



Особенности динамики нижней стратосферы Арктики в конце зимнего сезона по данным реанализа и моделирования

П.Н. Варгин^{1,2,3}, А.В. Коваль^{3,4,5}, В.В. Гурьянов^{3,6}, Е.М. Володин⁷,
Е.В. Розанов^{5,8}

¹ Центральная аэрологическая обсерватория, Московская область

² Институт физики атмосферы им. Обухова РАН, Москва

³ Кафедра метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

⁴ Кафедра физики атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет

⁵ Лаборатория исследования озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет

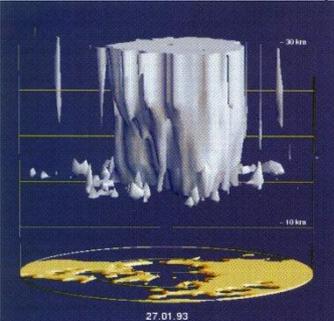
⁶ Казанский федеральный университет

⁷ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

⁸ Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Switzerland

РАН, Москва, ноябрь 2024 г.

Температура нижней полярной стратосферы в марте определяет степень разрушения озона

<p>Winter polar night</p>		<p>Spring -Solar irradiance reaches polar stratosphere</p> 
<p>1. Polar Stratospheric Cloud (PSC) formation ($T < -78\text{C}$)</p> <p>HNO_3</p> <p>$\text{H}_2\text{O} \implies \text{PSC}$</p> 	<p>Cold, stable & well isolated stratospheric polar vortex with temperature inside less than -80°C (195K)</p>	<p>3. ClO formation</p> <p>$\text{Cl}_2 + \text{UV radiation} \implies 2 \text{Cl}$</p> <p>$\text{HOCl} + \text{UV radiation} \implies \text{OH} + \text{Cl}$</p> <p>$\text{Cl} + \text{O}_3 \implies \text{ClO} + \text{O}_2$</p>
<p>2. Ozone depleting substances activation on PSCs</p> <p>ClONO_2</p> <p>$\text{HOCl} \implies \text{Cl}_2 \text{ \& \ } \text{HOCl}$</p> <p>$\text{N}_2\text{O}_5$</p> <p>$\text{HCl}$</p>		<p>4. Destruction of stratospheric ozone (up to 80 %)</p> <p>$\text{ClO} + \text{ClO} \implies \text{Cl}_2\text{O}_2$</p> <p>$\text{Cl}_2\text{O}_2 + \text{UV radiation} \implies \text{Cl} + \text{O}_2$</p> <p>$\text{Cl} + \text{O}_3 \implies \text{ClO} + \text{O}_2$</p>

Newman, P., Nash, E., & Rosenfield, J. What controls the temperature of the Arctic stratosphere during the spring? *J. Geophys. Res.*, 2001

... we show that the tropospheric eddy heat flux in middle to late winter (January-February) ($400\text{-}100 \text{ hPa } 45\text{-}75\text{N}$) is highly correlated with the mean polar (*lower*) stratospheric temperature during March

Данные:

- Reanalysis data NCEP (1948 /1979 – 2023) & ERA5 (1979-2023)
- Расчеты химико–климатической модели SOCOLv4 для будущего климата с 2015 г. по 2100 г. по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5; 3 ensemble simulations

Sukhodolov et al. Atmosphere–ocean–aerosol–chemistry–climate model SOCOLv4.0: Description and evaluation. *Geosci. Model. Dev.* 2021.

- Расчеты модели Земной системы ИВМ РАН CM5: исторические HIST1-HIST5 (1965-2015) & для будущего 2015-2100 по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5

Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2020.

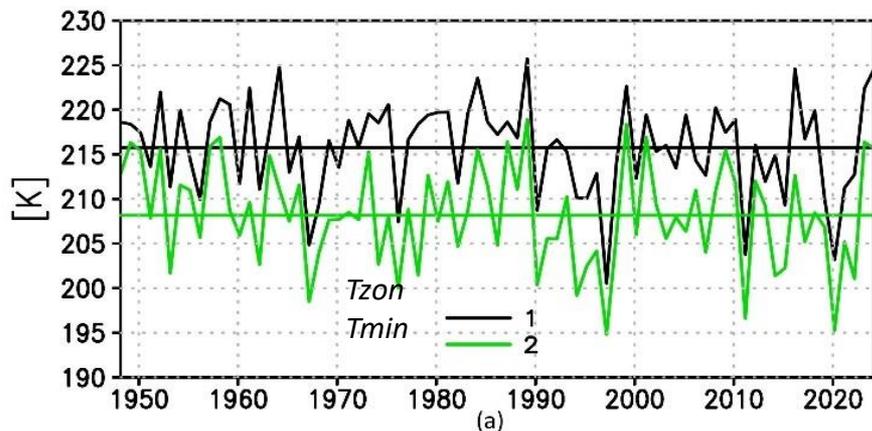
Методы:

- Composite analysis
- Plumb fluxes
- Residual meridional circulation

Цель:

поиск динамических процессов - предикторов, определяющих температуру нижней стратосферы Арктики в марте (следовательно состояние озонового слоя “по следам” Newman et al., 2001)

Среднезональная и минимальная температура (T_{zon} , T_{min}) на 70 гПа в области $70^{\circ} - 90^{\circ}$ с.ш. в марте с 1948 г. по 2024 г. (NCEP-R)



Вертикальный профиль коэф. корреляции (КК) между амплитудой PW1 в феврале в области $45^{\circ} - 75^{\circ}$ с.ш. и T_{min} в марте на 70 гПа в области $70^{\circ} - 90^{\circ}$ с.ш.

