

V Всероссийская конференция с международным участием

Турбулентность, динамика атмосферы и климата

Посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова

19–21 ноября 2024 г. Москва

## О планетарном потоке энергии и производстве энтропии в области струйного течения и земной поверхностью

*В. Крупчатников<sup>1,2,3</sup>, А. Гочаков<sup>2</sup>, В. Градов<sup>1</sup>, И. Боровко<sup>1</sup>, Е. Володин<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт»,  
Новосибирск

<sup>3</sup>ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

<sup>4</sup>ФГБУН Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука, РАН, Москва

## Аннотация

В данной работе обсуждаются некоторые результаты исследования вихревых потоков тепла в районе субтропического струйного течения. Мы обращаем внимание на области противогradientных вихревых потоков тепла в районе субтропического струйного течения в Северном полушарии, связанную с опрокидыванием волн Россби и производство энтропии, за счет горизонтального переноса тепла. Производство энтропии чувствительно к поверхностному покрову, а баланс энтропии в значительной степени связан с радиацией у поверхности. Количественная оценка термодинамического баланса энтропии и производства энтропии является полезной метрикой для оценки взаимодействия системы атмосфера-поверхность. В данной работе представлены некоторые оценки производства энтропии у поверхности.

Традиционный подход к изучению климатической системы фокусируется на динамических механизмах и физических процессах, ответственных за преобразование энергии из одной формы в другую, но подход, основанный на анализе баланса энтропии климатической системы и особенно производства энтропии, также важен.

В исследовании использовалась модель климатической системы INM-CM48, разработанная в ИВМ РАН и учитывающая многие факторы изменения климата.

**Благодарность.** Данное исследование было проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-17-00273 и государственного контракта с ИВММГ СО РАН (FWNM-2022-00030)

# Планетарный поток энергии и баланс энтропии в климатической системе

Стоит задача - для модели климата провести анализ баланса и производства энтропии

- Климатическая система включает в себя огромное количество необратимых процессов, которые производят энтропию. Как и энергия, энтропия является свойством любой термодинамической системы, и ее можно вычислить, если известно состояние системы.
- (Принцип МЕР - скорость производства энтропии  $\sigma$  представляет собой функцию, определенную на множестве стационарных состояний, которая достигает максимума в наиболее вероятном состоянии. При наличии нескольких локальных максимумов обычно полагают, что конечным состоянием равновесия системы будет глобальный максимум.)
- **Внимание к производству энтропии в климатической системе при моделировании климата возобновилось, когда некоторые авторы начали предлагать ее в качестве целевой функции для оптимальной настройки свободных параметров численных моделей для получение хорошего приближения состояния климата.**

Скорость изменения  $ds/dt$  энтропии на единицу массы равна

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{T} \quad (1)$$

где  $Q$  — скорость нагревания на единицу массы, а  $T$  — абсолютная температура. Для атмосферы эта скорость включает в себя радиационное нагревание и охлаждение, выделение скрытой теплота за счет фазовых переходов, нагрев за счет явного тепла и нагрев за счет диссипации трения (Peixoto, J. P. and Oort, A. H., 1992) :

$$Q = -\frac{1}{\rho} \left\{ \operatorname{div} \vec{F}_{rad} + \rho L(e - c) + \operatorname{div} \vec{J}_H + \tau : \operatorname{grad} \vec{u} \right\} \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха,  $L$  - скрытая теплота конденсации,  $c$  и  $e$  - скорости конденсации и испарения на единицу массы,  $F_{rad}$  - радиационный поток (солнечный плюс земной),  $J_H$  - поток явного тепла за счет теплопроводности,  $\tau$  - тензор напряжений ветра, а  $u$  - скорость ветра.

В климатической системе вклад в общее производство энтропии вносят два совершенно разных набора процессов. Первый набор процессов ответственен за необратимую **термализацию фотонов**, испускаемых вблизи солнечной короны при температуре примерно 5700 К, при гораздо более низких температурах, типичных для климата Земли. Средняя скорость производства энтропии для нашей планеты, составляет около 0,90 Вт/м<sup>2</sup> К<sup>-1</sup>. Оставшийся вклад приходится на процессы, ответственные за перемешивание и диффузию внутри земной системы, а также на диссипацию кинетической энергии за счет вязких процессов. Это представляет собой так называемое производство **материальной энтропии** и считается величиной, представляющей основной интерес с точки зрения свойств климатической системы.

