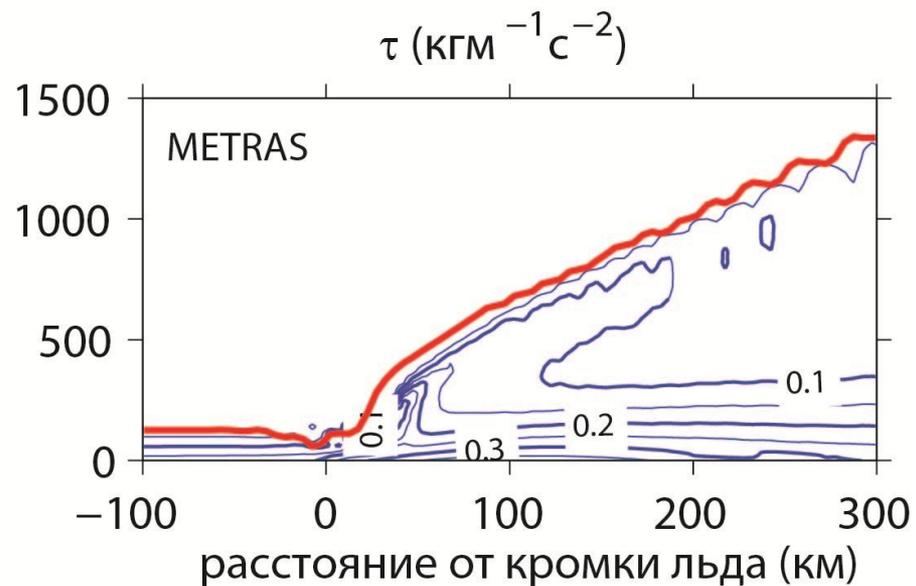
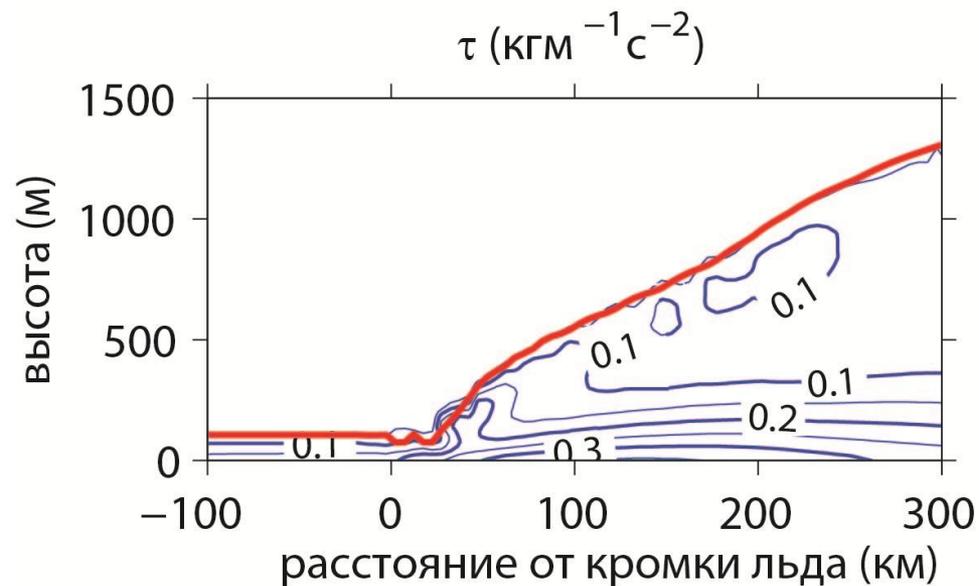
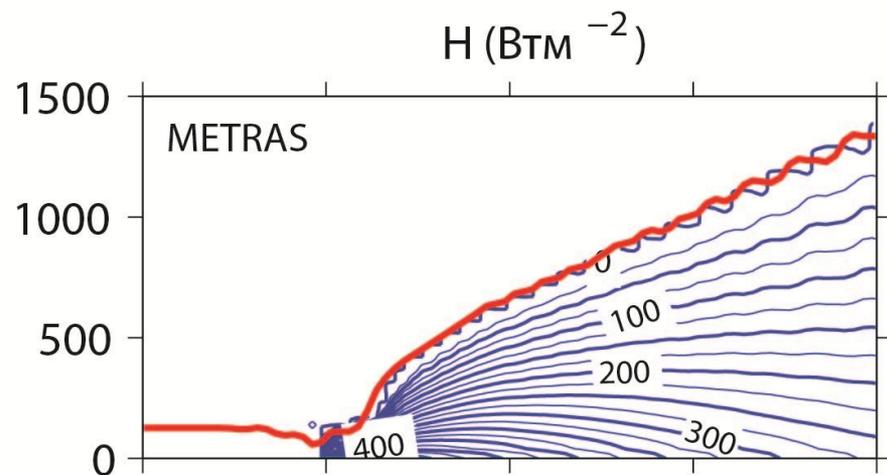
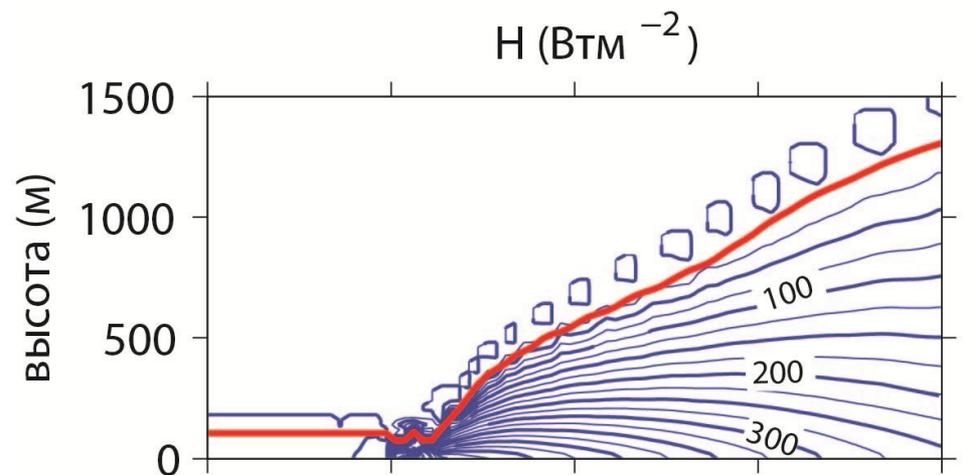


Сравнение NH3D и METRAS



Абсолютные значения V_{\max} очень близки

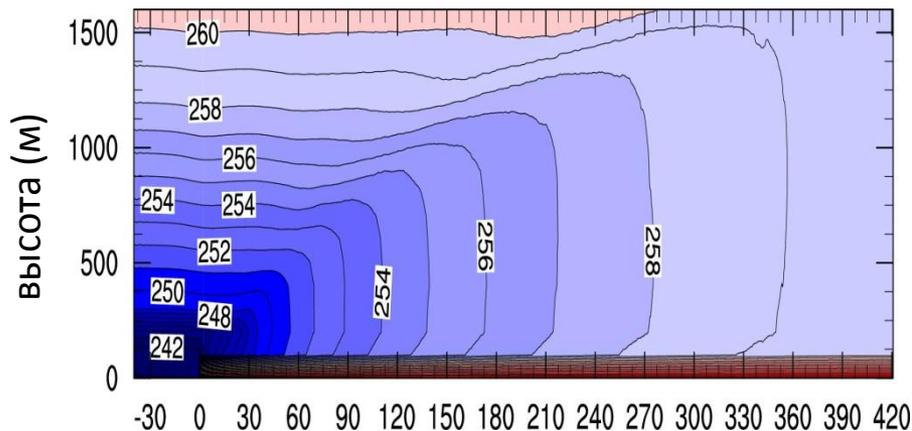
Сравнение NH3D и METRAS



Сравнение NH3D и вихреразрешающей модели PALM (Университет г. Ганновер, Германия)

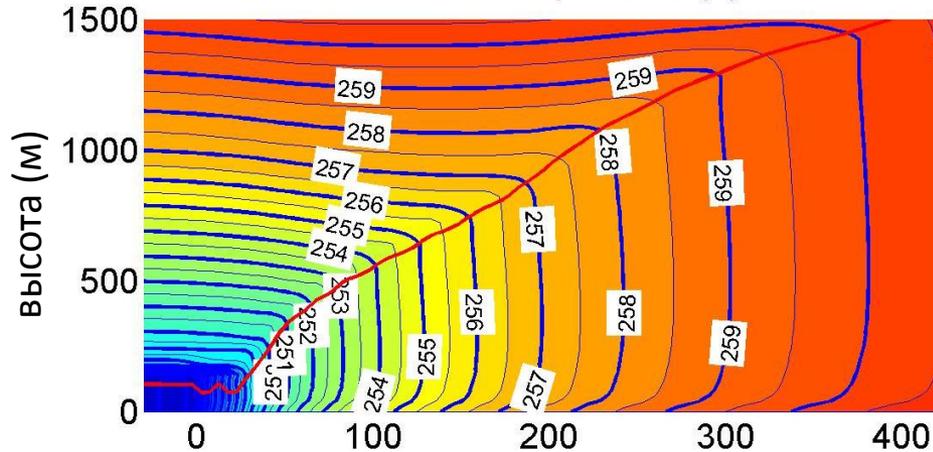
PALM:

Потенциальная т-ра

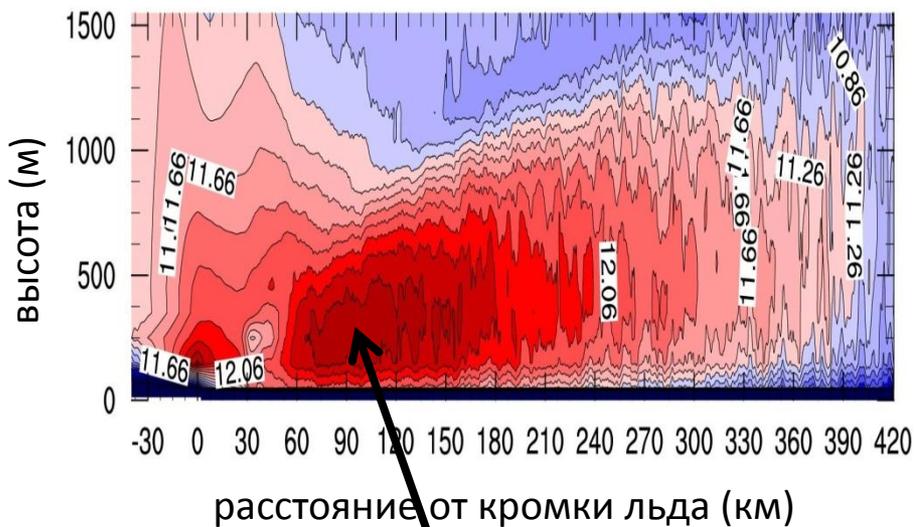


NH3D:

