



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук



ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук

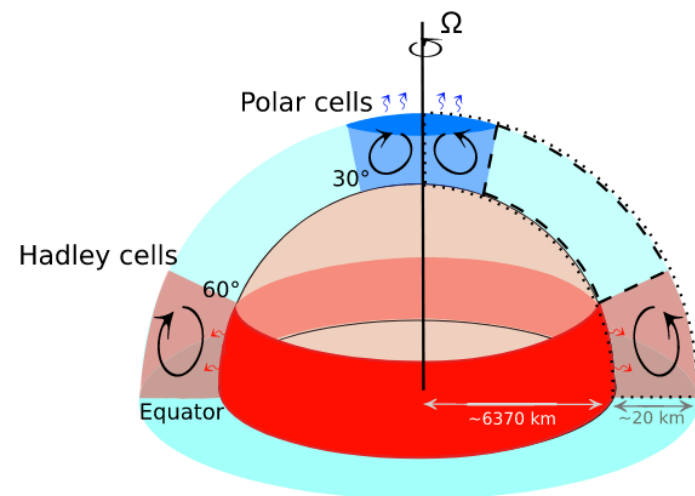
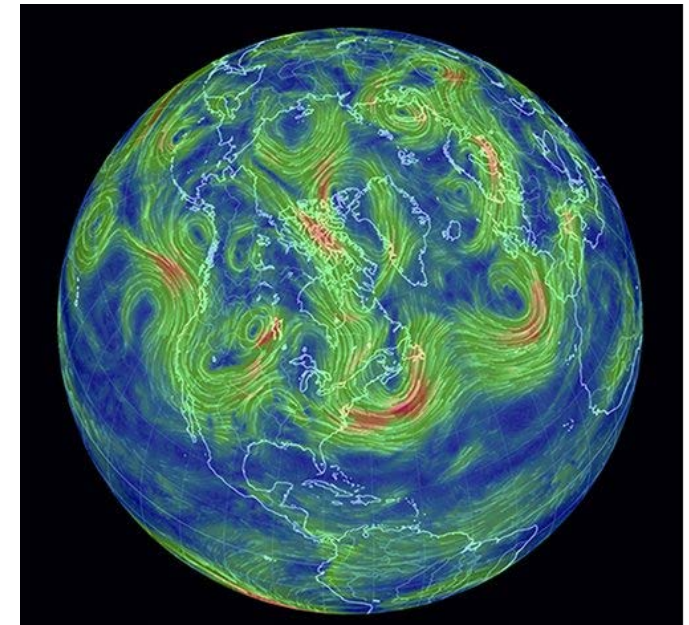
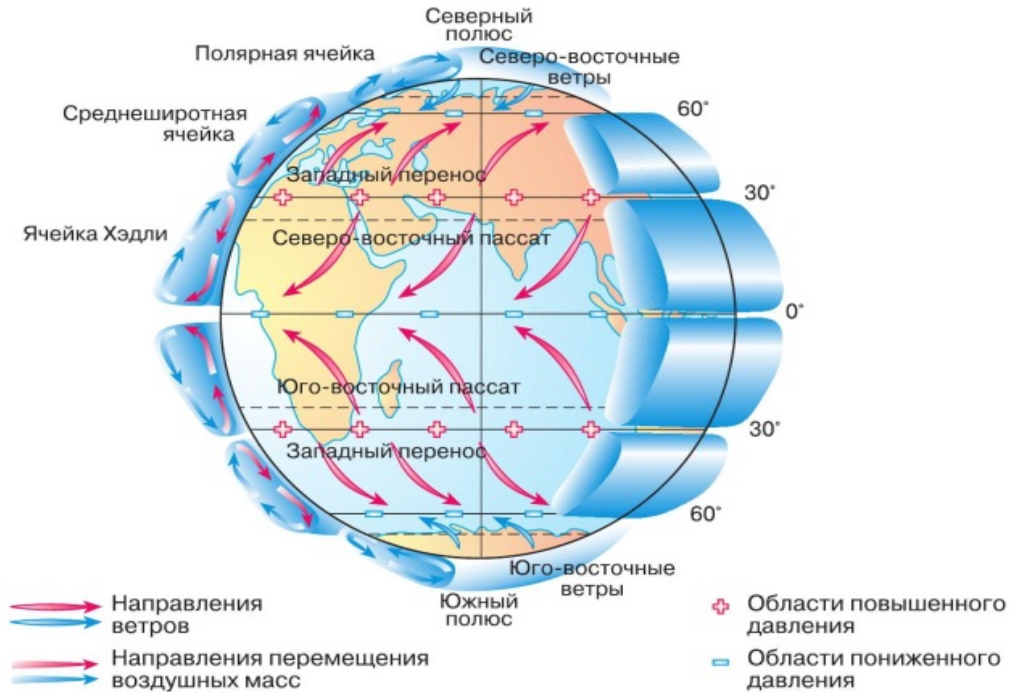
МЕХАНИЗМ АРКТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНОМ АНАЛОГЕ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ

А. Н. Сухановский^а, А.А.Гаврилов^б, А.Ю. Васильев^а, Е.Н. Попова^а

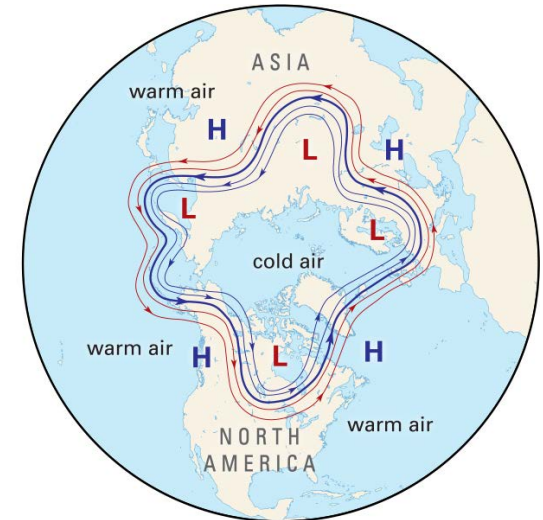
^аИнститут механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

^бИнститут теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Общая циркуляция атмосферы

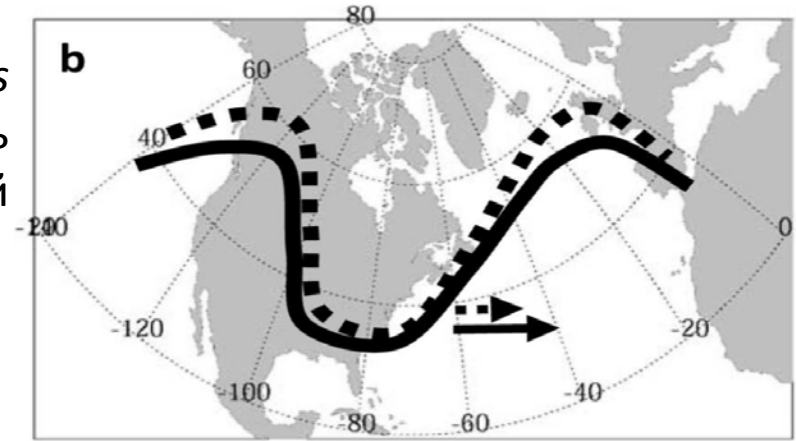


В средних широтах (ячейка Ферреля), аномальная конвективная циркуляция обусловлена бароклинными волнами



Арктическое усиление (ускоренный рост температуры)

Francis and Vavrus. *Geophysical research letters* 39.6 (2012). Утверждается, что есть связь между арктическим усилением и амплитудой волн средних широт. (более 2000 цит.)