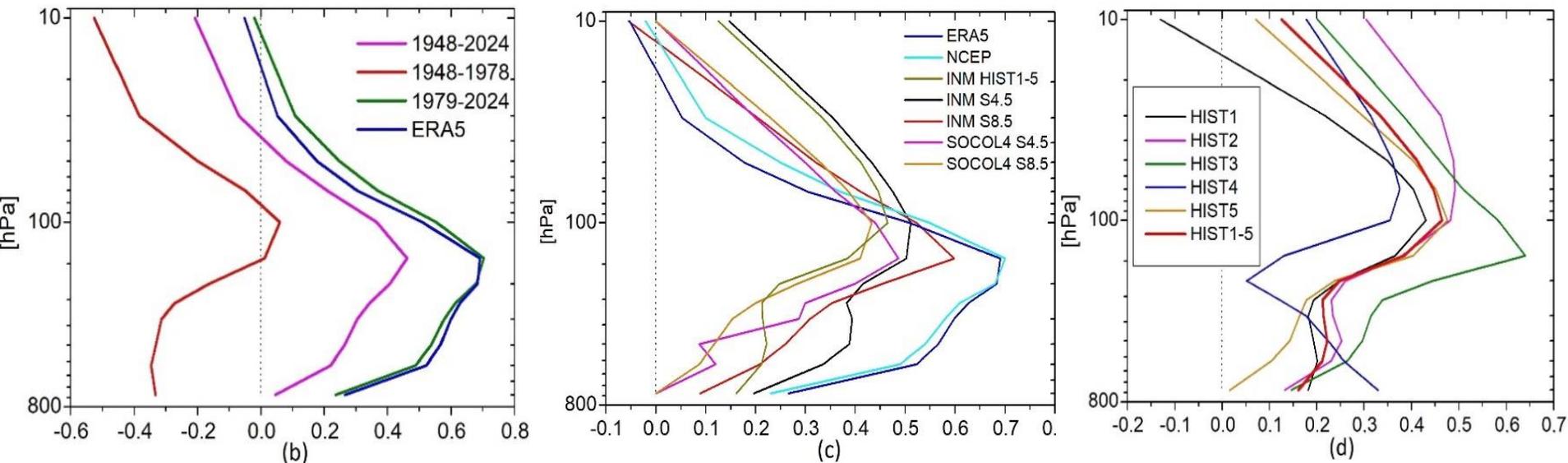
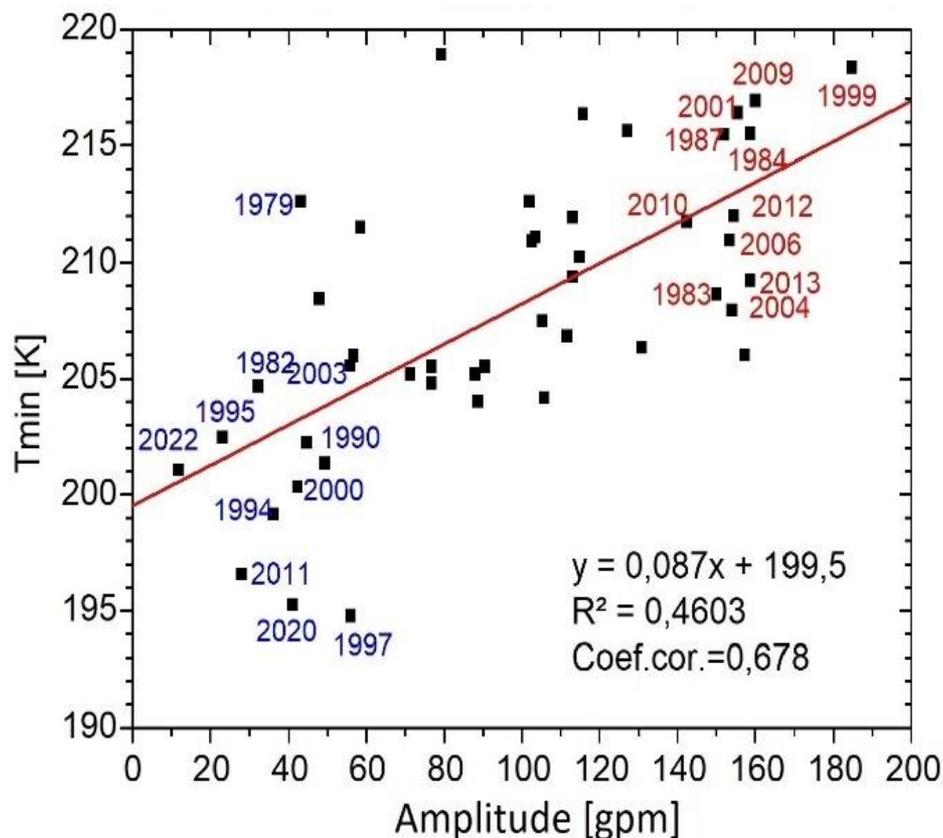


Fig. 1. Вертикальный профиль коэффициента корреляции между амплитудой PW1 в области $45^{\circ} - 75^{\circ}$ с.ш. в феврале и минимальной температуры T_{min} на 70 гПа в полярной области $70^{\circ} - 90^{\circ}$ с.ш. в марте в данных реанализа NCEP для периодов 1948-2024, 1948-1978, 1979-2024 гг., ERA5 (1979-2023) (a); исторических расчетов модели INM CM5 (1965-2014, среднее по 5 ансамблям HIST1-5), для будущего климата по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (2015-2100), данных реанализа ERA5 (1979-2023) и NCEP (1979-2024), расчетам ХКМ SOCOLv4 по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (2015-2099, среднее по 3 ансамблям) (b), историческим расчетам модели INM CM5 HIST1-5 для периода 1965-2014 г. (c).

Амплитуда волны 1 (PW1) в феврале в нижней стратосфере и температура нижней стратосферы Арктики в марте



«Теплый» композит составлен из зимних сезонов: 1983, 1984, 1987, 1999, 2001, 2004, 2006, 2009, 2012, 2013 гг.