Potential Temperature (K)

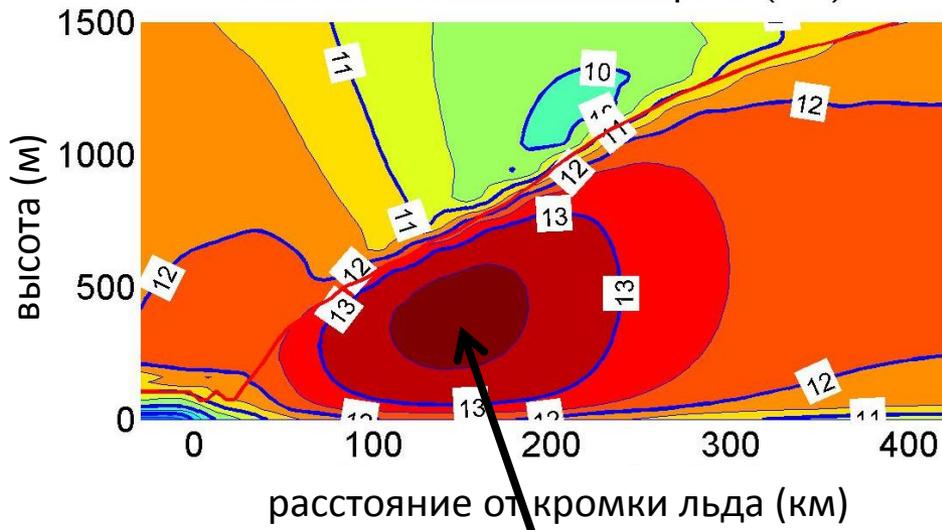


Модуль скорости ветра



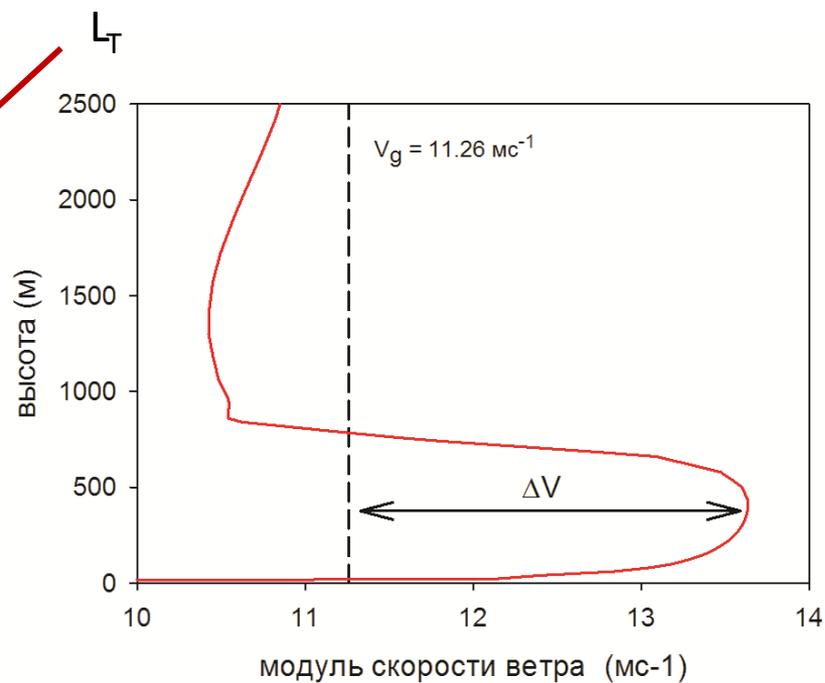
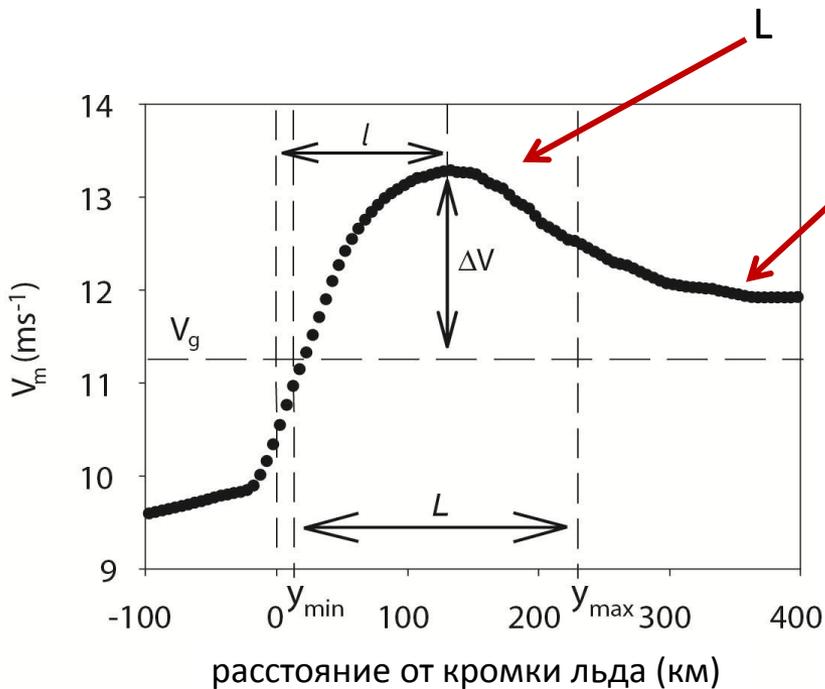
12.5 мс⁻¹

Absolute Horizontal Wind Speed (m/s)



13.6 мс⁻¹

Характеристики СТЛБ



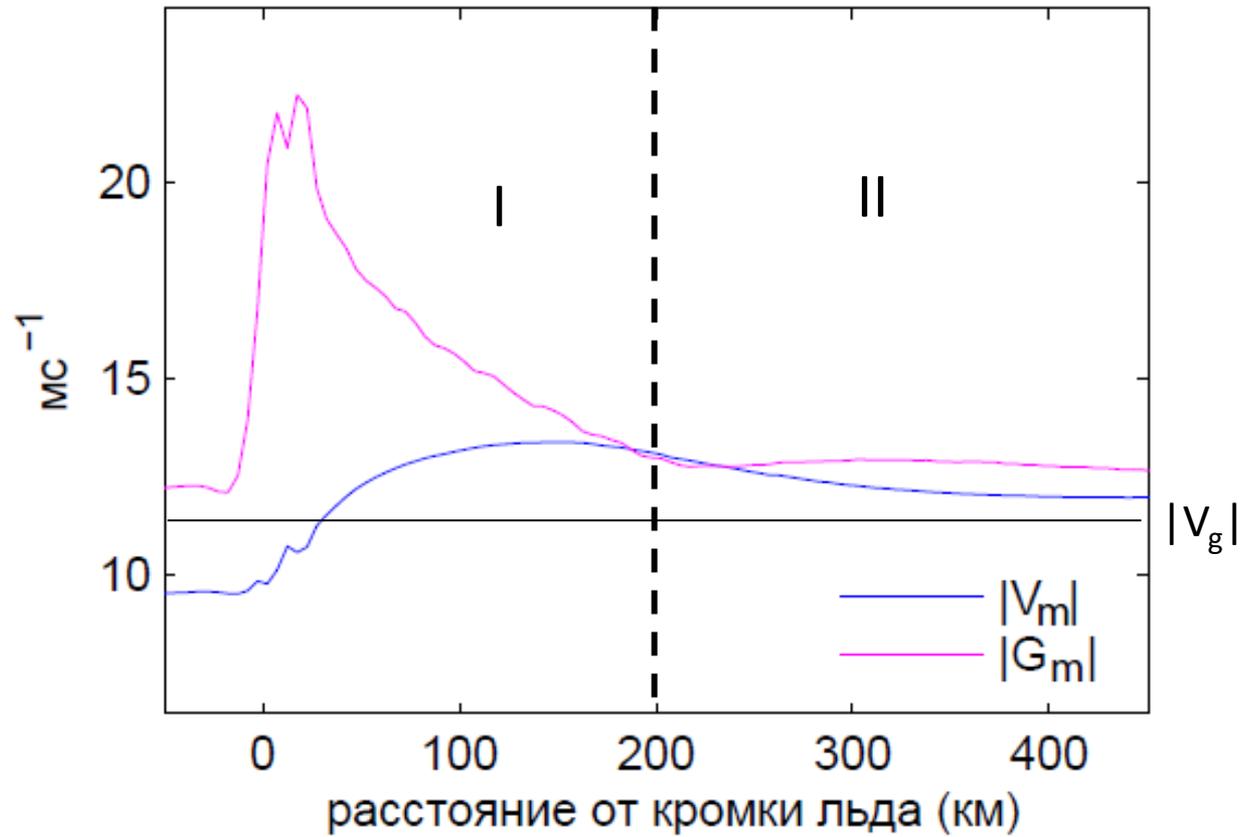
1. Горизонтальная протяженность:

$$L = y_{\max} - y_{\min} \approx 210 \text{ км}$$

2. Амплитуда

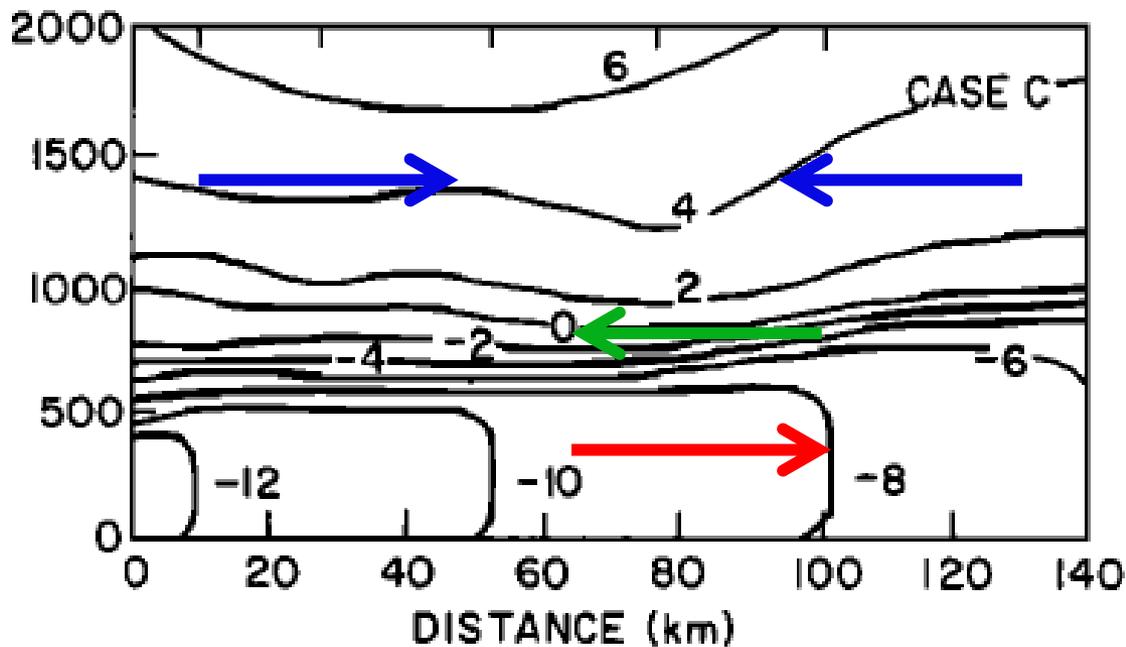
$$M = \frac{V_{\max} - V_g}{V_g} \approx 0.2 \geq C_M$$