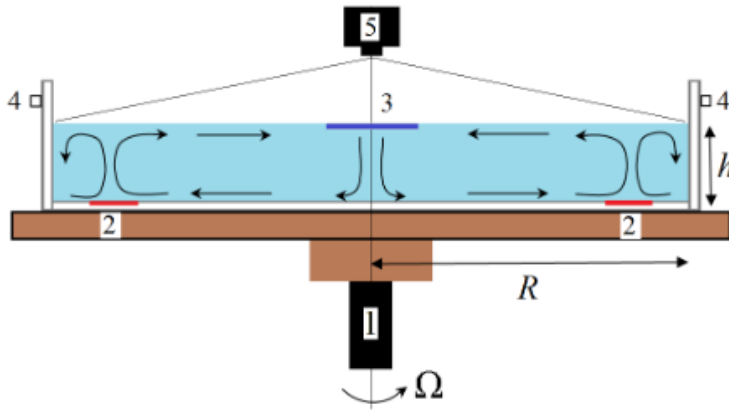
Blackport and Screen.
Science Adv.(2020).

Противоположная точка зрения - нет значительного влияние арктического усиления на длинные волны средних широт в наблюдениях и моделях, наблюдаемая трансформация является результатом внутренних осцилляций среднеширотной циркуляции

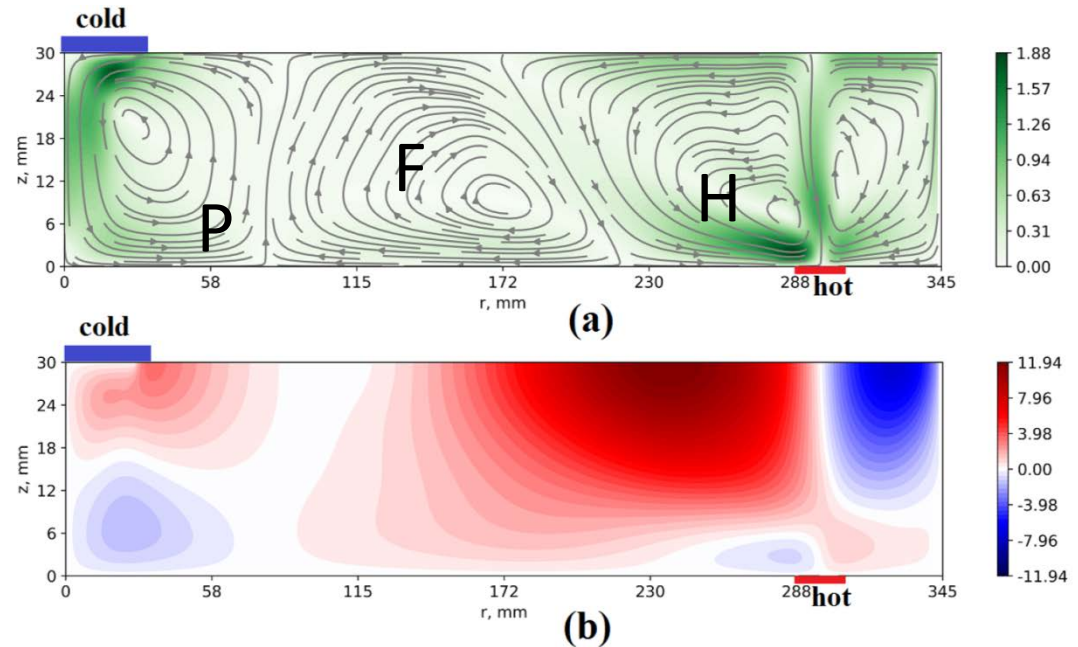
Smith et al. *Nature communications* 13.1 (2022): 727. The Polar Amplification Model Intercomparison Project; Ye et al. *Climate and Atmospheric Science* 7.1 (2024): 20. (very large-ensemble climate model simulations) :

Реакция зимней тропосферной циркуляции на прогнозируемую потерю морского льда в Арктике является устойчивой, но слабой по сравнению с межгодовой изменчивостью.

Лабораторная модель общей циркуляции атмосферы с малым аспектным отношением (модернизированная модель Фульцца)



В лабораторной модели и ее численной реализации воспроизводится циркуляция подобная глобальной циркуляции атмосферы, состоящая из аналогов полярной ячейки, ячейки Ферреля и ячейки Хэдли и бароклинных волн



Sukhanovskii, Popova and Vasiliev. Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 2023

Harlander, U.; Sukhanovskii, A.; Abide, S.; Borgia, I.D.; Popova, E.; Rodda, C.; Vasiliev, A.; Vincze, M. Atmosphere, 2023