«Холодный» композит: 1982, 1990, 1994, 1995, 1997, 2000, 2003, 2011, 2020, 2022 гг., включая зимы с T_{min} в марте 194 К - 196 К, с заниженной амплитудой PW1 в феврале в нижней стратосфере и с наибольшим разрушением озонового слоя.

The composites are not characterized by the dominance of any of the main external climatic phenomena capable of influencing the Arctic winter stratosphere (QBO/ENSO/MJO).

Различие между композитами в температуре, отношении смеси озона на 70 гПа и общем содержании озона в марте

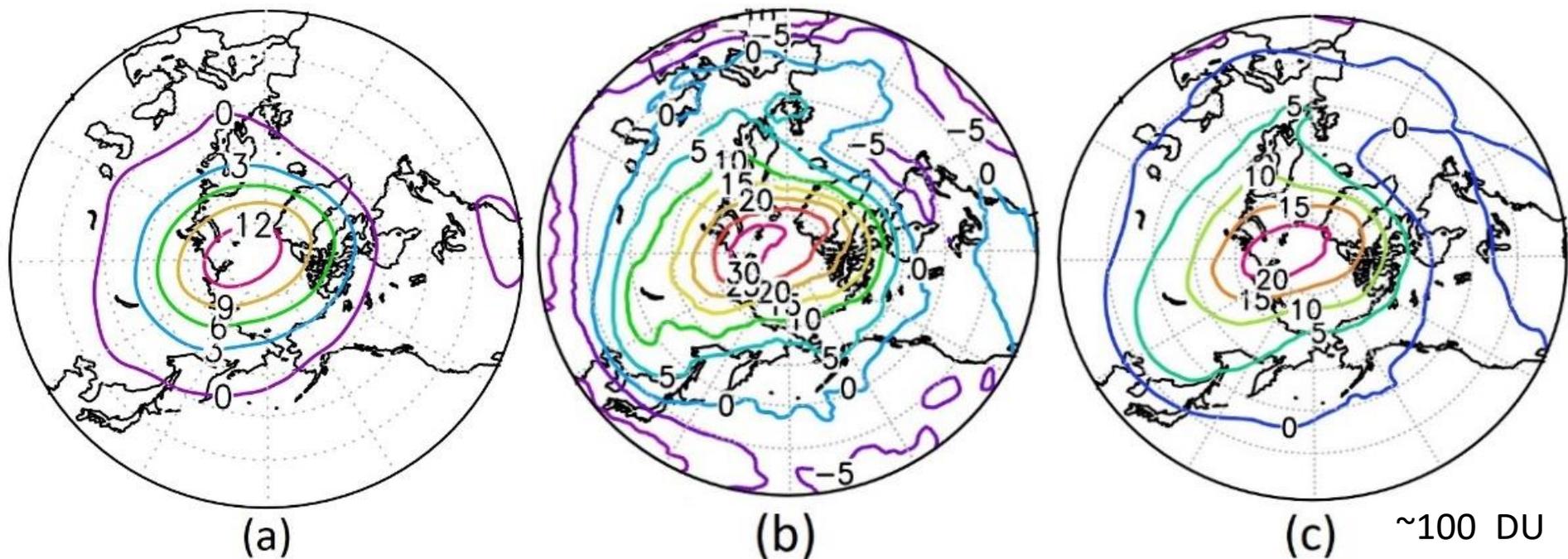


Fig. 2. Temperature difference (K) (a) and ozone concentration at 70 hPa (%) (a, b), and total ozone content (%) in March between «warm» and «cold» composites (b, c).

Различие в распространении потоков волновой активности (1)