Климат, по сути, является системой, производящей энтропию. Движение энергии из более теплых регионов, откуда она подается, в более холодные регионы, является неизбежным следствием второго закона термодинамики и управляет движением и активностью климата. Передача энергии осуществляется множеством необратимых процессов: например, ветром, осадками и радиацией. Каждый процесс производит энтропию, которую необходимо экспортировать из системы, чтобы поддерживать устойчивое состояние. Экспорт осуществляется радиационным путем; Подача солнечной радиации с низкой энтропией и потеря исходящего теплового излучения с высокой энтропией в конечном итоге приводят к переносу энтропии из системы и поддержанию температурных градиентов. Наша климатическая система существует в таком балансе.

Разделив баланс энтропии радиации и сплошной среды климатической системы и взяв средние значения, можно вывести следующее уравнение

$$\int_V \left[ \frac{\overline{\dot{q}_{rad}}}{T} + \overline{\dot{s}_{mat}} \right] dV \approx 0$$

где интеграл по всему объему  $V$  климатической системы,  $\dot{q}_{rad}$  — скорость радиационного нагрева, — мгновенная удельная скорость производства материальной энтропии за счет необратимых процессов в среде,  $T$  — температурное поле. Для  $\dot{s}_{mat}$  обычно принимают следующее выражение:

$$\dot{s}_{mat} = \frac{KE_{diss}}{T} + Flux_{SH} \cdot \nabla \left( \frac{1}{T} \right) + Flux_{LH} \cdot \nabla \left( \frac{1}{T} \right)$$

где  $KE_{diss}$  — удельная скорость диссипации кинетической энергии,  $Flux_{SH}$  — турбулентный поток явного тепла,  $Flux_{LH}$  — турбулентный поток скрытого тепла

## Вихревые потоки тепла

В некоторых исследованиях (например, Murakami, 1962; Peng, 1963, 1965) показано, что противогradientный перенос тепла крупномасштабными вихрями является общей чертой всей нижней стратосферы. Это, безусловно, приводит нас к мысли, что противогradientный перенос тепла может быть основным фактором в поддержании положительного меридионального градиента температуры в нижней стратосфере, поскольку он предполагает конвергенцию тепла в высоких широтах и дивергенцию тепла в низких широтах, если тепловые потоки не пересекают экватор. Тогда возникает вопрос: почему крупномасштабные атмосферные движения организованы так, что горизонтальный вихревой перенос тепла в среднем противогradientный в нижней стратосфере и верхней тропосфере, но gradientный нисходящий в тропосфере?

Стационарное уравнение вихревой потенциальной энергии (ВПЭ) связывает поток тепла через средний температурный градиент  $(\overline{\vec{v}'T'} \cdot \nabla \overline{T})$ , скорость преобразования ВПЭ в кинетическую энергию вихря  $(\overline{w'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial z})$  и адвекцию ВПЭ  $(\overline{\vec{v}} \cdot \nabla \cdot \frac{\overline{T'^2}}{2})$ . Если пренебречь источниками и диссипацией тепла и малой адвекцией ВПЭ вихревой скоростью, то можно записать

$$\overline{\vec{v}} \cdot \nabla \cdot \frac{\overline{T'^2}}{2} + \overline{\vec{v}'T'} \cdot \nabla \overline{T} + \overline{w'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \approx 0$$

где  $\overline{\vec{v}}$  - горизонтальная скорость,  $w$  - вертикальная скорость,  $T$  - температура; верхняя черта представляет среднее время по сравнению со временем жизни вихря, штрих – отклонение от среднего.

В области бароклинических неустойчивых вихрей, потеря ВПЭ за счет преобразования в

кинетическую энергию вихрей  $\overline{w'T'} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} > 0$  и его переносом вниз по течению  $\overline{\vec{v}} \cdot \nabla \cdot \frac{\overline{T'^2}}{2} > 0$ ,

уравновешивается градиентным переносом тепла  $\overline{\vec{v}'T'} \cdot \nabla \bar{T} < 0$ . В областях затухания вихрей, с

малым или отрицательным значением  $\overline{w'T'} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$ , пространственное затухание вихрей  $\overline{\vec{v}} \cdot \nabla \cdot \frac{\overline{T'^2}}{2}$

$< 0$  часто приводит к противогradientному переносу тепла  $\overline{\vec{v}'T'} \cdot \nabla \bar{T} > 0$ .

На рисунках указаны области градиентных и противогradientных вихревых потоков тепла на поверхности 200 гПа на основе данных реанализа ERA5 для зимнего и летнего сезона и то же на основе данных моделирования модели ИВМ РАН.