Численные расчеты в лабораторной постановке

CFD code σ Flow

Метод конечных объемов, 2 млн.
расчетных ячеек

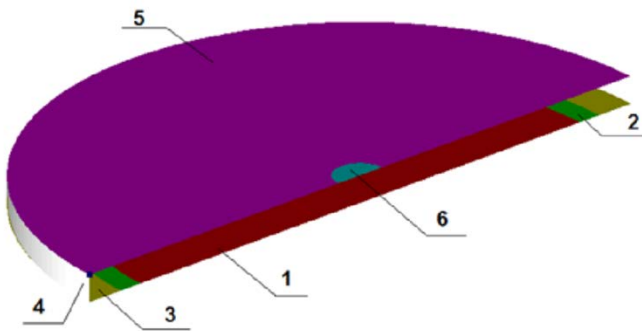
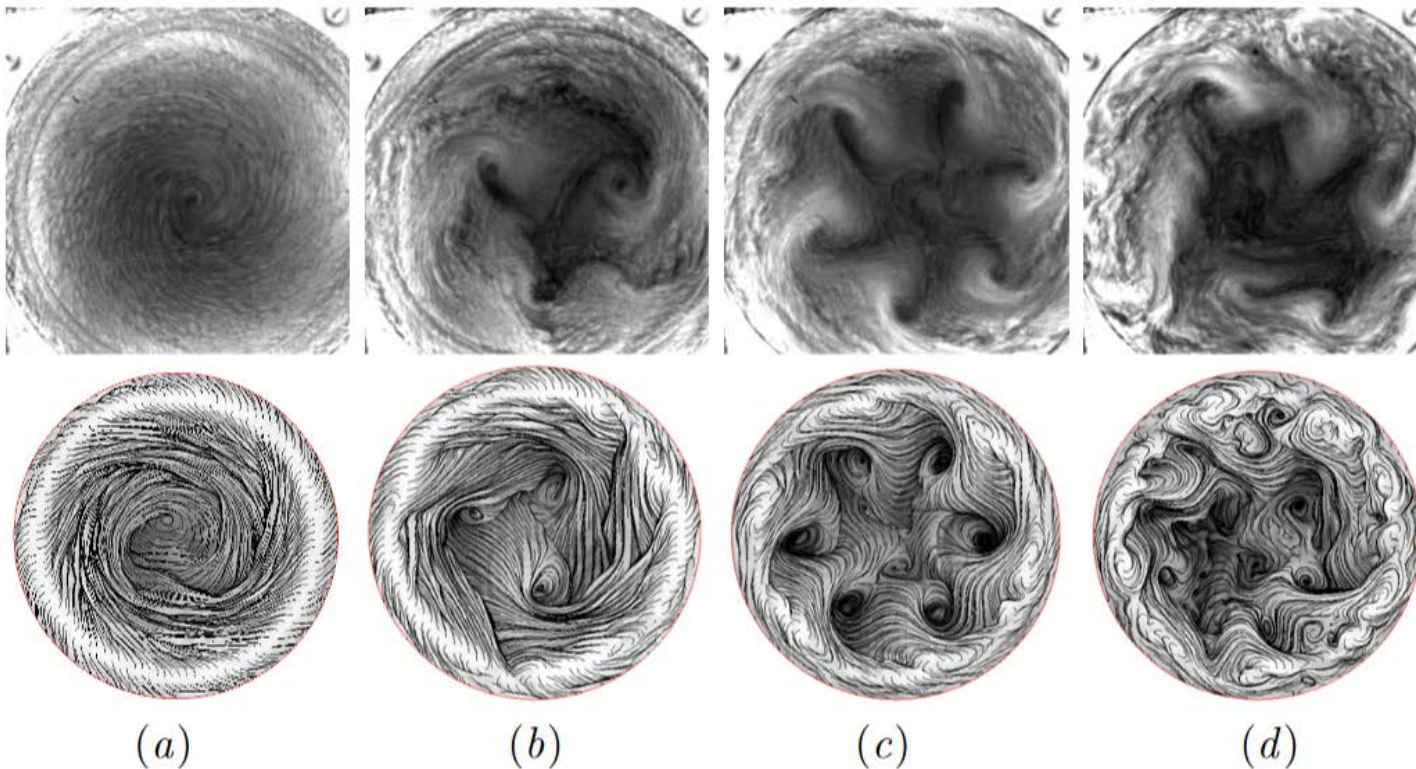
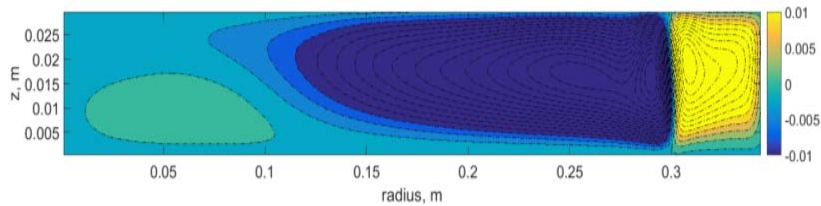


Figure 3. Geometry and boundaries of the computational domain: adiabatic walls (1, 3, 4), rim heater (2), free surface with constant heat flux (5), and cooler (6).

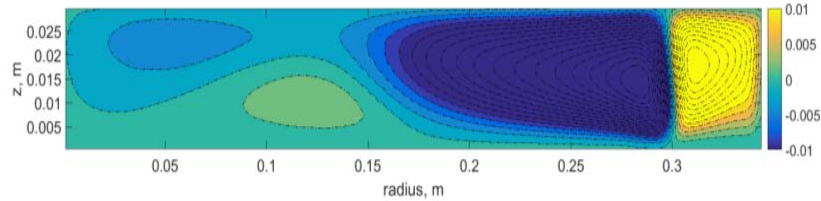


Характерная структура течения в эксперименте и расчете (для различных скоростей вращения)

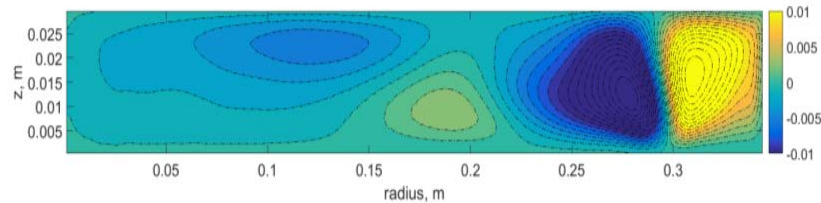
Зависимость меридиональной циркуляции от скорости вращения



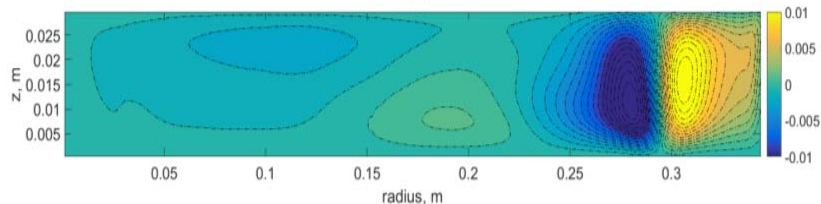
(a)



(b)