Геострофический ветер



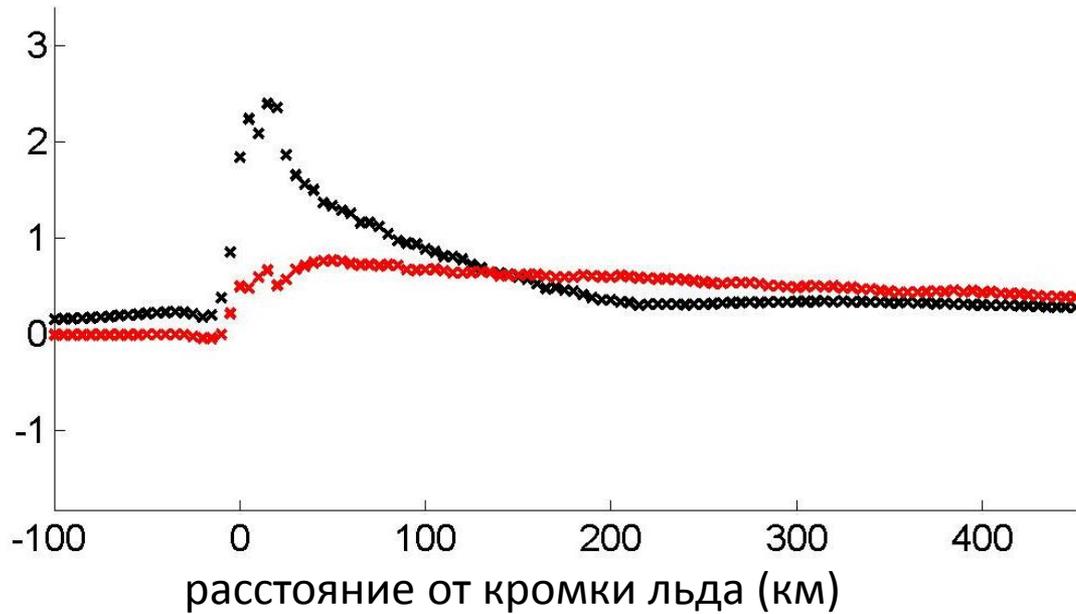
Геострофический ветер

$$\frac{1}{z_i} \int_0^{z_i} -\rho^{-1} \nabla p dz = \underbrace{f \mathbf{k} \times \mathbf{V}_g}_{\text{blue}} - \underbrace{g \theta_m \int_H^{z_i} \theta^{-2} \nabla \theta dz}_{\text{green}} - \underbrace{\frac{g \Delta \theta}{\theta_+} \nabla z_i + \frac{g z_i}{2 \theta_m} \nabla \theta_m}_{\text{red}}.$$



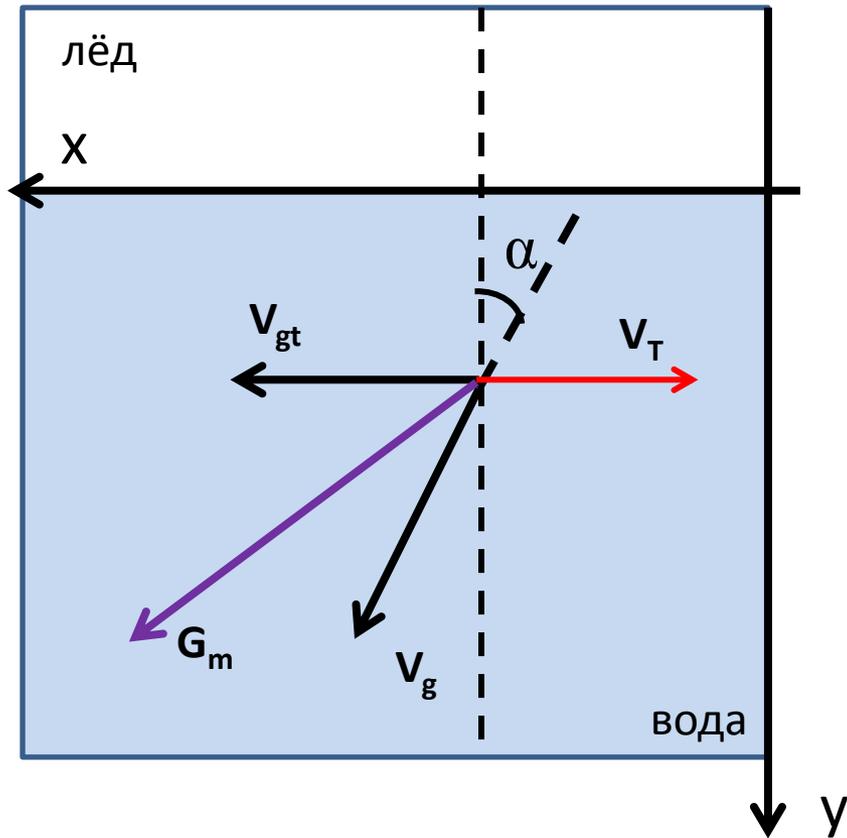
Геострофический ветер

$$\frac{1}{z_i} \int_0^{z_i} -\rho^{-1} \nabla p dz = f \mathbf{k} \times \mathbf{V}_g - g \theta_m \int_H^{z_i} \theta^{-2} \nabla \theta dz - \frac{g \Delta \theta}{\theta_+} \nabla z_i + \frac{g z_i}{2 \theta_m} \nabla \theta_m.$$



Па км-1

Геострофический ветер



$$u_{gm} = U_g + \frac{gz_i}{2f\theta_m} \frac{\partial\theta_m}{\partial y},$$

$$v_{gm} = V_g$$

$$V_{gt} = gz_i / (2f\theta_m) \partial\theta_m / \partial y \cdot \mathbf{i}.$$

$$\frac{|G_m|}{|V_g|} = \left[1 + 2 \frac{V_{gt} \cdot \mathbf{i}}{|V_g|} \sin\alpha + \left(\frac{V_{gt} \cdot \mathbf{i}}{|V_g|} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Трансформация воздушной массы

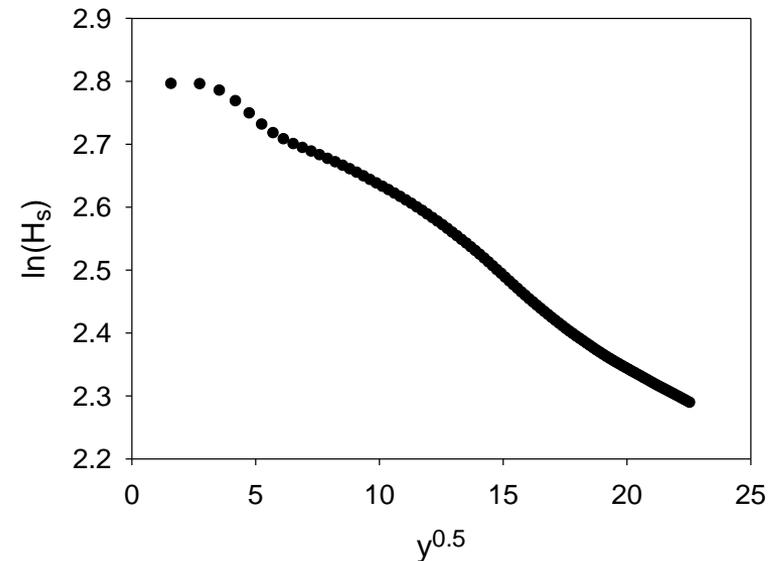
$$V_{gt} = gz_i / (2f\theta_m) \partial\theta_m / \partial y \cdot i.$$

В стационарном режиме, пренебрегая вовлечением:

$$\frac{gz_i}{2f\theta_m} \frac{\partial\theta_m}{\partial y} = \frac{g}{2f\theta_m} (\overline{w'\theta'})_s$$

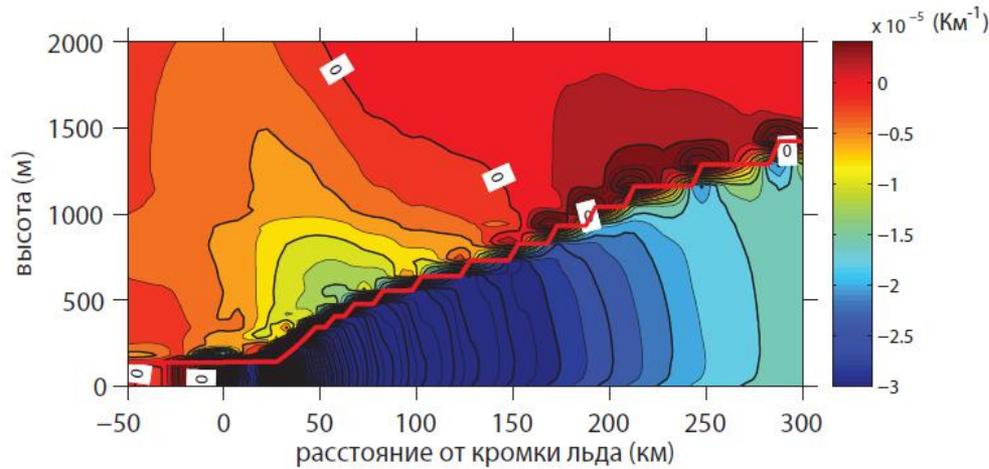
$$z_i \propto \sqrt{y}$$

$$(\overline{w'\theta'})_s \propto H_0 \exp\left(-\frac{y}{k}\right)^{0.5}$$



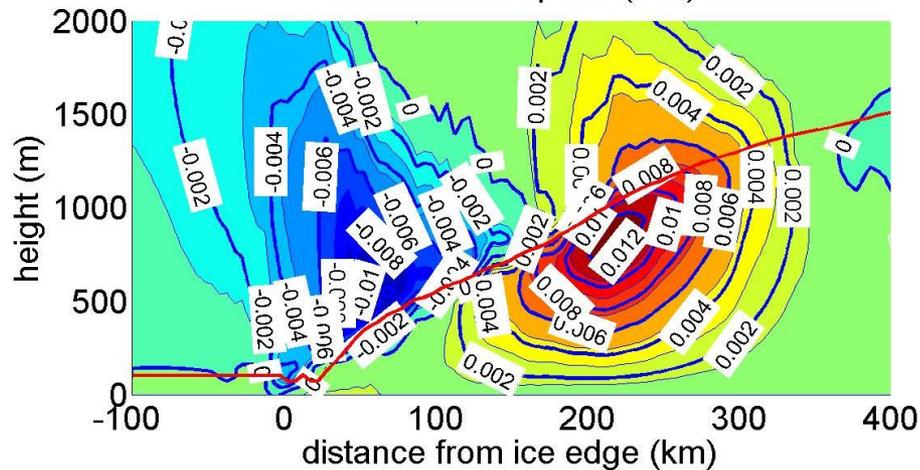
Характерный масштаб $L_T = k \approx 1000$ км