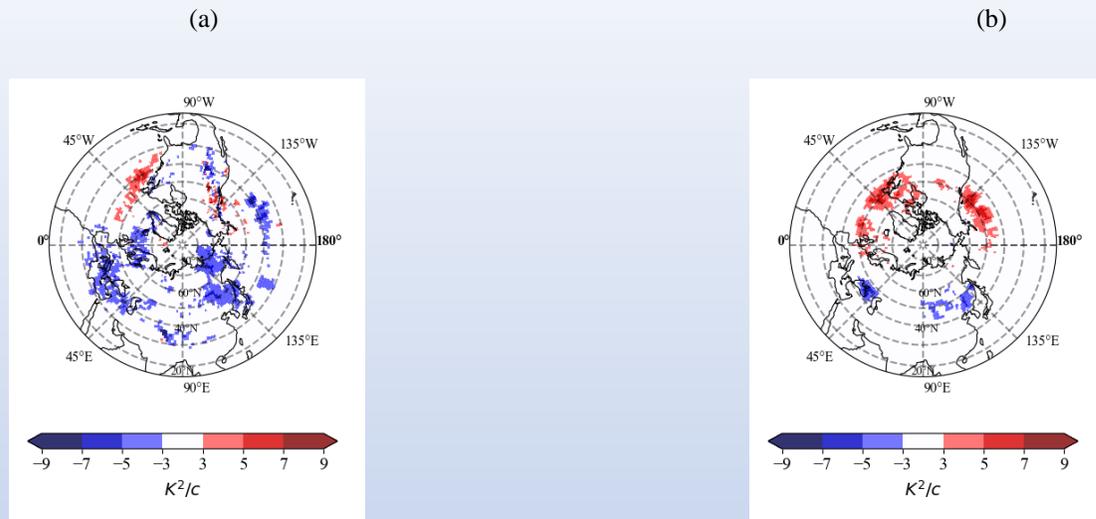


Рис. 4. Области с градиентным (синий) и противоградиентным (красный) вихревым потоком тепла на 200 гПа по данным реанализа ERA5 для сезонов: зима (а), лето (б)

1.

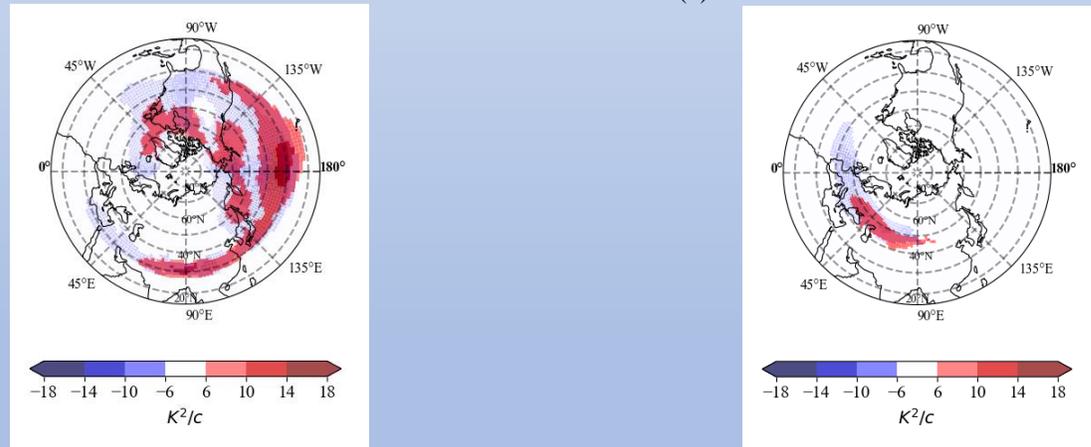
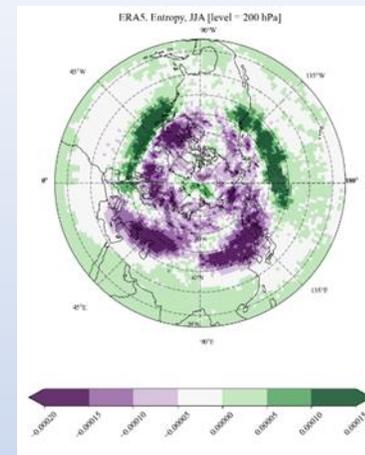
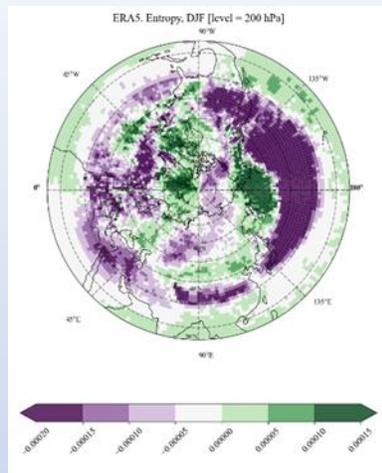
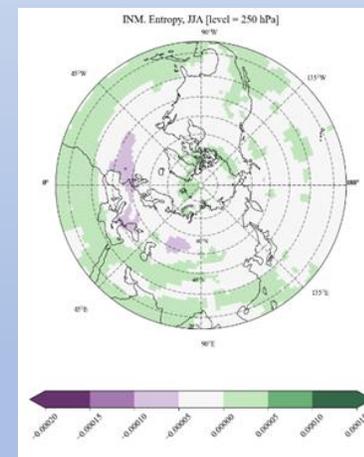
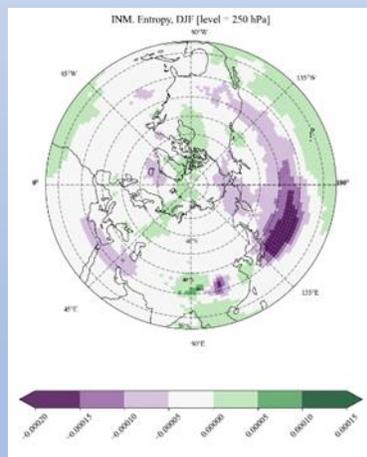