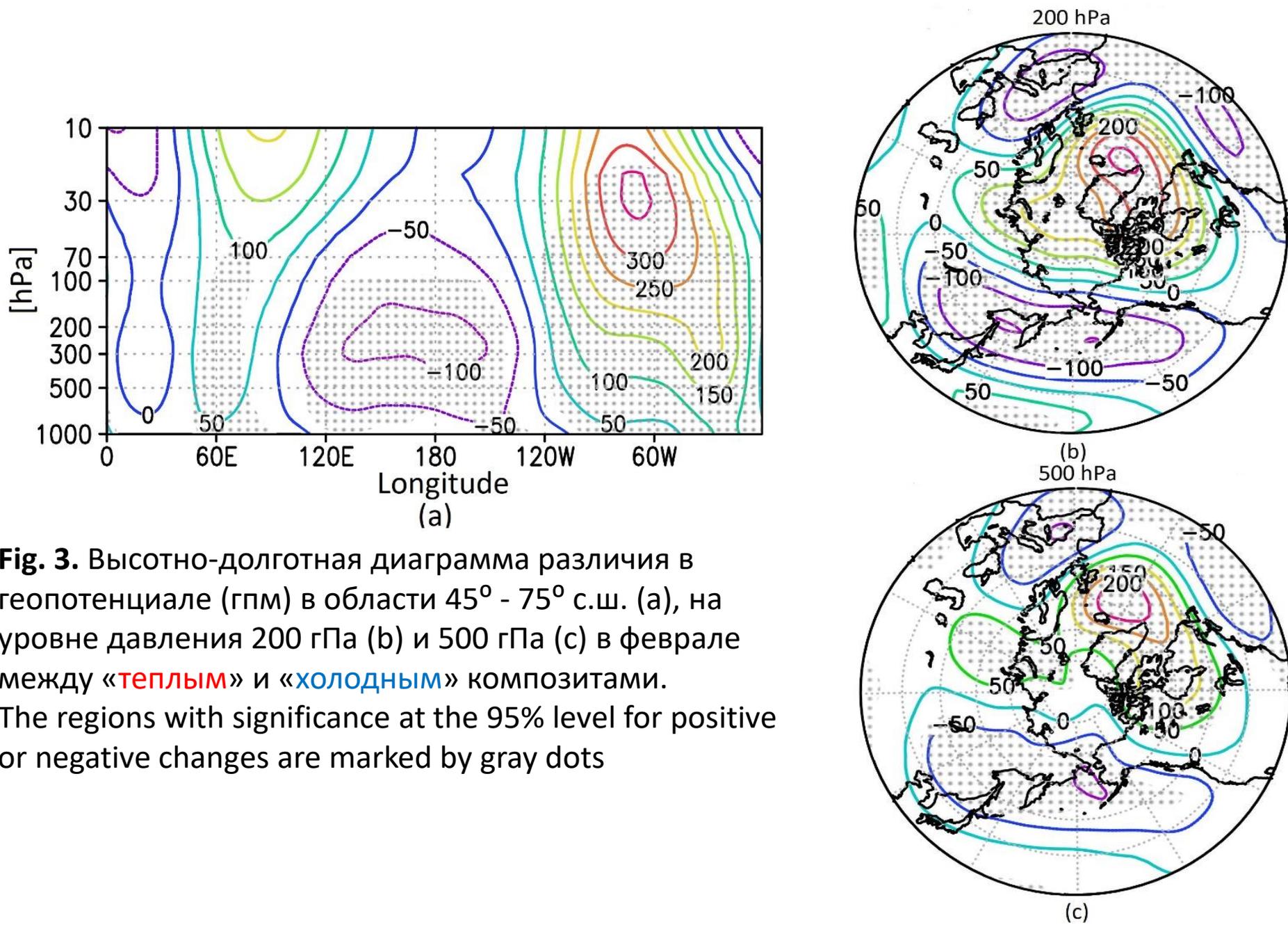


Fig. 3. Высотно-долготная диаграмма различия в геопотенциале (гпм) в области 45° - 75° с.ш. (a), на уровне давления 200 гПа (b) и 500 гПа (c) в феврале между «теплым» и «холодным» композитами. The regions with significance at the 95% level for positive or negative changes are marked by gray dots

Различие в распространении потоков волновой активности (2)

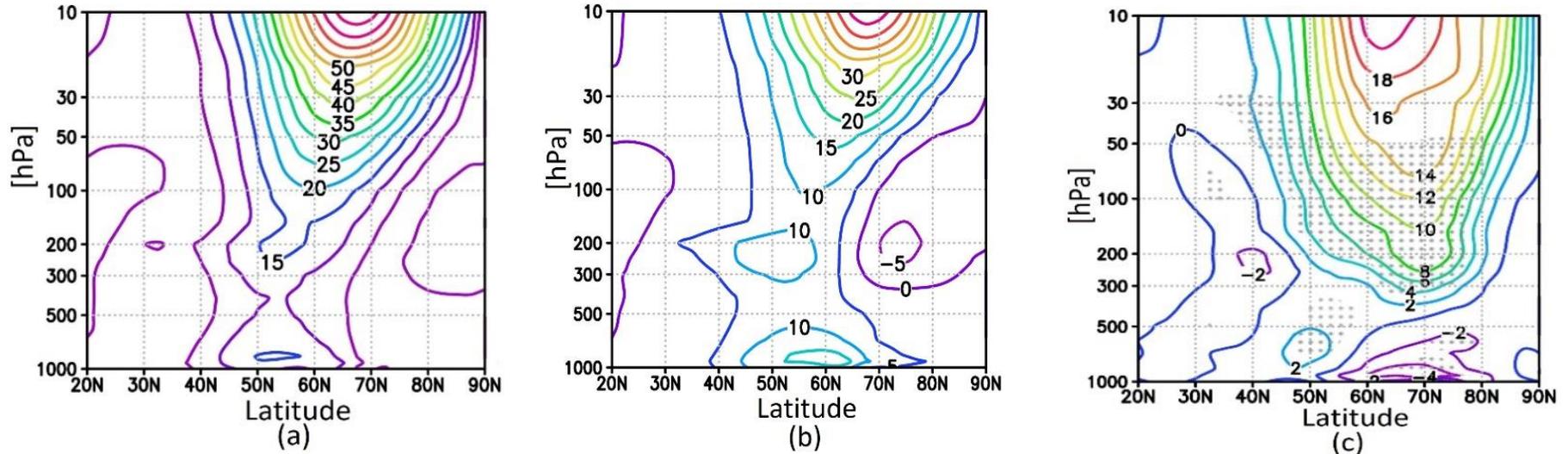


Fig. 4. Высотно-широтная диаграмма среднезонального потока тепла ($K\ m/s$) в феврале для “теплого” и “холодного” композитов (a, b) и различие между ними (c).