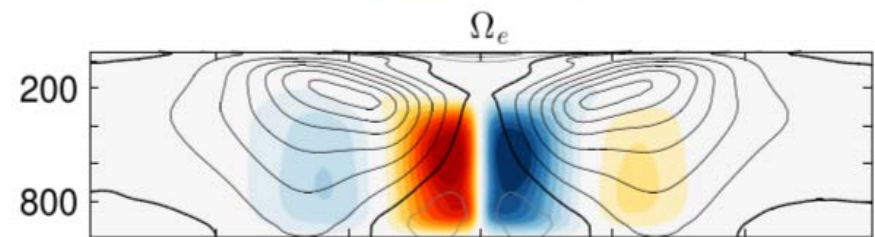
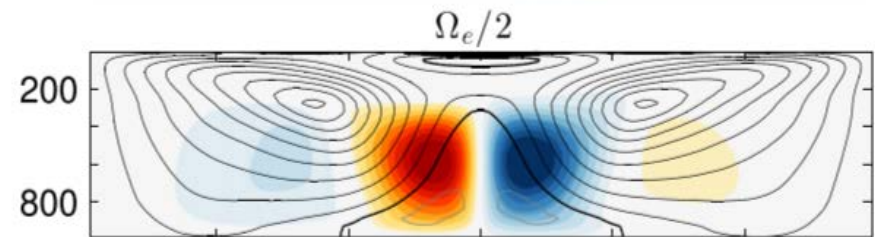
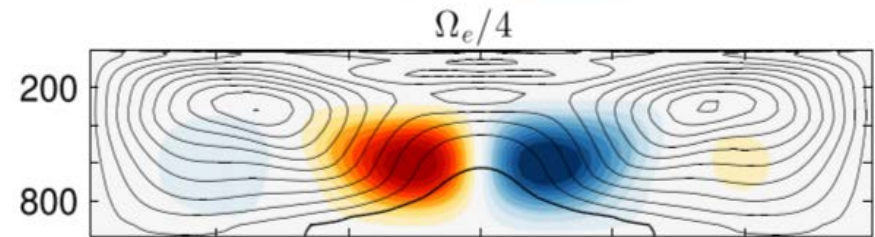
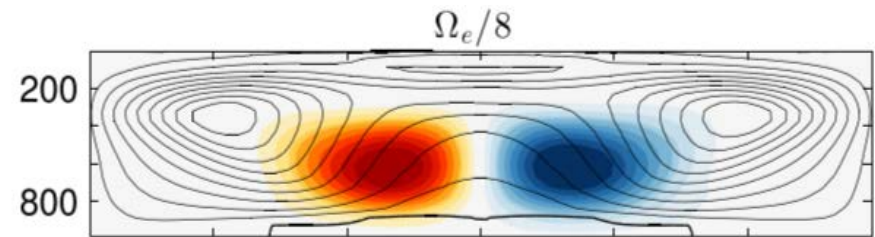


(c)



(d)

Sukhanovskii, et al (2024),
расчеты в лабораторной
постановке

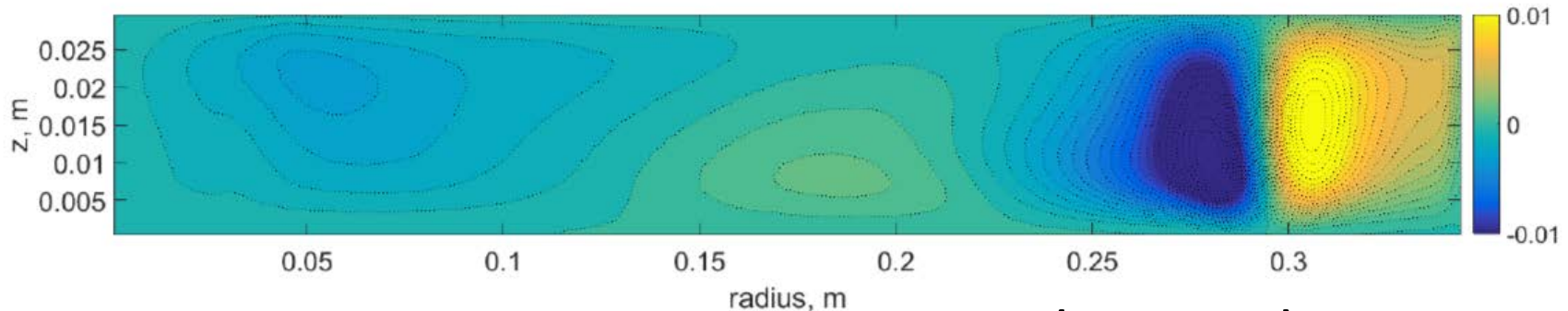


Kaspy, Showman (2015),
моделирование землеподобной
планеты в полномасштабной
постановке

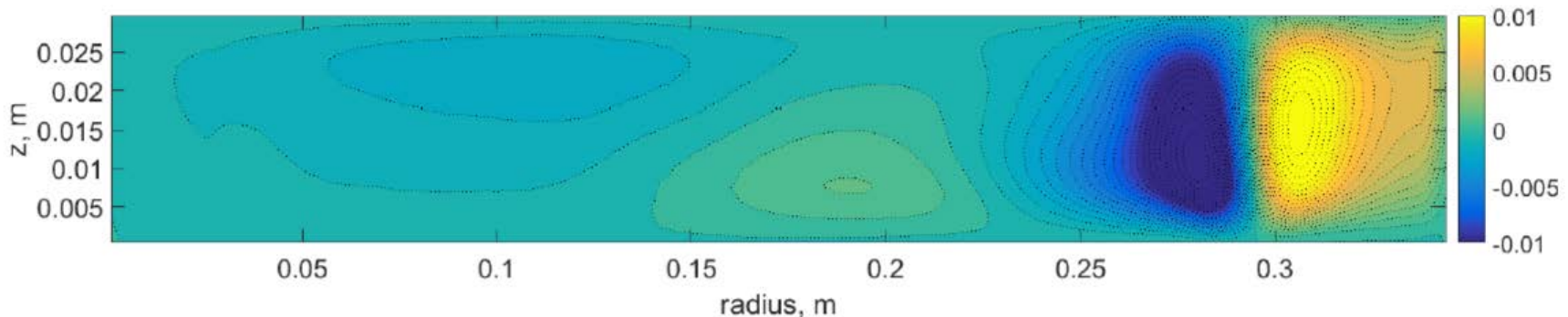
Моделирование арктического потепления

Таяние льдов приводит к уменьшению отражающей способности и как следствие к ослаблению охлаждения

Меридиональная циркуляция :