Рис. 5 Области с градиентным (синий) и противоградиентным (красный) вихревым потоком тепла на 250 гПа по данным модели ИВМ (СМIP6) для сезонов: зима (а), лето (б)



Удельная скорость производства материальной энтропии за счет вихревых потоков тепла по данным реанализа ERA5 для сезонов: зима (a), лето (b)



Удельная скорость производства материальной энтропии за счет вихревых потоков тепла по данным модели ИВМ РАН (СМIP6) для сезонов: зима (a), лето (b)

## **Планетарный поток энергии и баланс энтропии на поверхности Земли.**

Солнце - основной источник энергии на Земле. Поступающая солнечная радиация распределяется на различные компоненты благодаря рассеивающим, отражающим, пропускающим и поглощающим характеристикам поверхности Земли и атмосферы. Чистая радиация разделяется на поток ощутимого тепла, поток скрытого тепла и поток почвенного тепла, т.е. известный как энергетический баланс поверхности (ЭБП), который чрезвычайно важен для любых моделей поверхности земли для развития гидрологических, экологических и биогеофизических процессов. Основное уравнение ЭБП может быть выражено следующим образом:

$$R_n = G + H + LE,$$

## Скорости производства энтропии в климатической системе Земли.

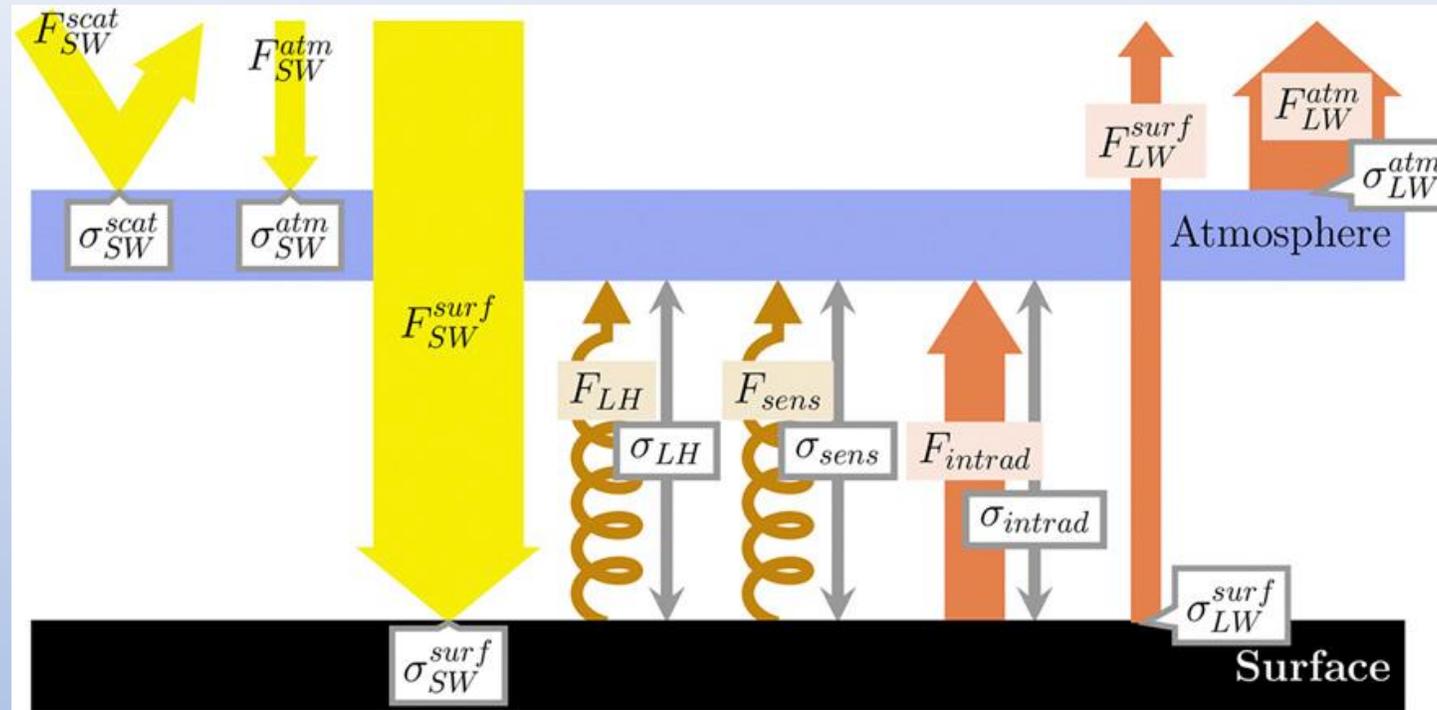


Схема простой двухслойной модели энергетического баланса с потоками энергии, обозначенными цветными стрелками  $F$ , и результирующим производством энтропии  $\sigma$  в ячейках. Энергия, поступающая в систему из окружающей среды, показана входящей или выходящей из верхней части диаграммы. Показаны три внутренних энергообмена: два материальных процесса – поток скрытого тепла ( $LH$ ), поток явного тепла ( $Sens$ ) и внутреннее излучение. **Эта диаграмма отражает исследование энергетического баланса, проведенное Wild et.al. (2014).**