$$\frac{1}{z_i} \int_0^{z_i} -\rho^{-1} \nabla p dz = f \mathbf{k} \times \mathbf{V}_g - \underline{g \theta_m \int_H^{z_i} \theta^{-2} \nabla \theta dz} - \frac{g \Delta \theta}{\theta_+} \nabla z_i + \frac{g z_i}{2 \theta_m} \nabla \theta_m.$$



$$\leftarrow \frac{\partial \theta}{\partial y}$$

Vertical wind speed (m/s)



$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

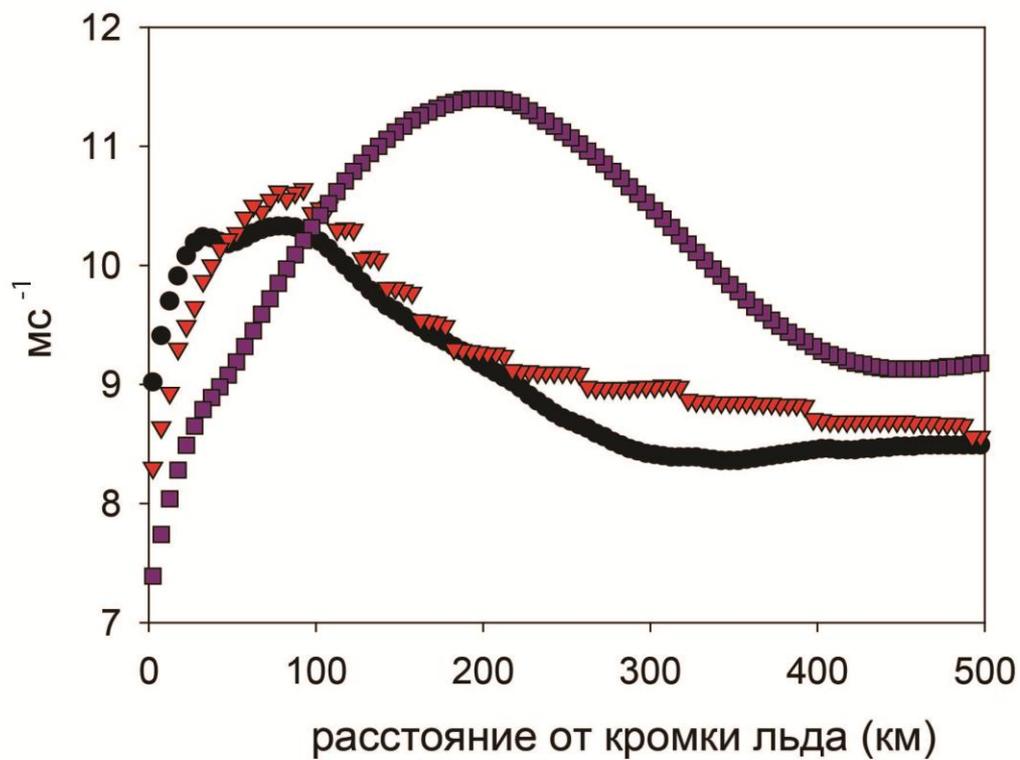
$$w|_{z=z_i} = - \int_{z=0}^{z_i} \frac{\partial v}{\partial y} dz.$$

Обратная связь между процессами
в АПС и вышележащими слоями

$\frac{\partial v}{\partial y}$ - агеострофические движения за счет:

- 1) трения – Экмановский поворот;
- 2) горизонтальной адвекции – инерционное колебание.

Модуль скорости ветра, осредненный по АПС



- Интегральная модель, ЭКС 2
- ▼ NH3D
- Интегральная модель, ЭКС 1

Чувствительность характеристик СТЛБ к внешним параметрам

1. Модуль крупномасштабного геострофического ветра:

$$5 \text{ мс}^{-1} \leq |V_g| \leq 14 \text{ мс}^{-1}$$

2. Направление крупномасштабного геострофического ветра:

$$-60^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$$

3. Разность температуры поверхности вода-лед:

$$15 \text{ К} \leq \Delta\theta \leq 35 \text{ К}$$

4. Высота АПС надо льдом

$$120 \text{ м} \leq z_i \leq 460 \text{ м}$$

5. Стратификация атмосферы

$$0.006 \text{ Км}^{-1} \leq \Gamma \leq 0.01 \text{ Км}^{-1}$$

6. Ширина прикромочной зоны

$$0 \text{ км} \leq L_{MIZ} \leq 180 \text{ км}$$

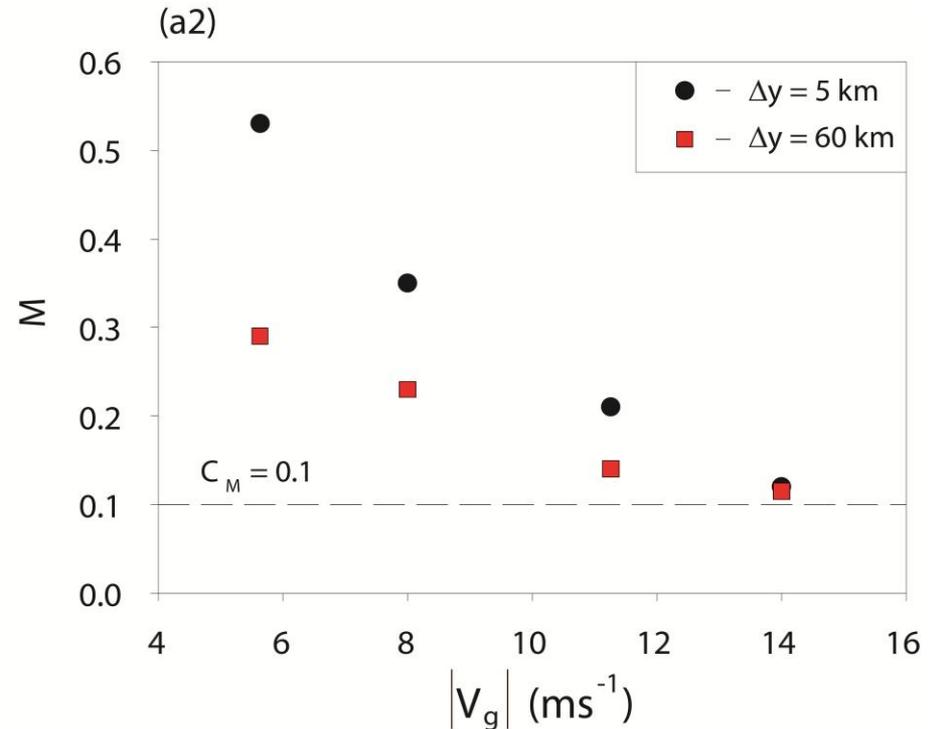
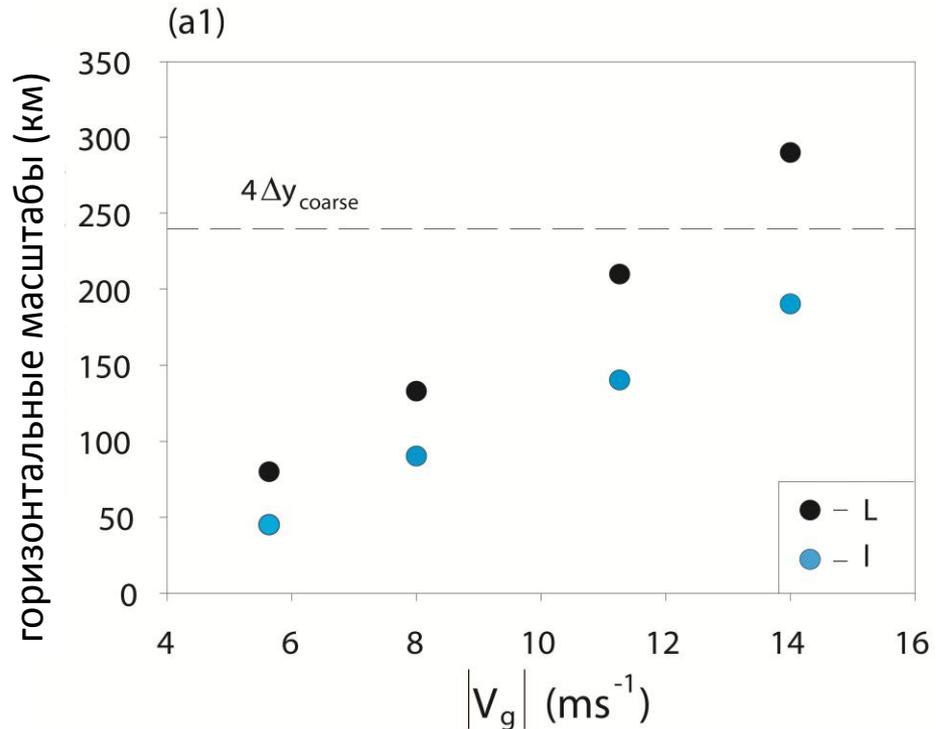
7. Параметр Кориолиса