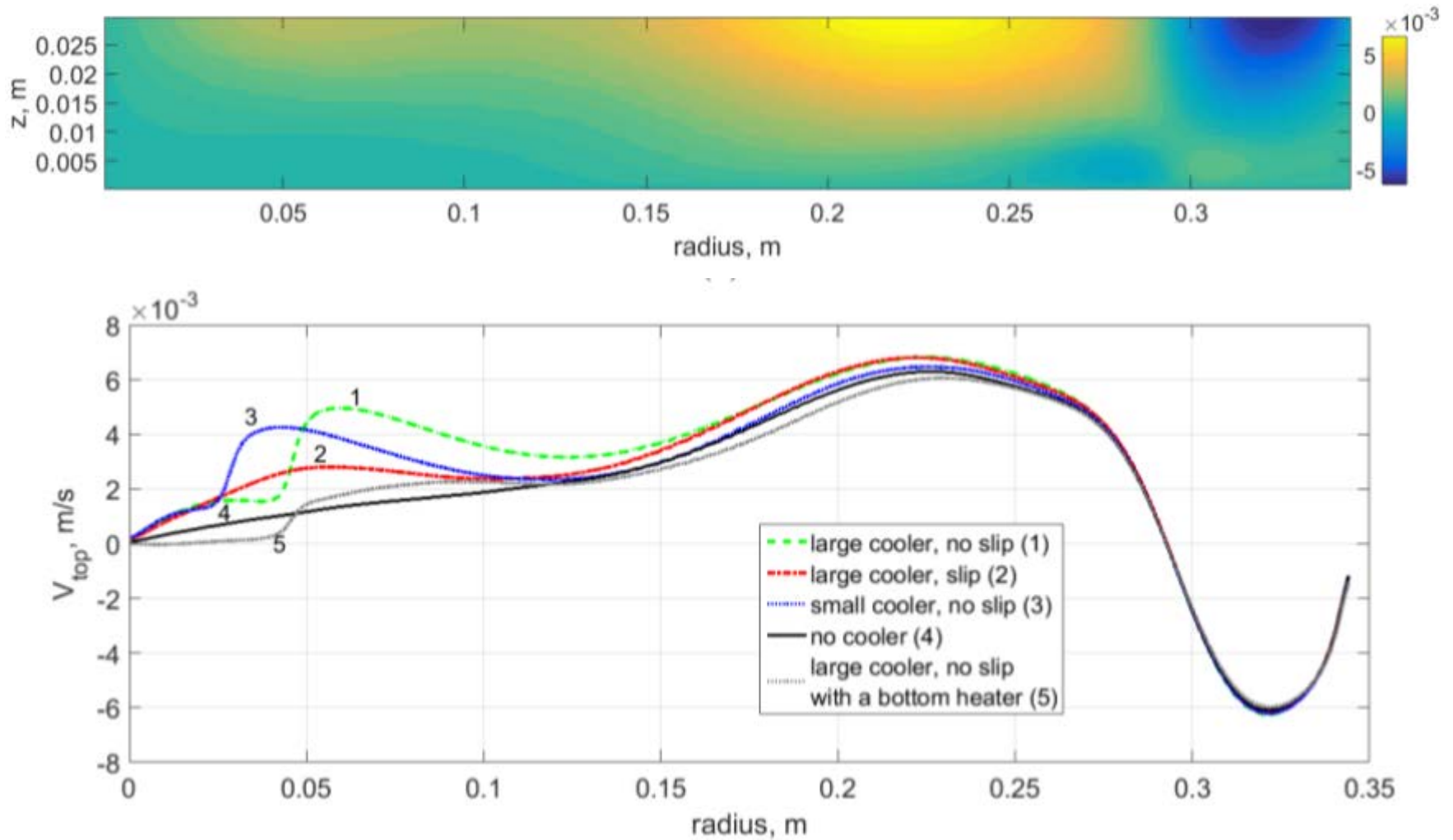
С локализованным охлаждением (льды есть)



Без локализованного охлаждения (льды растаяли)

Заметные изменения наблюдаются только в полярном регионе, полярная ячейка смещается вверх и в более низкие широты

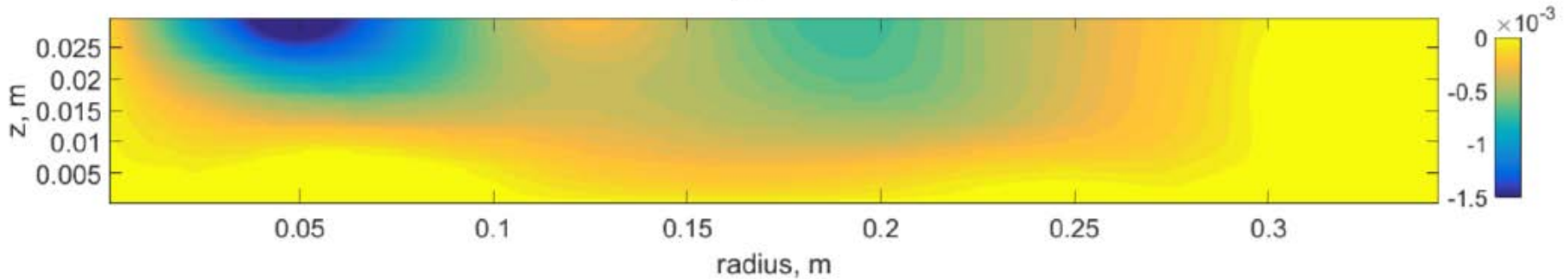
Зональное течение



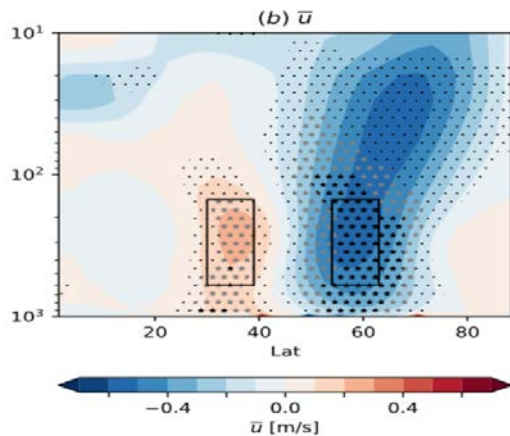
Профили зональной скорости на верхней границе для различных конфигураций холодильника

Изменения в зональной циркуляции

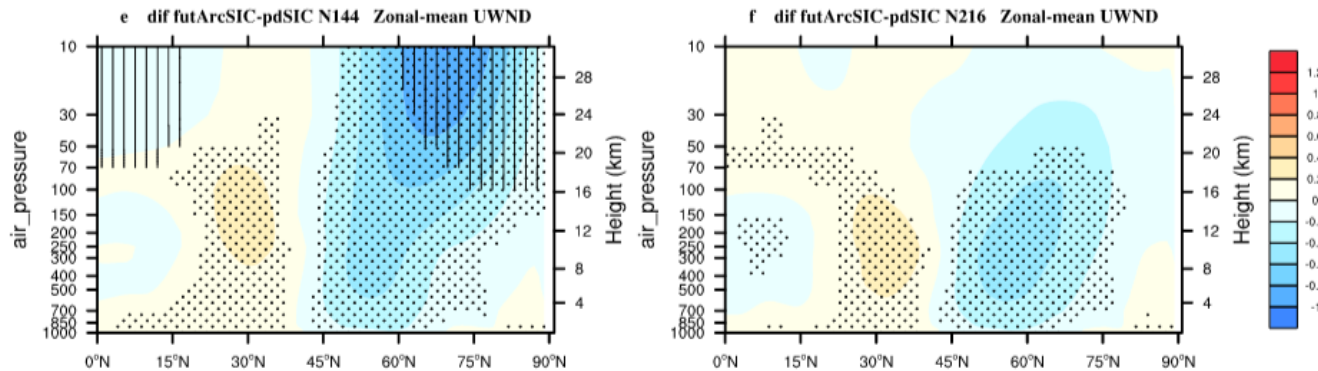
Лабораторный аналог



Моделирование при помощи климатических моделей



Smith et al.(2022)