Здесь мы рассмотрим баланс энтропии поверхности Северного Полушария Земли и дадим оценку производства энтропии поверхностью континентов и океана на основе данных моделирования. Для этого рассмотрим суммарную радиацию на поверхности  $R_{net}$  ( $\text{Втм}^{-2}$ ), т.е. баланс между приходящим и уходящим потоками радиации, который распределяется на поверхности суши, между турбулентным переносом явного  $H$  и скрытого тепла  $L$ , а также теплового потока в почву  $G$  (Peixoto, J. P., Oort, A. H., De Almeida, M., and Tom'e, A., 1991):

$$R_{net} = Q_S + Q_{L,in} - Q_{L,out} = H + LE + G + \varepsilon \quad (1)$$

где  $Q_S$  — поглощенное солнечное излучение, а члены  $Q_L$  представляют собой входящий и исходящий потоки длинноволнового излучения  $L$ , соответственно. Существует также остаток энергетического баланса ( $\varepsilon$ ), которые не учитываются в других потоках (например, в фотосинтезе, гидрологии).

При рассмотрении баланса энтропии, связанного с этими потоками, отметим, что энтропийные члены, обусловленные солнечным излучением, состоят из двух компонентов (2) переноса энтропии ( $J$ , [ДжК<sup>-1</sup> м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>]) и (3) производства энтропии ( $\sigma$ ). Мы вычисляем эти значения на основе данных моделирования модели ИВМ РАН. Перенос энтропии и производство энтропии на единицу площади определяются как

$$J_{Q_s} = \frac{Q_s}{T_{sun}} \quad (2)$$

$$\sigma_s = Q_s \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{sun}} \right) \quad (3)$$

где температура Солнца  $T_{sun}$  предполагается постоянной и составляет 5780К, а  $T_s$  — температура излучения поверхности.

Аналогично рассматривается длинноволновое излучение с переносом энтропии за счет потока длинноволнового излучения  $J_{QL}$ , (ДжК<sup>-1</sup> м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>) и производство энтропии за счет поглощения длинноволнового излучения и преобразования в тепло :

$$J_{Q_L} = J_{Q_{L,in}} - J_{Q_{L,out}} = \frac{Q_{L,in}}{T_{atm}} - \frac{Q_{L,out}}{T_s} \quad (4)$$

$$\sigma_L = Q_{L,in} \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{atm}} \right) \quad (5)$$