$$2 \cdot 10^3 \text{ с} \leq f^{-1} \leq 14 \cdot 10^3 \text{ с}$$

Чувствительность к модулю крупномасштабного геострофического ветра

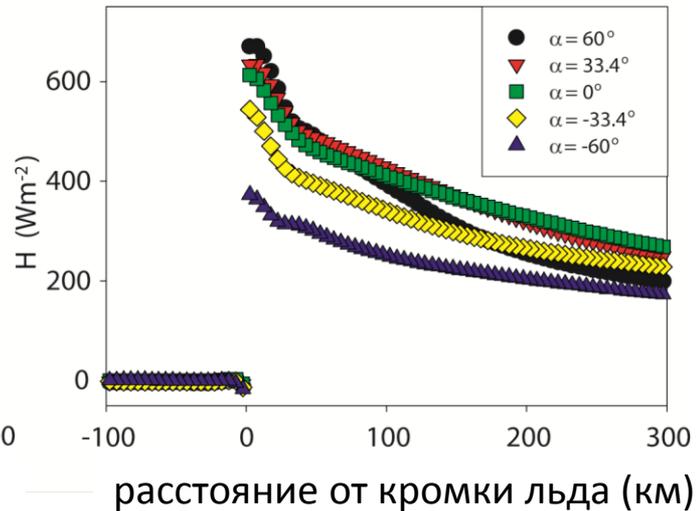
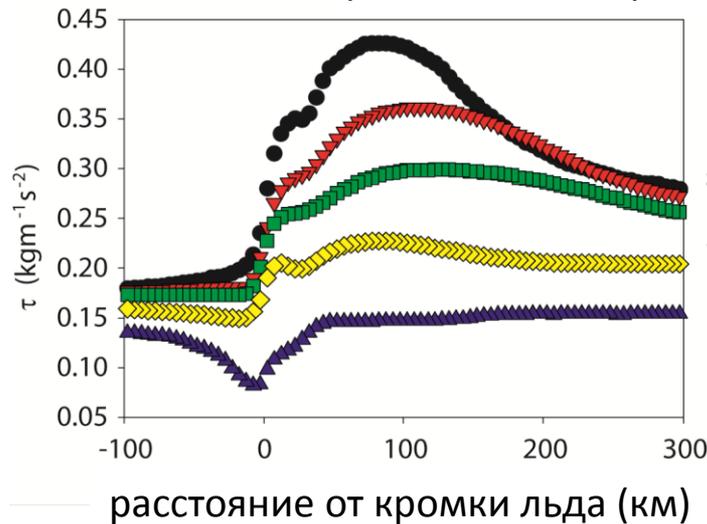
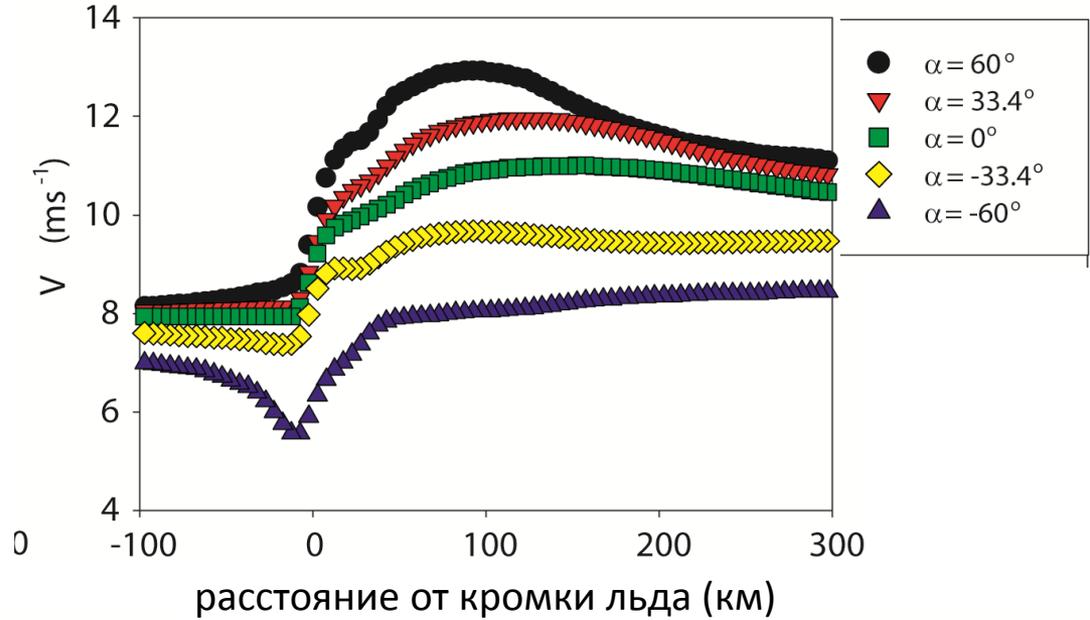
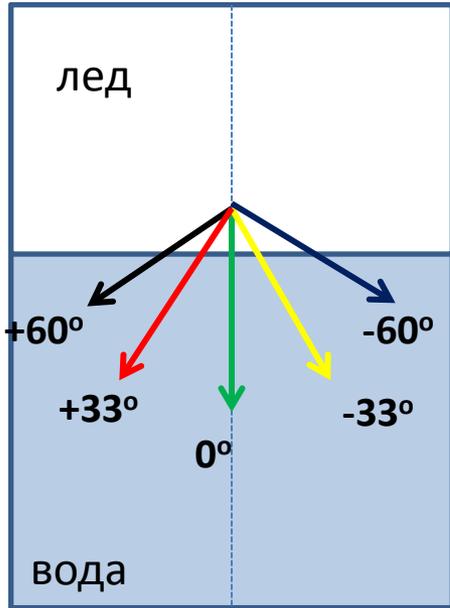
$$5 \text{ мс}^{-1} \leq |V_g| \leq 14 \text{ мс}^{-1}$$

$$\frac{|G_m|}{|V_g|} = \left[1 + 2 \frac{V_{gt} \cdot i}{|V_g|} \sin \alpha + \left(\frac{V_{gt} \cdot i}{|V_g|} \right)^2 \right]^{1/2}$$



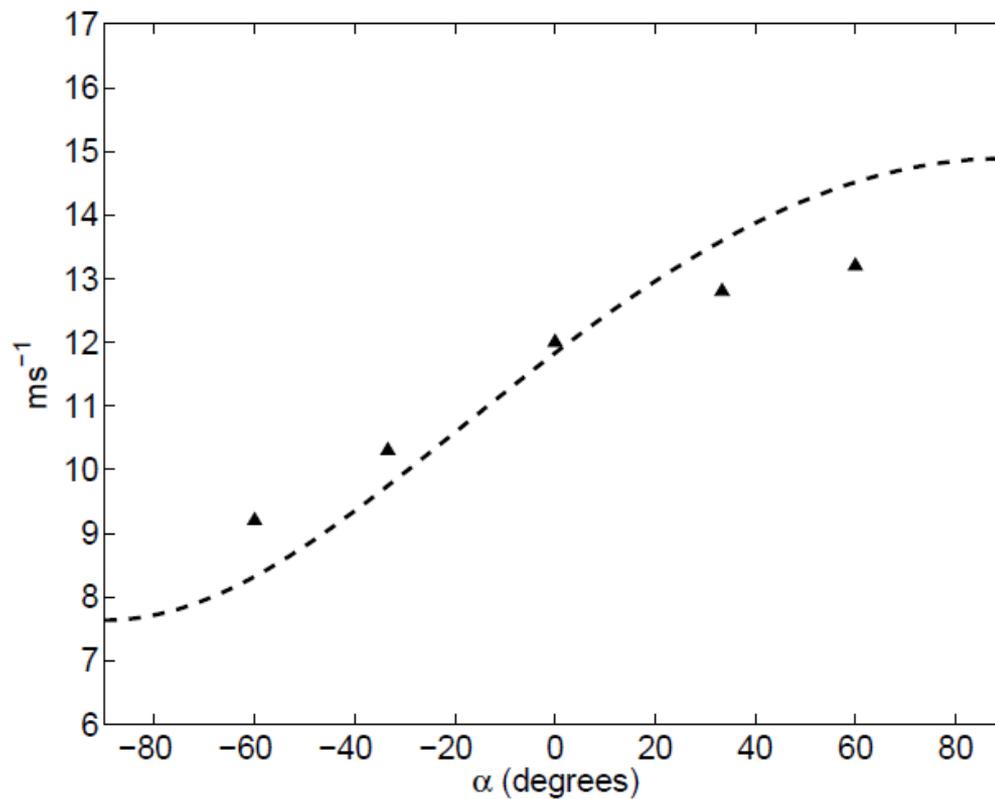
Чувствительность к направлению крупномасштабного геострофического ветра

$$-60^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$$



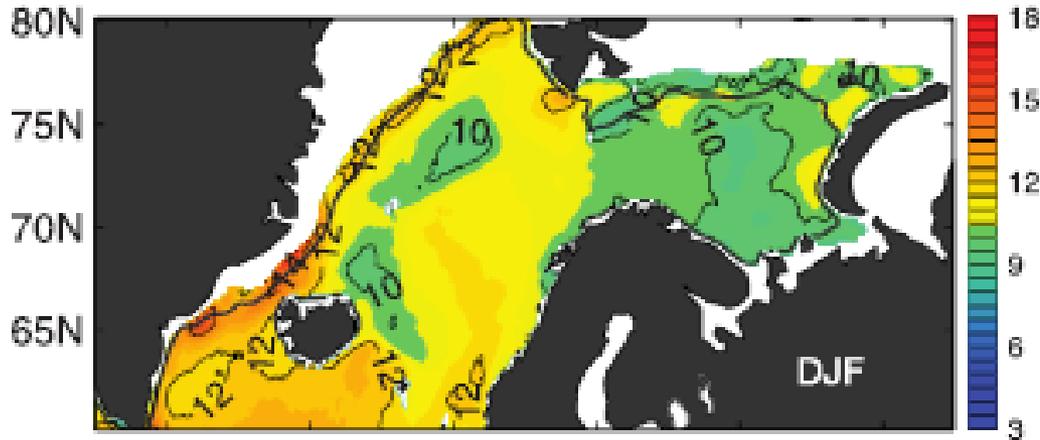
$$\frac{|G_m|}{|V_g|} = \left[1 + 2 \frac{V_{gt} \cdot \mathbf{i}}{|V_g|} \sin \alpha + \left(\frac{V_{gt} \cdot \mathbf{i}}{|V_g|} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$V_{gt} = gz_i / (2f\theta_m) \partial\theta_m / \partial y \cdot \mathbf{i}.$$