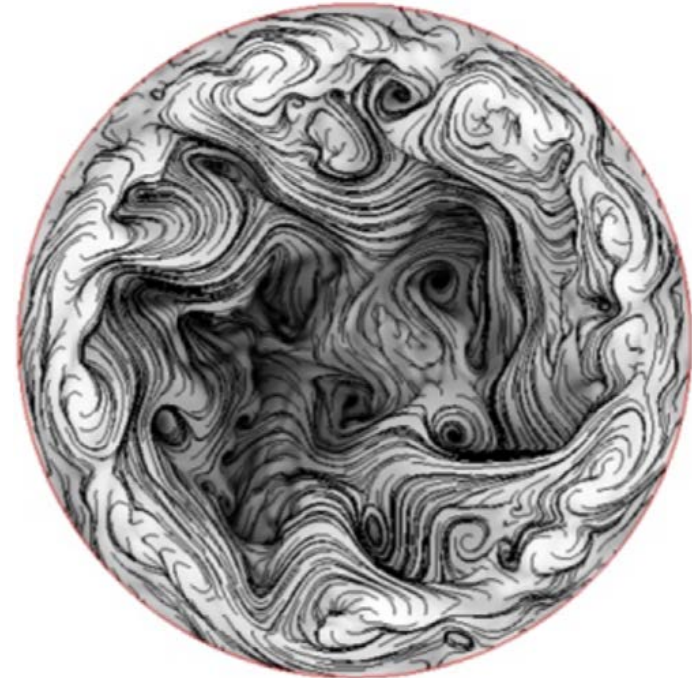
Ye et al. (2024)

И в лабораторном аналоге и полномасштабных климатических моделях наблюдается слабое изменение зонального ветра, а именно уменьшение скорости в средних и высоких широтах.

Влияние арктического потепления на бароклинные волны

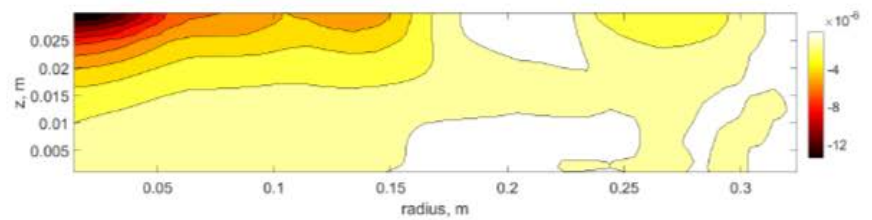
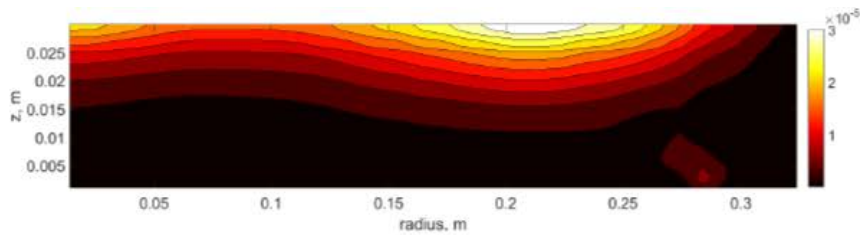


С локализованным охлаждением

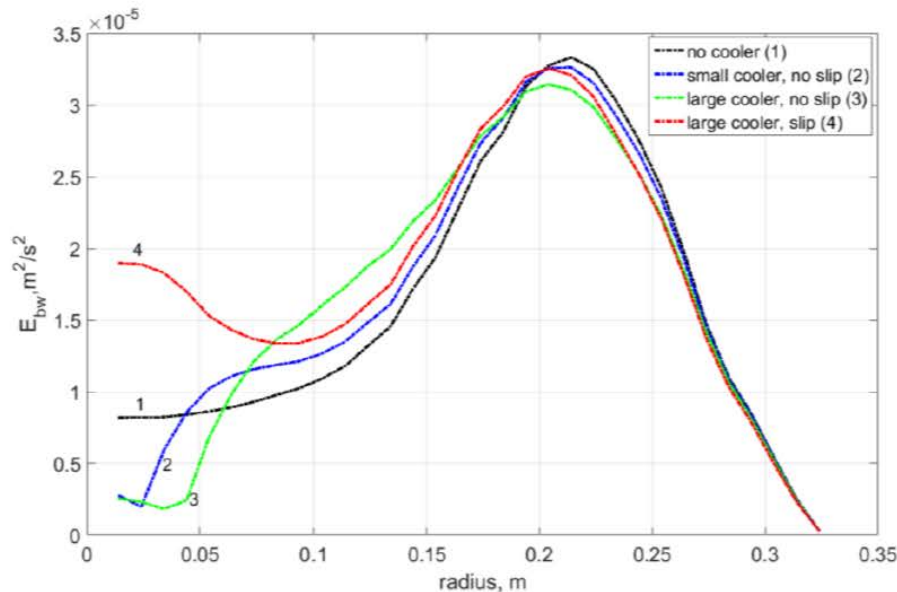


Без локализованного охлаждения

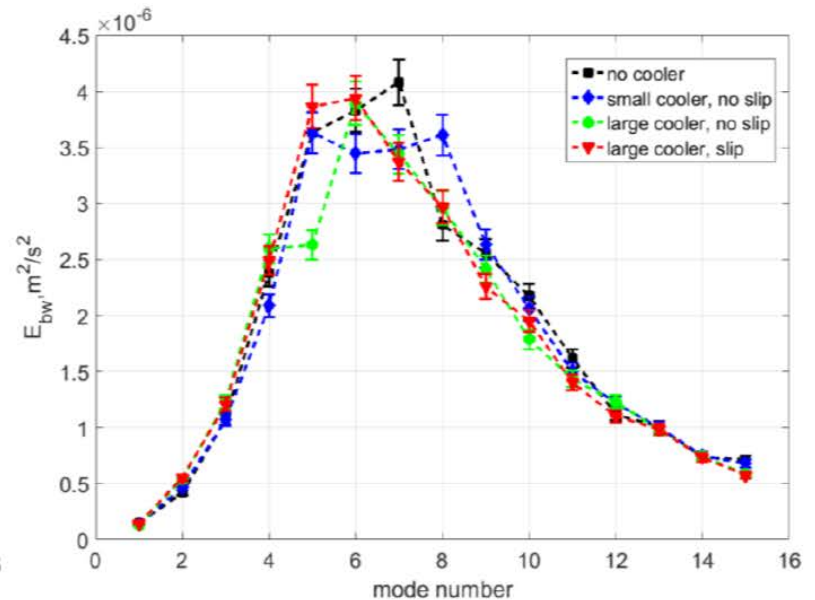
Нет принципиальных качественных изменений в структуре бароклинных волн