Общий перенос энтропии  $J$ , ( $\text{ДжК}^{-1} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) для земной поверхности составит:

$$J = J_{Q_L} + J_{Q_S} + J_H + J_{LE} + J_G \quad (6)$$

Производство энтропии ( $\sigma$ , [ $\text{ДжК}^{-1} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ]) земной поверхностью равно

$$\sigma = \sigma_S + \sigma_L \quad (7)$$

$\sigma_S = Q_S \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{sun}} \right)$  - производство энтропии, связанное с поглощением и преобразованием низко-энтропийного солнечного излучения в тепло и

$\sigma_L = Q_L \left( \frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_{atm}} \right)$  - производство энтропии за счет поглощения длинноволнового излучения и преобразования в тепло.

$$\frac{dS}{dt} = J + \sigma \quad (8) - \text{баланс энтропии земной поверхности}$$

За последние несколько лет был достигнут ряд успехов в применении подходов термодинамики для лучшего описания процессов в системе Земли в целом и на поверхности.

Здесь дана количественная оценка производства энтропии в уравнении баланса энтропии на поверхности земли. Для этого мы используем данные моделирования с помощью модели ИВМ РАН за период 2000 – 2010 гг. и данные сценарного моделирования (SSP5-85)

**Мы рассмотрим только компоненты и суммарное производство энтропии за счет радиации поверхностью в уравнении (8), соответственно  $\sigma_S$ ,  $\sigma_L$  и  $\sigma = \sigma_S + \sigma_L$**

Период 2000 – 2010 гг..

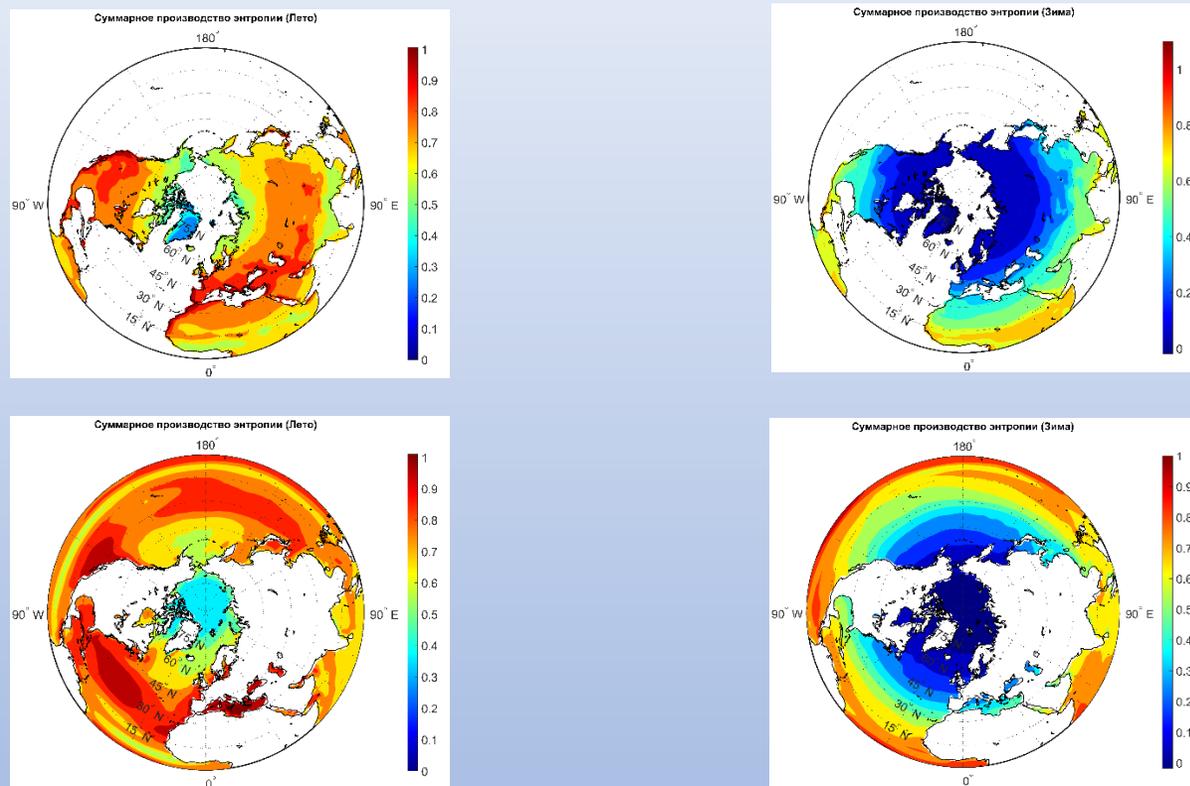


Рис. Производство энтропии на поверхности  $\sigma = \sigma_s + \sigma_L$  (ДжК-1м-2с-1) суши (вверху) и океана (внизу) за счет поглощения коротковолнового и длинноволнового излучения для сезонов: лето (слева) и зима (справа).