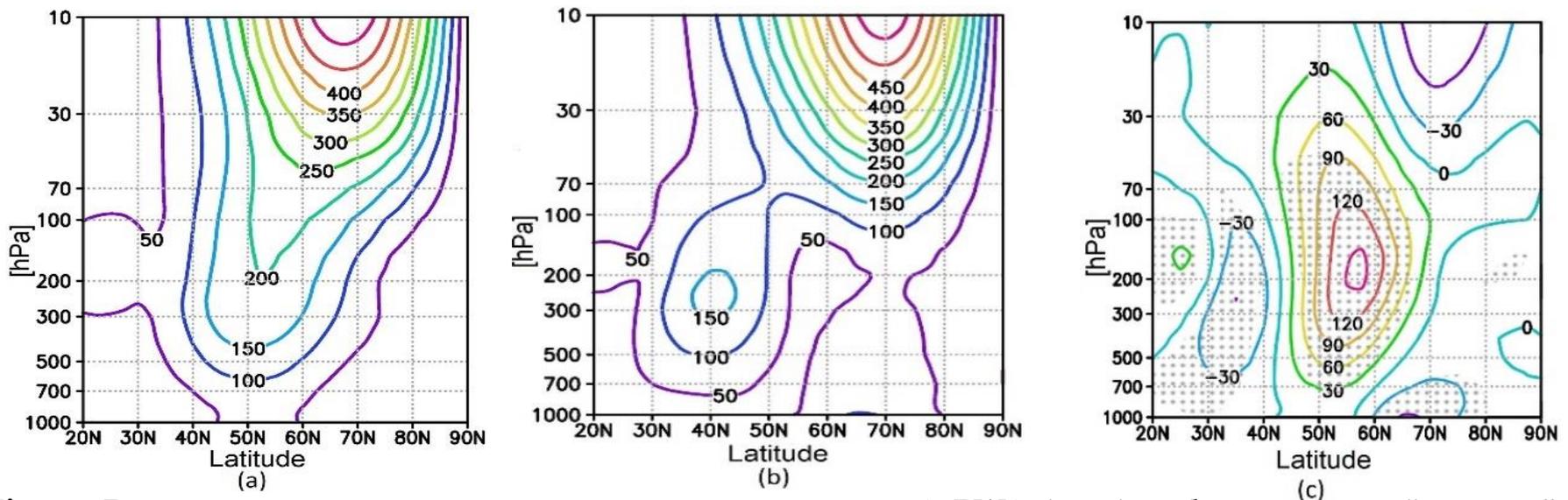


Fig. 5. Высотно-широтная диаграмма амплитуды волны 1 PW1 (gpm) в феврале для “теплого” и “холодного” композитов и различие между ними (a, b, c).

Различие в распространении потоков волновой активности (3)

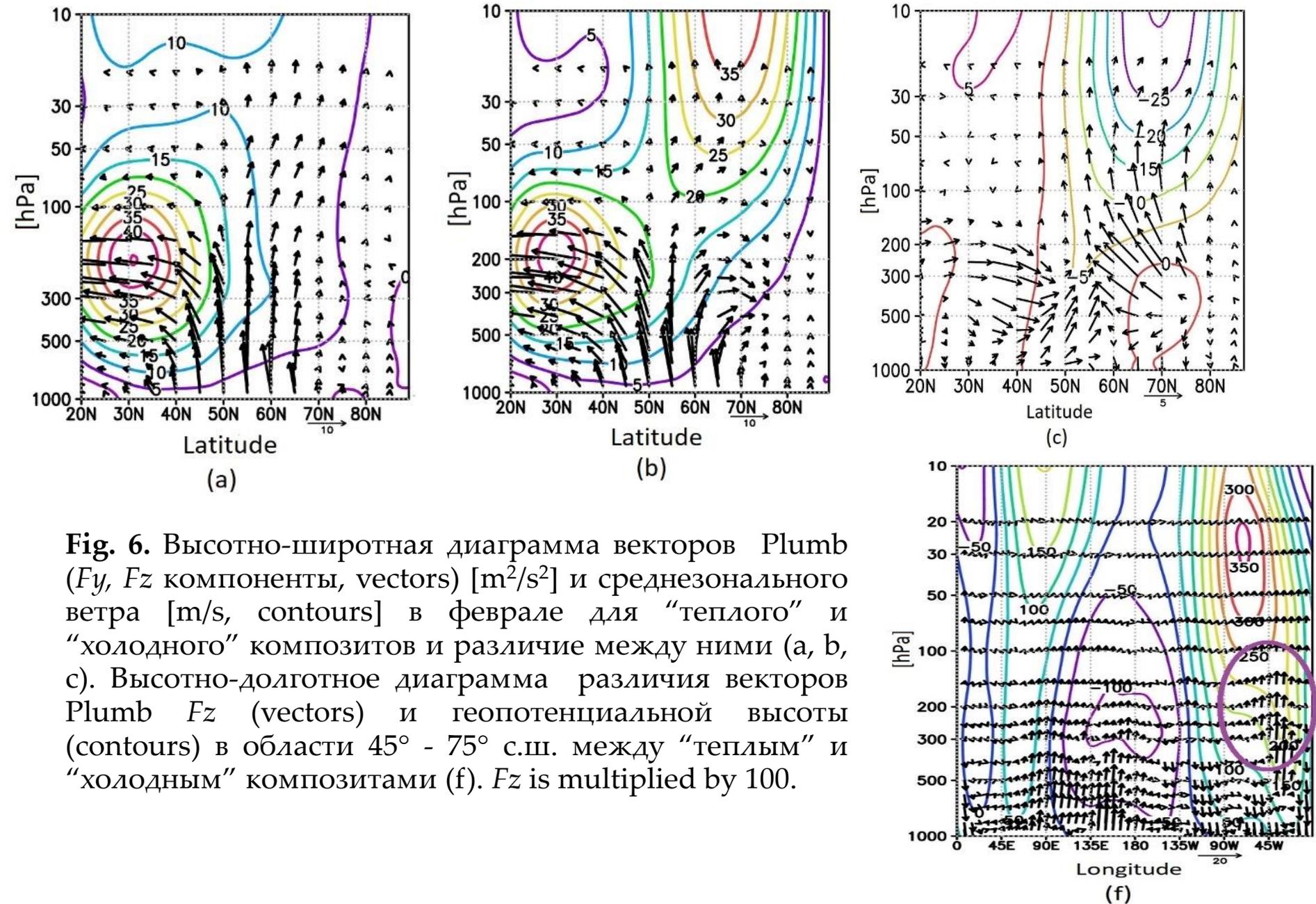
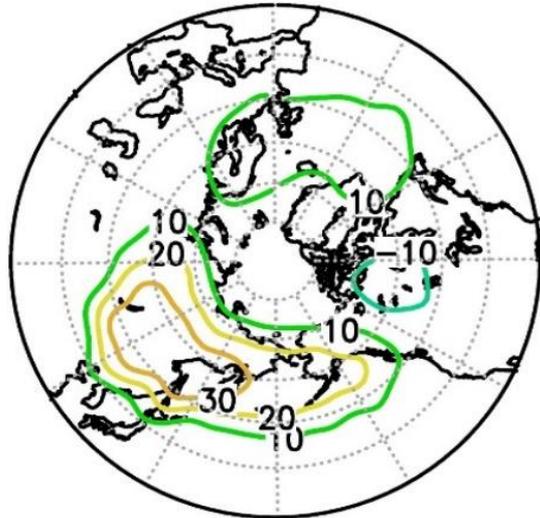


Fig. 6. Высотно-широтная диаграмма векторов Plumb (F_y , F_z компоненты, vectors) [m^2/s^2] и среднезонального ветра [m/s , contours] в феврале для “теплого” и “холодного” композитов и различие между ними (a, b, c). Высотно-долготное диаграмма различия векторов Plumb F_z (vectors) и геопотенциальной высоты (contours) в области $45^\circ - 75^\circ$ с.ш. между “теплым” и “холодным” композитами (f). F_z is multiplied by 100.