Энергия бароклинных волн и их изменение в результате лабораторного потепления

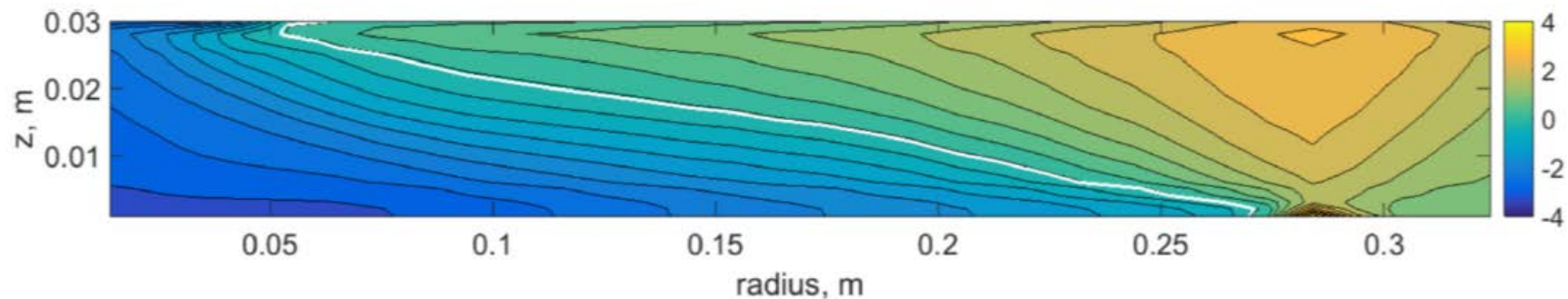


Радиальное распределение энергии бароклинных волн

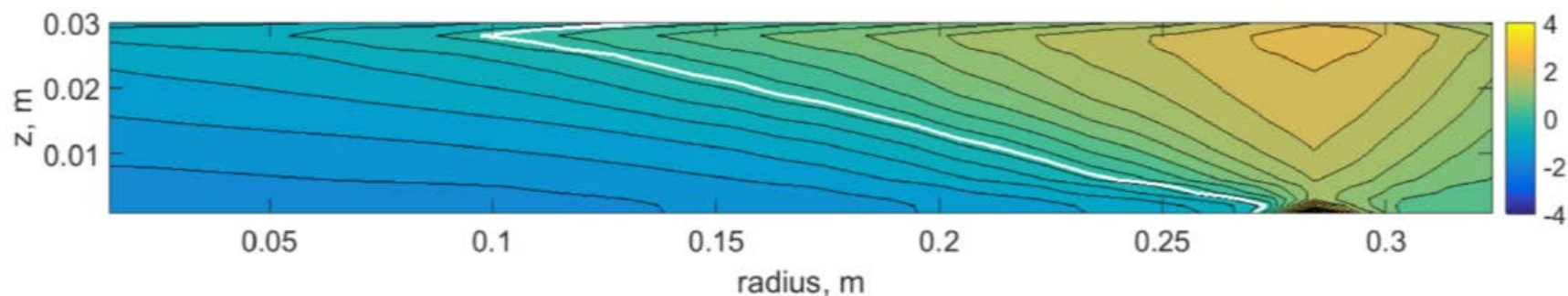


Энергия различных мод бароклинных волн

Арктическое потепление в лабораторной модели не приводит к заметным изменениям в структуре течений средних и низких широт, что хорошо согласуется с результатами моделирования при помощи климатических моделей.