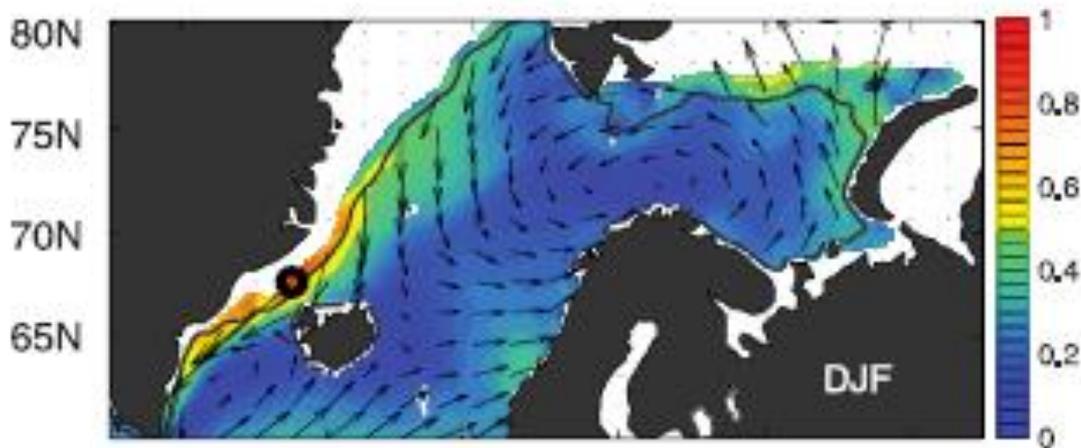


Чувствительность к направлению крупномасштабного геострофического ветра

Кольстад, JGR, 2008:



QuikScat: Модуль приземной скорости ветра, осредненный за зимние месяцы 1999-2007

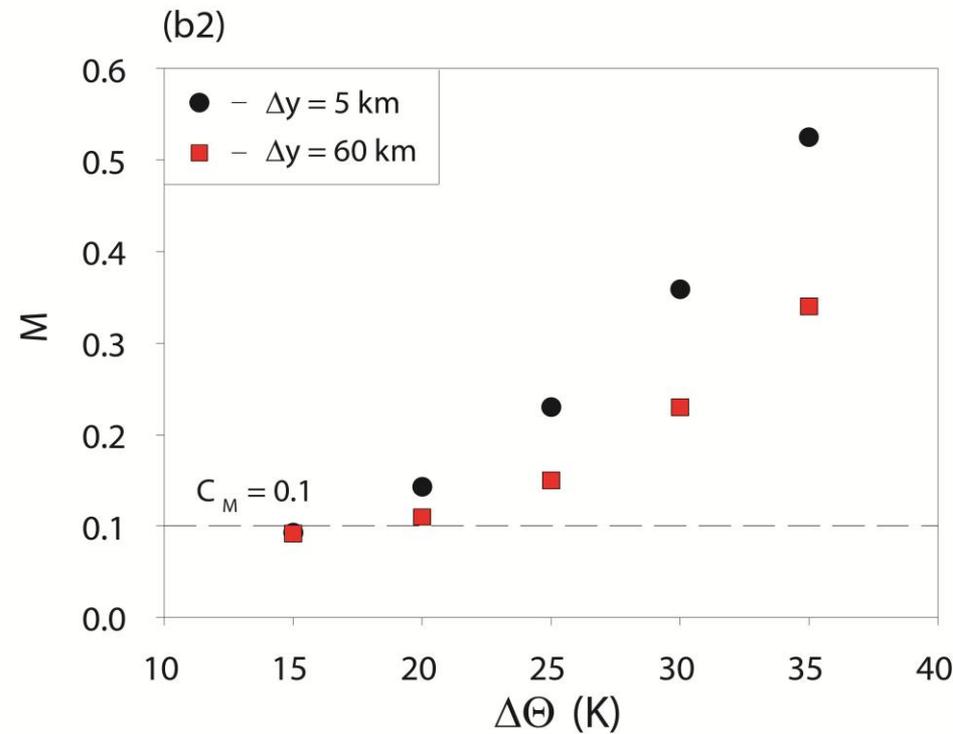
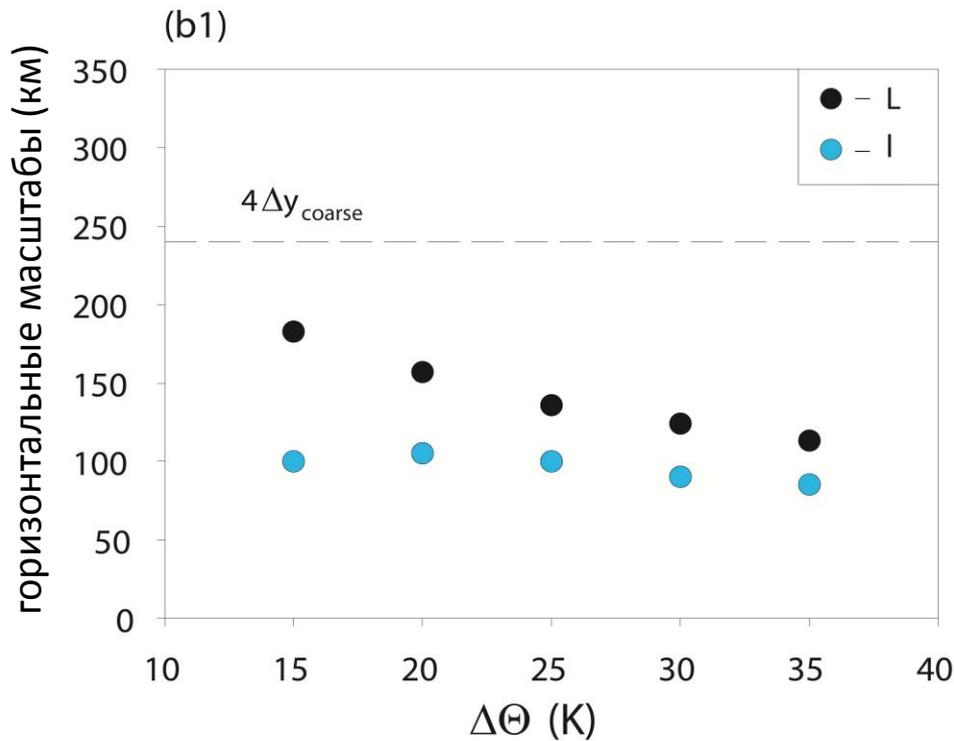


Осредненный вектор скорости ветра и повторяемость этого направления

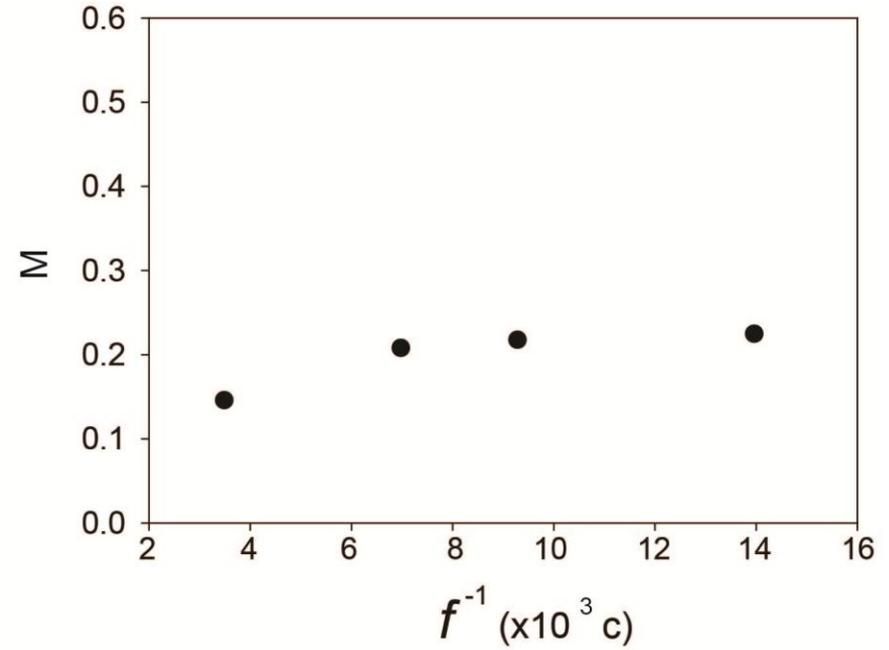
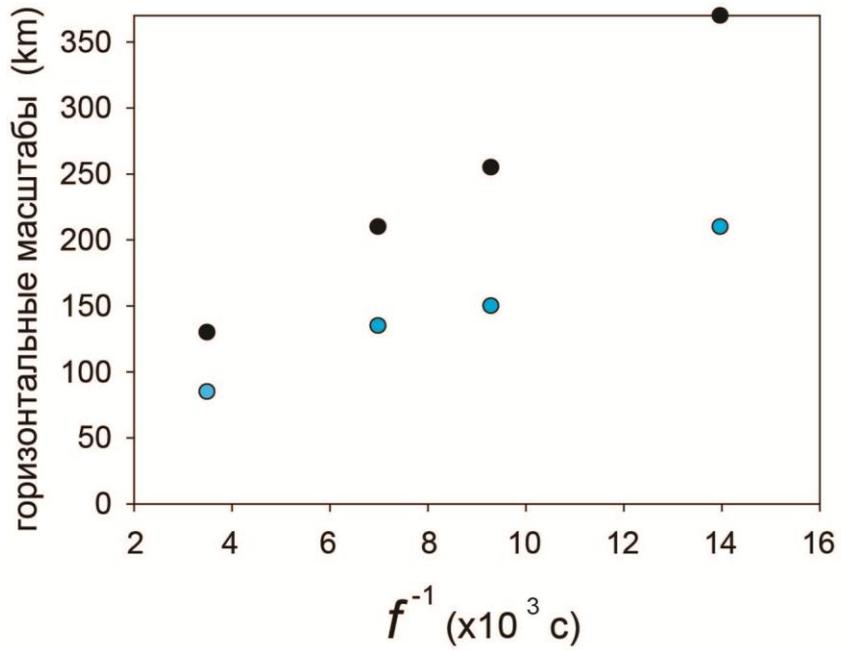
Чувствительность к разности температур поверхности вода - лед