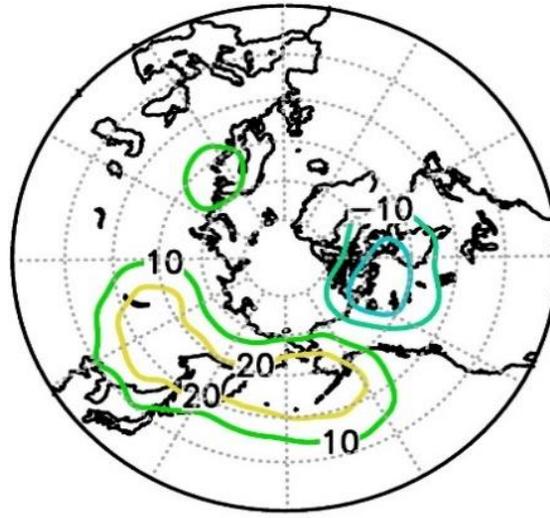
Различие в распространении потоков волновой активности (4)

100 гПа



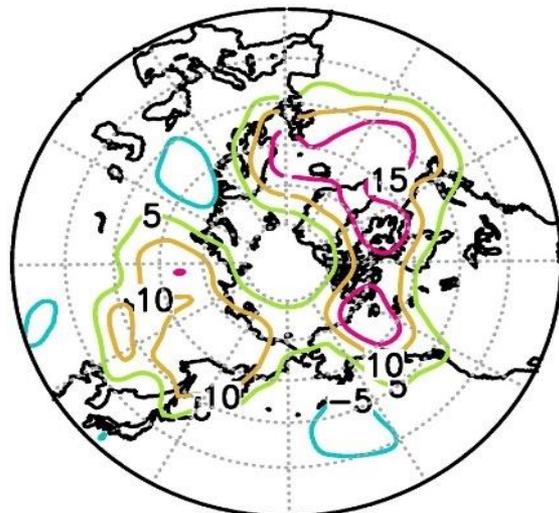
(a)

100 гПа



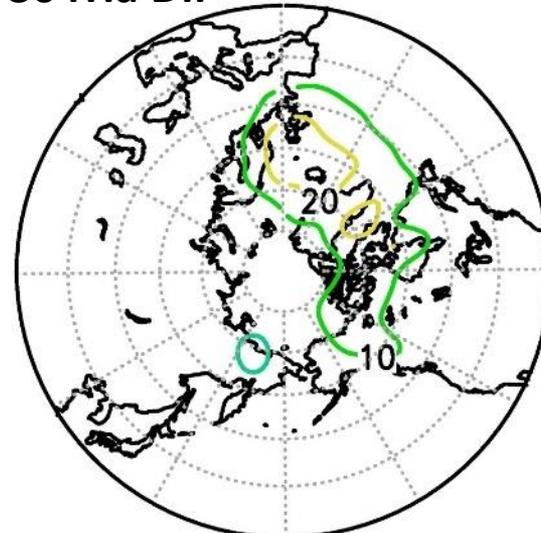
(b)

100 гПа DIF



(c)

30 гПа DIF



(d)

Fig. 7. Вертикальная компонента вектора $\text{Plumb } F_z$ [m^2/s^2] для «теплого» и «холодного» композита в феврале на уровне давления 100 гПа (a, b).

Различие F_z [m^2/s^2] в феврале между «теплым» и «холодным» композитами (DIF) на 100 гПа и 30 гПа (c, d).

Различие в Остаточной меридиональной циркуляции

Residual meridional circulation (RMC)