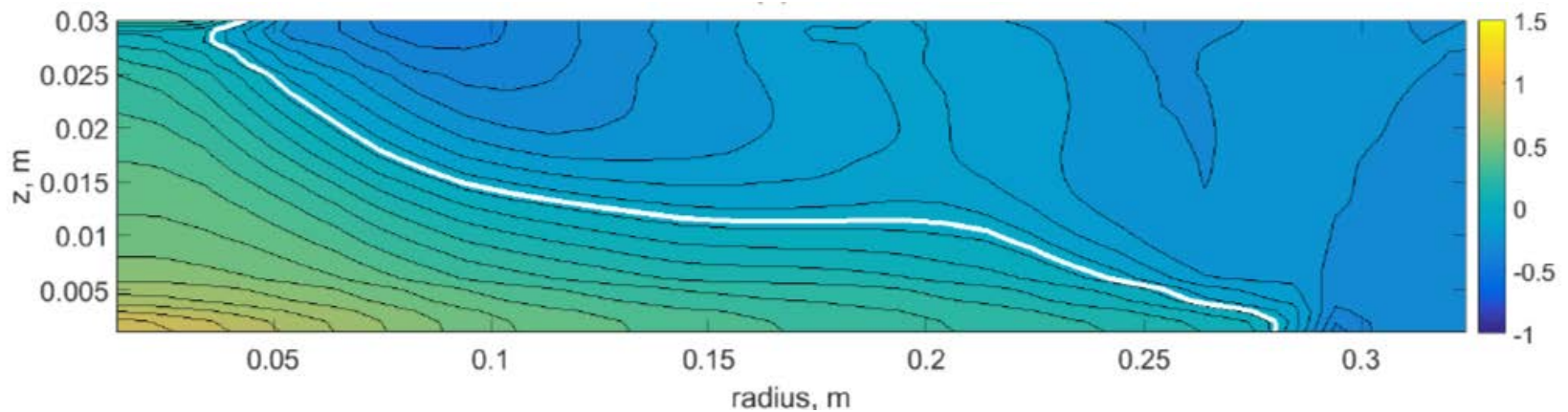


С локализованным охлаждением

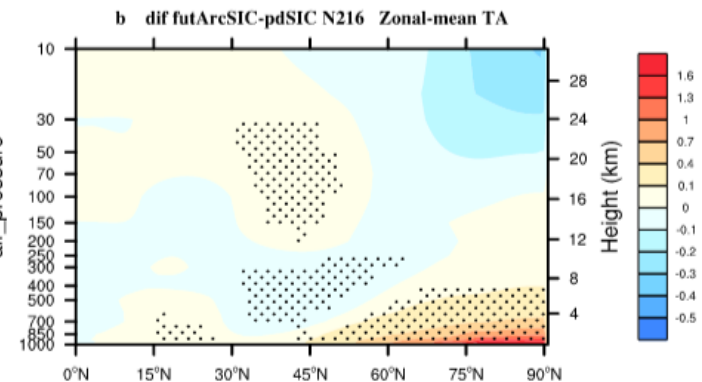
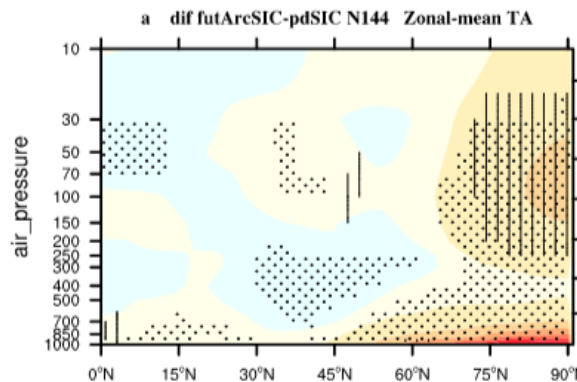
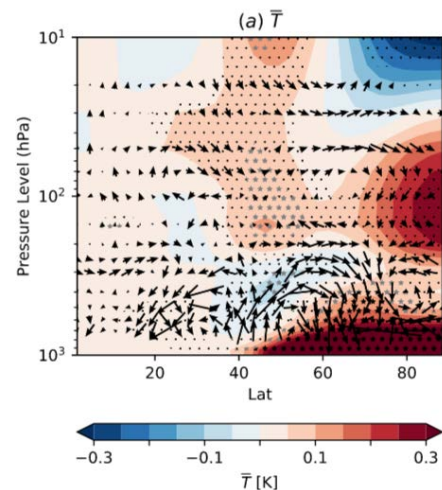


Без локализованного охлаждения

Арктическое потепление в лабораторной модели не приводит к заметным качественным изменениям в пространственном распределении температуры, однако заметны количественные отличия.



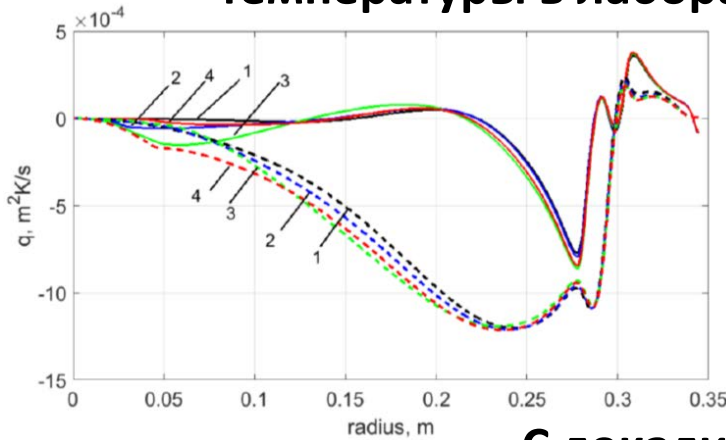
Изменения в распределении температуры в результате лабораторного арктического потепления хорошо согласуются с данными наблюдений (реанализа) и результатов расчетов при помощи ансамбля моделей



Ye et al. (2024)

Smith et al.(2022)

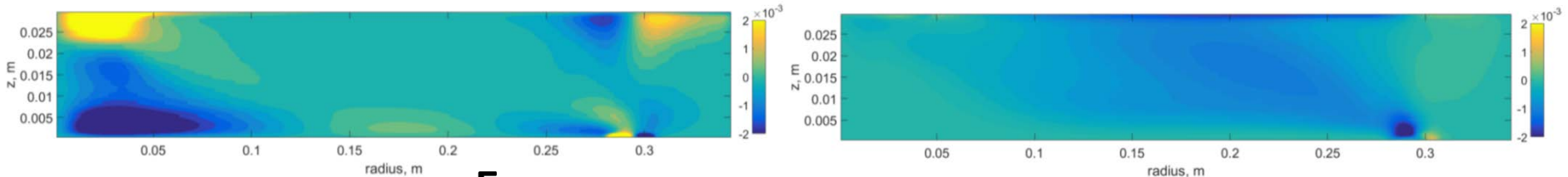
Чем обусловлено наблюдаемое изменение распределения температуры в лабораторной модели?



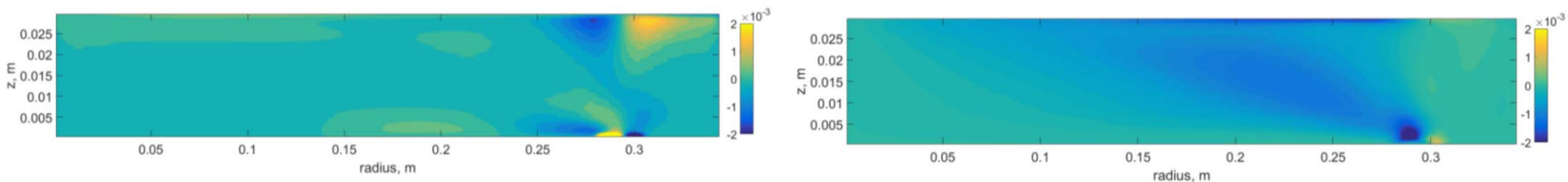
$$q_{\text{full}}(r) = 2\pi r (\langle U_r T \rangle_{\phi, h} + \langle u_r T' \rangle_{\phi, h, t})$$

Профили среднего и пульсационного вкладов полного радиального потока тепла

С локализованным охлаждением



Без локализованного охлаждения



Распределение потока тепла за счет средней циркуляции

Распределение пульсационного потока тепла

Механизм лабораторного арктического потепления заключается в перераспределении потоков тепла в результате ослабления и смещения полярной меридиональной ячейки

Выводы

Лабораторное арктическое потепление приводит к относительно слабому отклику меридиональной и зональной циркуляции, что хорошо согласуется с данными расчетов при помощи ансамбля климатических моделей.

Заметные изменения наблюдаются в полярной области, где аналог полярной ячейки становится слабее, и смещается ближе к средним радиусам, располагаясь преимущественно в верхнем слое. Структура аналогов ячеек Хэдли и Ферреля одинакова для всех рассмотренных конфигураций. Уменьшение скорости зонального потока (аналога западного ветра) и изменение активности бароклинных волн в лабораторных средних широтах составило менее 10 %.

Показано, что заметный рост температуры в арктической области (лабораторное арктическое усиление обусловлен изменениями радиальных потоков тепла. Ослабление и смещение вверх аналога полярной ячейки приводит к значительному уменьшению отрицательного теплового потока вблизи дна. Это неизбежно приводит к повышению температуры в придонном слое.

Sukhanovskii, A. and Gavrilov, A. and Popova, E. and Vasiliev, A. The study of the impact of polar warming on global atmospheric circulation and mid-latitude baroclinic waves using a laboratory analog // Weather and Climate Dynamics, 2024, Vol.5(2), P.863-880