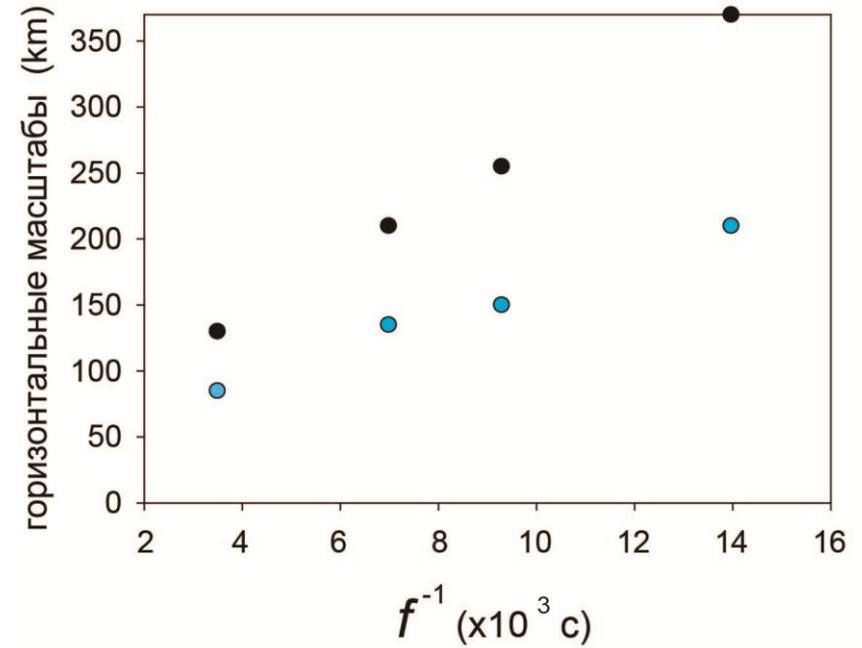
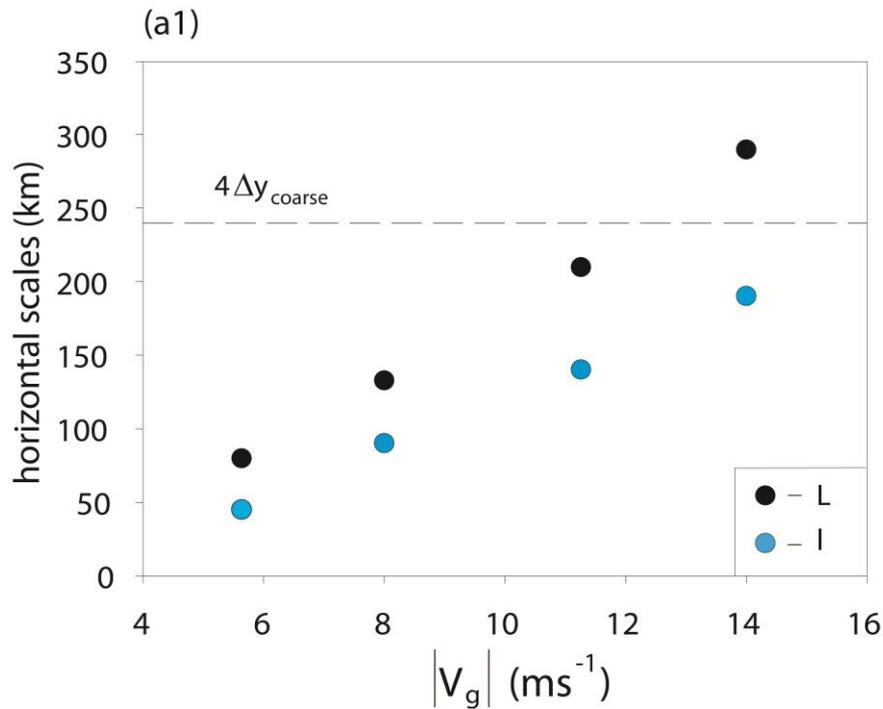
$$15 \text{ K} \leq \Delta\theta \leq 35 \text{ K}$$

$$\frac{|G_m|}{|V_g|} = \left[1 + 2 \frac{V_{gt} \cdot i}{|V_g|} \sin\alpha + \left(\frac{V_{gt} \cdot i}{|V_g|} \right)^2 \right]^{1/2}$$



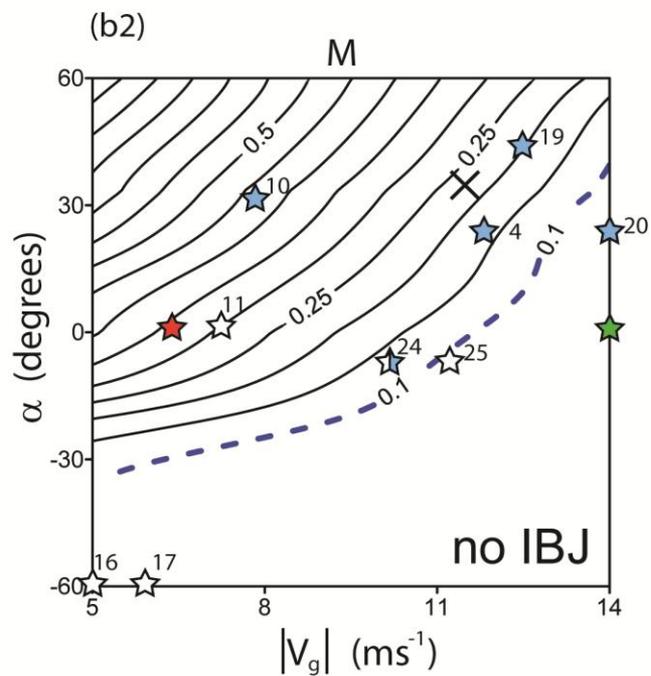
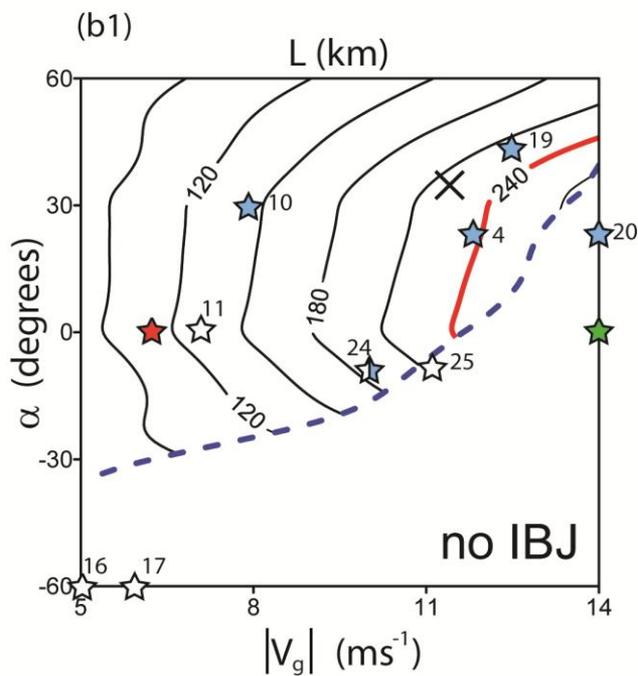
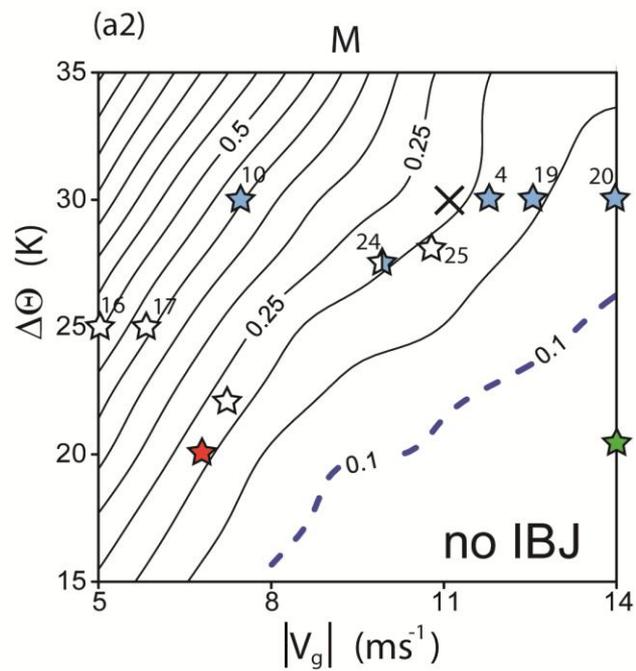
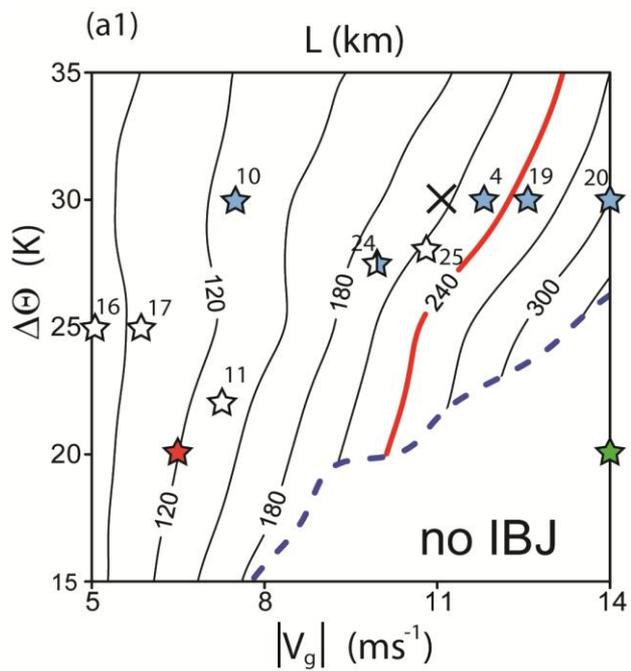
Чувствительность к параметру Кориолиса



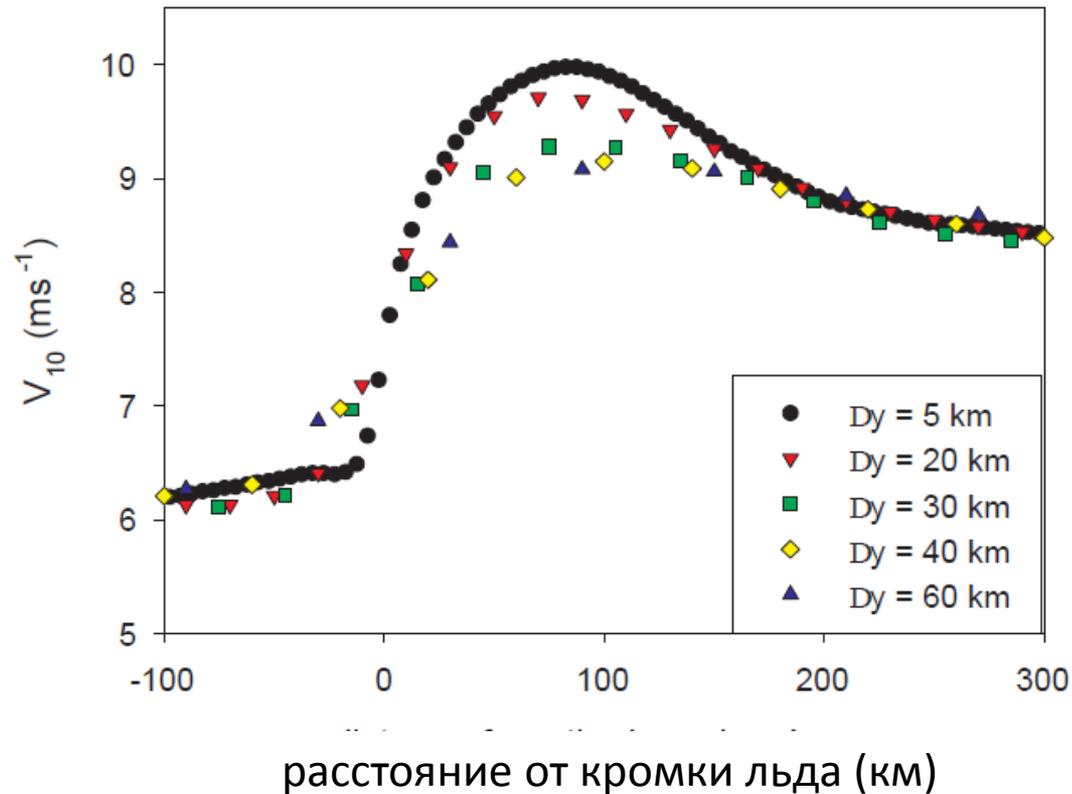


Горизонтальный масштаб СТЛБ пропорционален в некоторой

области параметров радиусу инерционного колебания $\frac{V}{f}$?