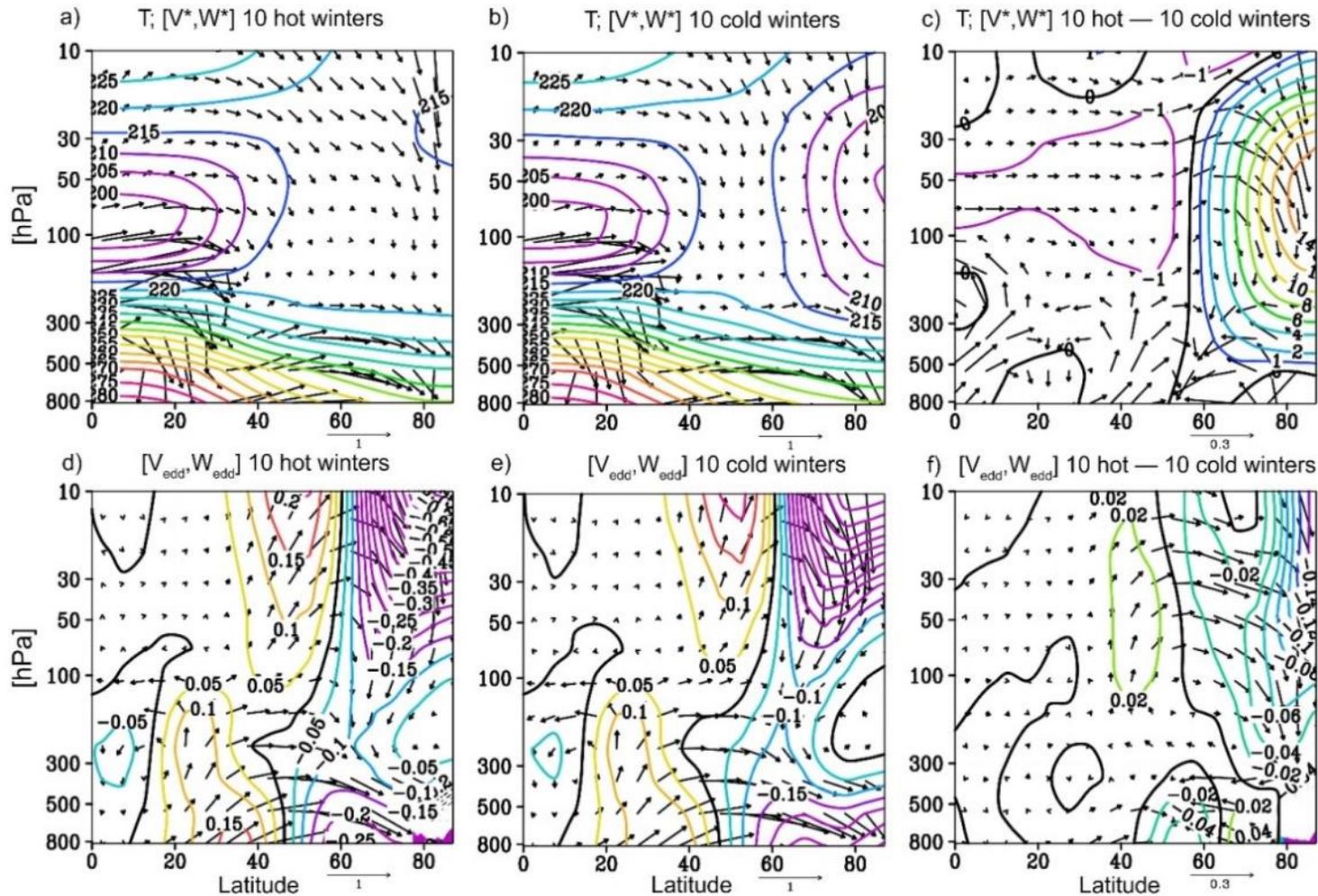


Fig. 7. Altitude-latitude distribution of temperature (K, contours) and the RMC components (m/s, arrows) for “warm” and “cold” composites (a, b, respectively); the eddy term of the RMC (m/s, arrows) and its vertical component (contours) for the “warm” and “cold” composites (d, e, respectively); the differences in the corresponding values are shown in panels (c, f). The vertical components are multiplied by 200.

Surface impact (Warm-Cold)

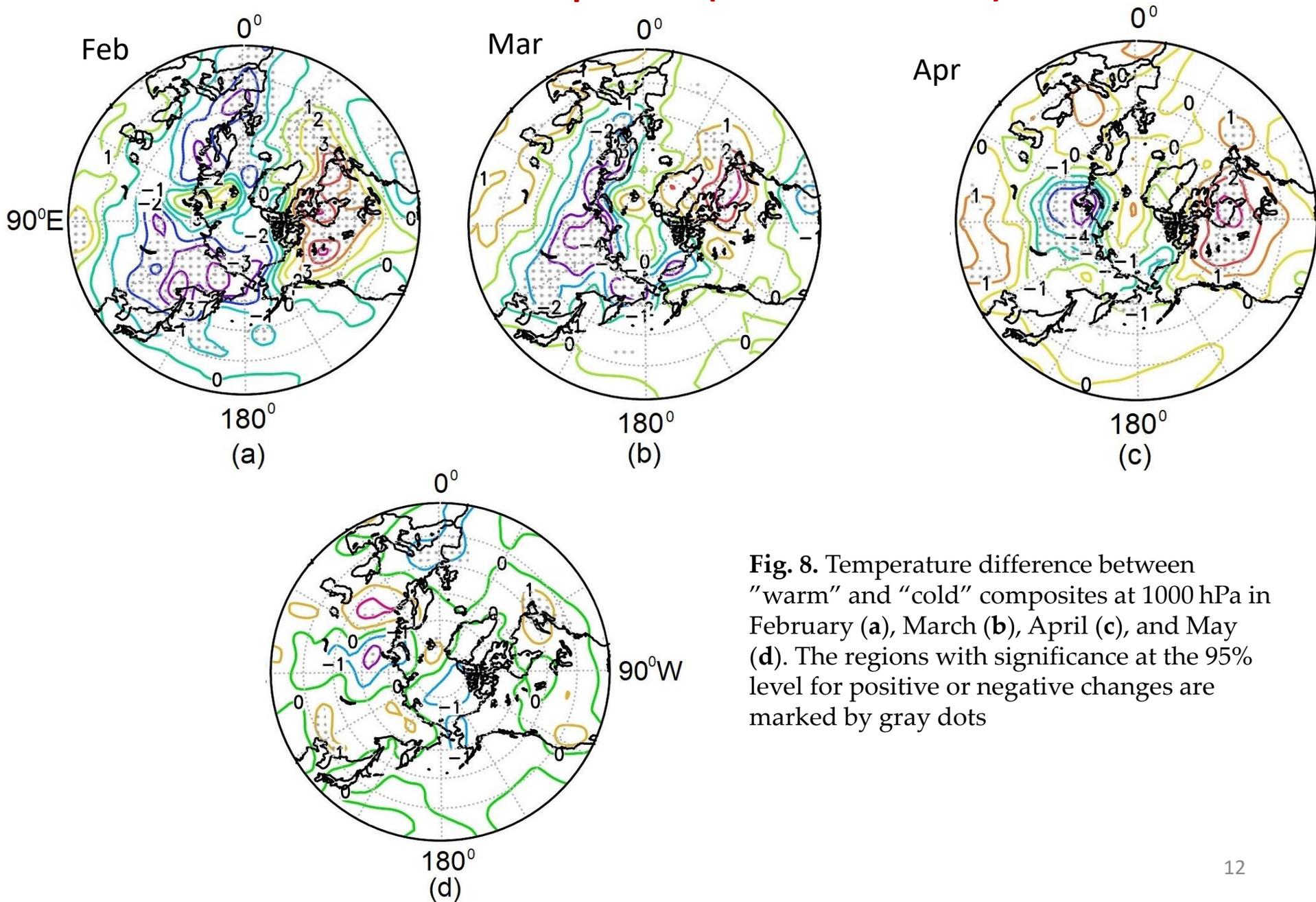


Fig. 8. Temperature difference between "warm" and "cold" composites at 1000 hPa in February (a), March (b), April (c), and May (d). The regions with significance at the 95% level for positive or negative changes are marked by gray dots