## Сценарий SSP5-85

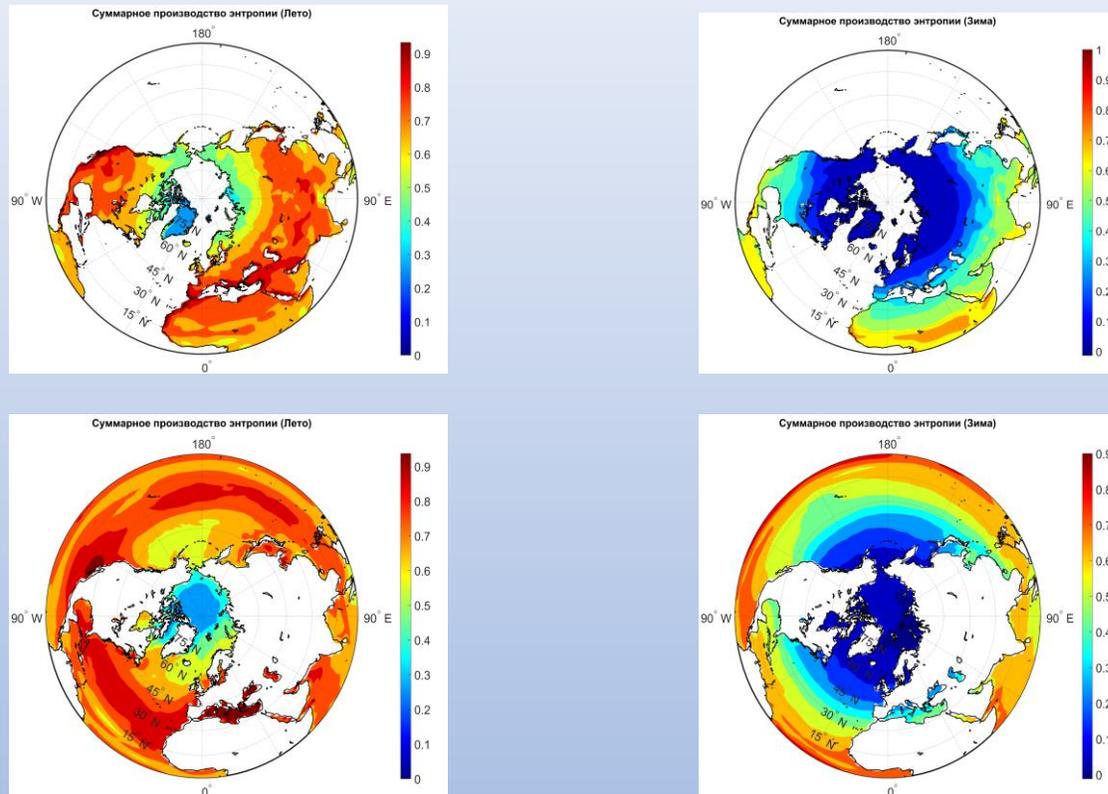
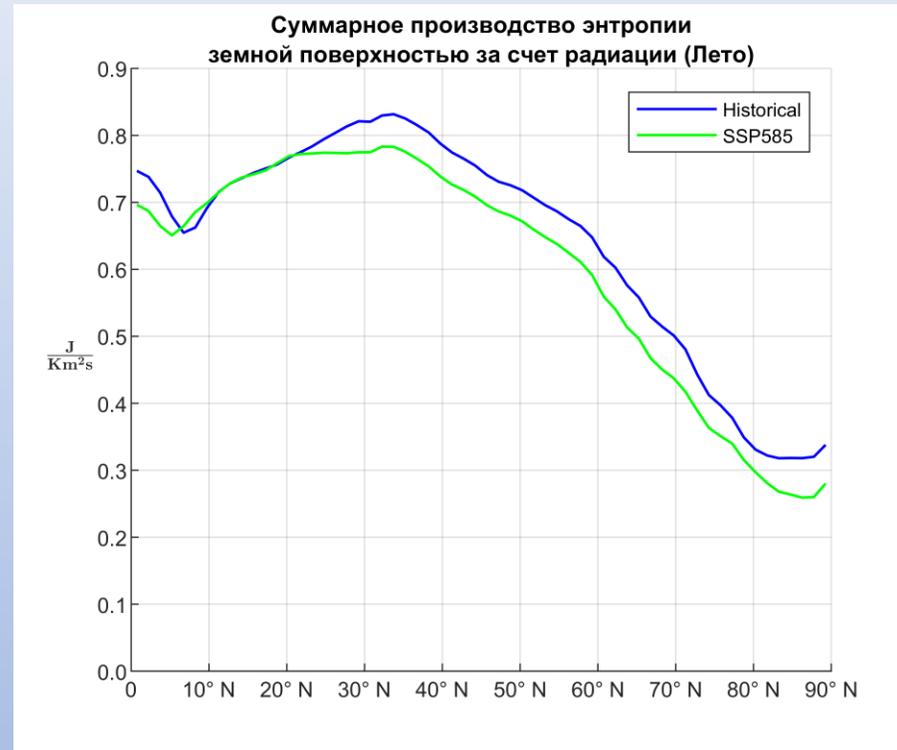
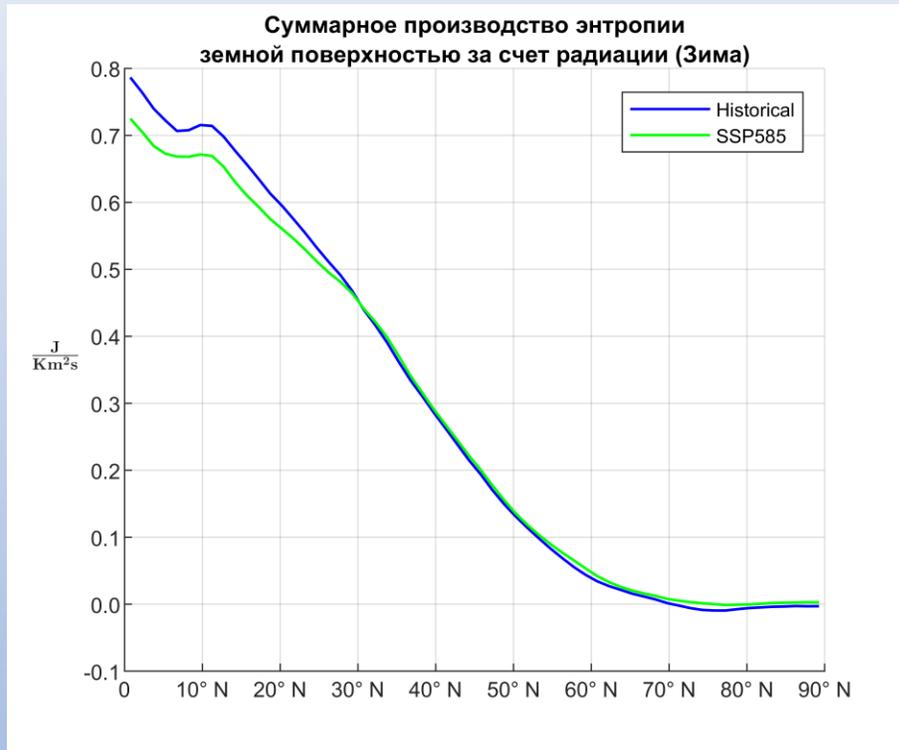