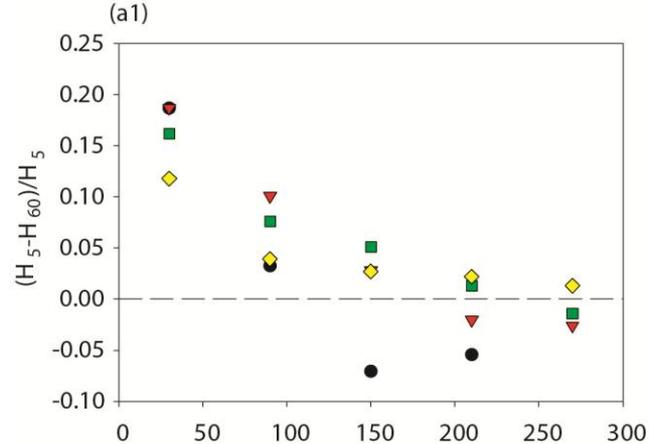
Модуль скорости ветра на 10 м



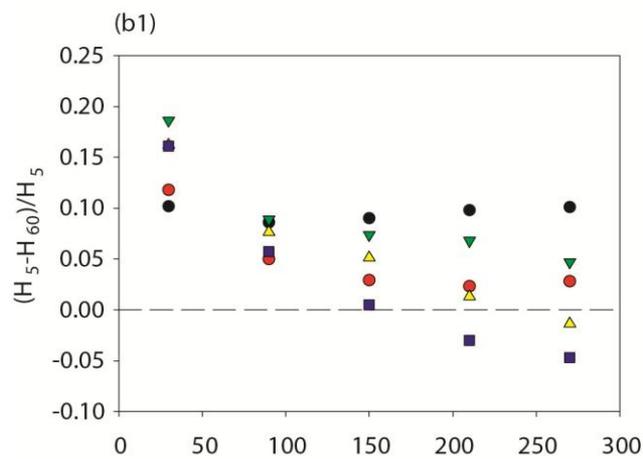
Необходимый шаг сетки:

$$\Delta y_c \approx \frac{L}{7}$$

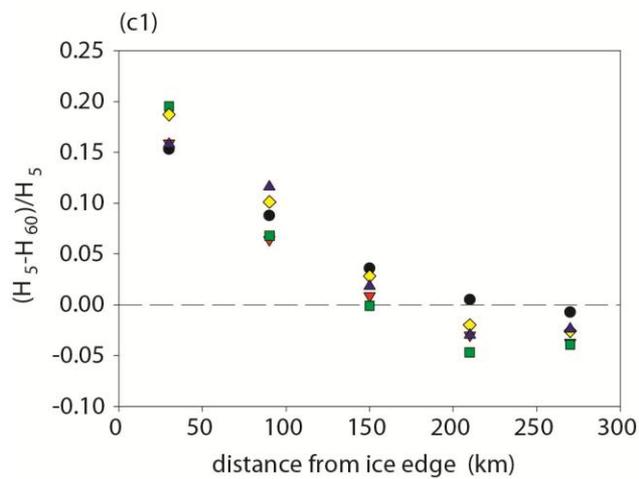
$$5 \text{ mC}^{-1} \leq |V_g| \leq 14 \text{ mC}^{-1}$$



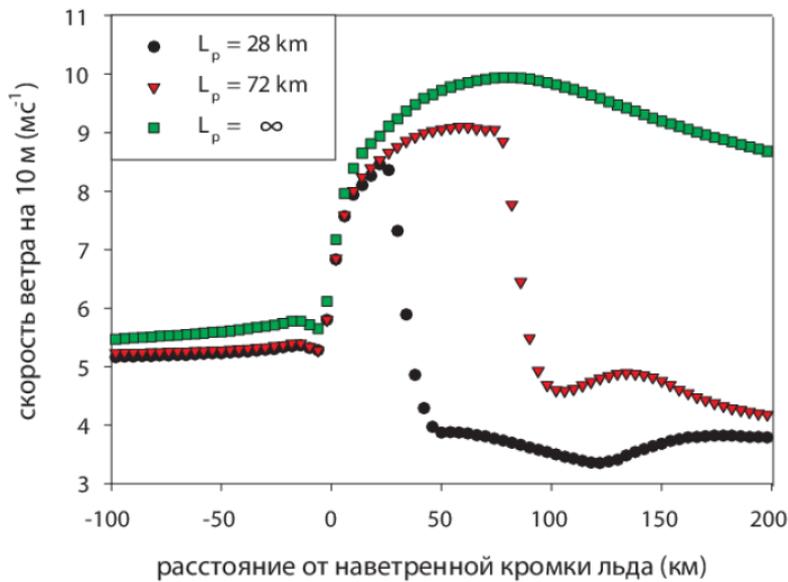
$$-60^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$$



$$15 \text{ K} \leq \Delta\theta \leq 35 \text{ K}$$

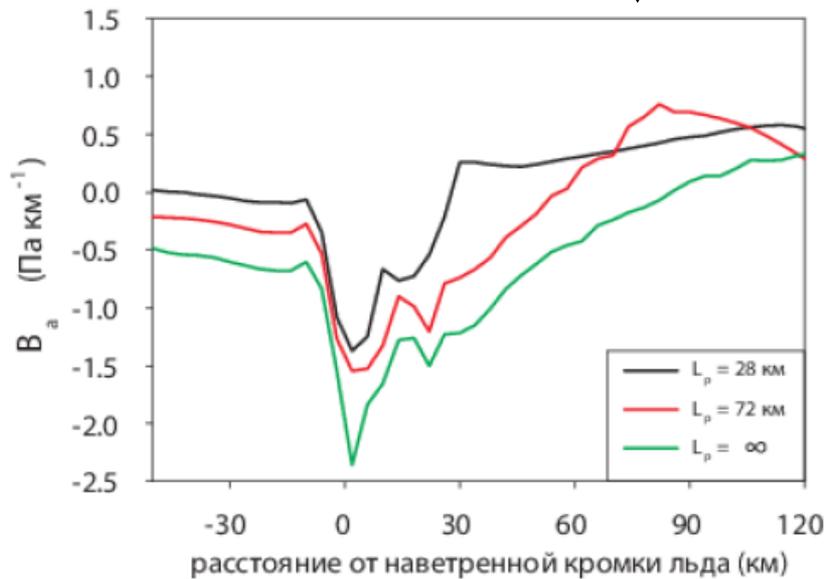
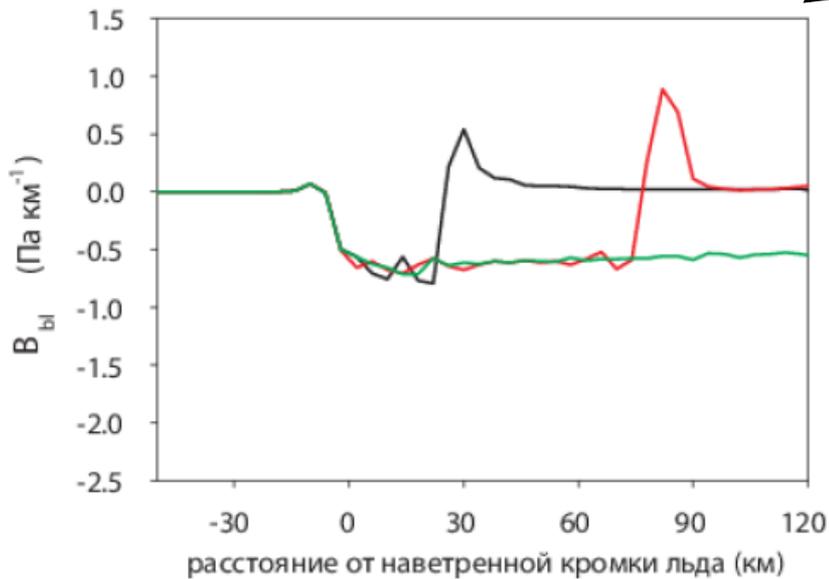


Приложения: полыньи



$$\frac{1}{z_i} \int_0^{z_i} -\rho^{-1} \nabla p dz = f \mathbf{k} \times \mathbf{V}_g +$$

$$+ \frac{g z_i}{2 \theta_m} \nabla \theta_m \quad - g \theta_m \int_H^{z_i} \theta^{-2} \nabla \theta dz$$



Результаты

1. Проведена верификация модели NH3D со встроенными в нее локальным и нелокальным замыканиями турбулентности на основе сравнения с данными наблюдений и результатами моделей METRAS и PALM
2. Выявлена крупномасштабная и мезомасштабная изменчивость метеопараметров во время ХВ. Показано, что СТЛБ – характерная черта ХВ
3. Показано, что крупномасштабная изменчивость модуля скорости ветра связана с трансформацией воздушной массы, а мезомасштабная – с агеострофическими движениями и обратной связью между процессами в АПС и вышележащими слоями.
4. Показано, что горизонтальный масштаб СТЛБ L наиболее чувствителен к $|Vg|$, α , f ; амплитуда M – к $|Vg|$, α и $\Delta\theta$. Дано качественное объяснение чувствительности M к внешним параметрам.
5. Показано, что при использовании $\Delta y = 60$ км недооценка M может составлять до 50%, а потоков тепла и импульса – до 20% в районе 120-180 км от кромки льда. Для воспроизведения СТЛБ с точностью 10% необходимо $\Delta y < L/7$.

6. Показано, что модуль скорости ветра над полынью зависит от ее размера во время натекания на нее холодного воздуха. Это связано с нелокальной обратной связью между процессами в АПС и вышележащими слоями атмосферы.

Автор выражает благодарность:

Репиной И.А., Степаненко В.М., Лыкосову В.Н., Глазунову А.В.,
Грянику В.М., Люпкесу К., Фрике И.

Спасибо за внимание!