Выводы

- Выявлен значимый коэффициент корреляции (КК) между амплитудой ПВ1 в феврале в нижней стратосфере и минимальной температурой нижней стратосферы Арктики (T_{min}) в марте для спутникового периода (1979–2024) данных реанализов NCEP и ERA5. Максимальные значения КК (~ 0.7) между T_{min} на 70 hPa в марте и амплитудой PW1 в феврале выявлено для изобарического уровня 200 гПа. Максимальное значение КК для расчетов ХКМ SOCOLv4 и ИВМ CM5: ~ 0.5 . **Амплитуда ПВ1 в нижней стратосфере в феврале может рассматриваться как предиктор T_{min} в марте, характеризующей состояние озонового слоя.**
- «Теплые» сезоны характеризуется повышенным давлением над северной Атлантикой в верхней тропосфере – нижней стратосфере и пониженным давлением над северо-восточной Евразией и севером Тихого океана.
- В «теплые» сезоны наблюдается усиленное распространение потоков волновой активности в нижнюю стратосферу в феврале над Северной Атлантикой и северо-восточной Евразией. Отражение волновой активности наблюдается в «холодные» сезоны около 70° N над севером Канады ($\sim 120^\circ - 90^\circ$ з.д.) в верхней тропосфере – нижней стратосфере.
- В марте в нижней стратосфере Арктики различие в отношении смеси озона между «теплым» и «холодным» сезонами: 30%. Различие в химическом разрушения озона проявляется в общем содержании озона $\sim 20\%$ (100 е.д.).
- В «теплые» сезоны дополнительно к нагреву стратосферы Арктики в феврале наблюдается усиление нисходящей «ветви» ОМЦ. Главный вклад в это усиление связан с усилением волновой активности, приводящее к ускорению вихревой компоненты ОМЦ.
- В апреле различие между композитами характеризуется положительными значениями приземной температуры до $\sim 3^\circ$ над севером Северной Америки и негативными значениями до -5° над центральной и восточной Северной Евразией, в регионе, где ранее была выявлена наибольшая корреляция между аномалиями приземной температуры в апреле и озоновым слоем в марте [Stone et al., 2019].
- Усиление ПВ1 в нижней стратосфере и её дальнейшее распространение в феврале приводит к увеличению температуры нижней стратосферы в марте благодаря ослаблению стратосферного полярного вихря. Дополнительно, усиление волновой активности определяет усиление вихревой компоненты ОМЦ, усиливающей нисходящие потоки, что также приводит к повышению температуры полярно стратосферы.

Plumb vectors

The three-dimensional Plumb vector \mathbf{F} was defined by Plumb (1985) as:

$$\mathbf{F} = (F_\lambda, F_\varphi, F_z)$$

$$= \frac{p}{p_s} \cos\varphi \cdot \begin{pmatrix} v^{*2} - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(v^* \Phi^*)}{\partial \lambda} \\ -u^* v^* + \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(u^* \Phi^*)}{\partial \lambda} \\ \frac{2\Omega \sin\varphi}{S} \left[v^* T^* - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (T^* \Phi^*) \right] \end{pmatrix}$$

where F_λ , F_φ , F_z are the longitudinal, latitudinal and vertical components of the Plumb flux vector, with λ – longitude, φ – latitude, z – altitude, u, v are zonal and meridional velocity, Φ is geopotential, T – temperature, p – pressure, and p_s – pressure at Earth surface, a stands for Earth's radius, Ω for Earth's angular velocity, with $S = \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \frac{\kappa \bar{T}}{H}$ is static stability, $\kappa = R/c_p \approx 0.286$ and represents scale height; a star indicates the deviation from the zonal average and a bar the zonal mean.

Plumb, R. On the Three-Dimensional Propagation of Stationary Waves. *J. Atmos. Sci.* 1985.

To analyze the features of the interaction of atmospheric waves with the mean flow, the residual meridional circulation (RMC) was calculated within the transformed Eulerian mean framework (TEM) [40]. The definition and concept of the RMC were discussed in detail by [41]. The meridional and vertical components of the RMC were calculated using the following formulas [40]:

RMC

$$\bar{v}^* = \bar{v} - \rho^{-1} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{\overline{v'\theta'}}{\partial\theta/dz} \right) \quad (1)$$

$$\bar{w}^* = \bar{w} + \frac{1}{a \cos\varphi} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\cos\varphi \overline{v'\theta'}}{\partial\theta/dz} \right) \quad (2)$$

where the overbars denote zonal mean values; the primes indicate wave disturbances resolved on the spatial grid (deviations from the zonal mean values); v and w —meridional and vertical wind; θ —potential temperature; z —vertical coordinate; ρ —density; φ —latitude; a is the Earth's radius.

[40] Andrews, D.G.; Holton, J.R.; Leovy, C.B. *Middle Atmosphere Dynamics*; Academic Press, USA, 1987.

[41] Koval et al. Modelling the residual mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events. *Ann. Geophys.* 2021. <https://angeo.copernicus.org/articles/39/357/2021/>