Рис. Производство энтропии на поверхности  $\sigma = \sigma_s + \sigma_L$  ( $\text{ДжК}^{-1}\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) суши (вверху) и океана (внизу) за счет поглощения коротковолнового и длинноволнового излучения для сезонов: лето (слева) и зима (справа).

## суммарное производство энтропии за счет радиации поверхностью



## Заключение

В докладе представлены результаты исследования вихревых потоков тепла в районе субтропического струйного течения, с учетом их термодинамических свойств. Получена оценка глобального производства энтропии на поверхности континентов, связанное с поглощением и преобразованием низко-энтропийного солнечного излучения в тепло и за счет поглощения длинноволнового излучения и преобразования в тепло на основе данных моделирования по модели климатической системы ИВМ РАН.

- Результаты показывают, что производство энтропии за счет вихревого потока явного тепла в окрестности северного фланга субтропического струйного течения отрицательно, что соответствует противогradientному вихревому потоку тепла в этой области.
- Энтропия, связанная с общей свободной энергией системы, рассчитываемая по радиационным потокам энергии, уменьшается при глобальном потеплении, а уменьшение производства энтропии означает увеличение свободной энергии для динамики погоды. Но этот вывод требует дальнейшего более глубокого исследования.

**Как интенсивность энергетического цикла и производство материальной энтропии меняются с увеличением концентрации CO<sub>2</sub>?**

Thank you much for your attention