

**Вторые научные чтения памяти
Георгия Вадимовича Грузы
«Статистическая климатология и мониторинг климата»,
ИГКЭ имени академика Ю.А. Израэля**

**Численное исследование обрушения планетарных
волн и их связь с атмосферными блокировками на
основе данных моделирования и реанализа**

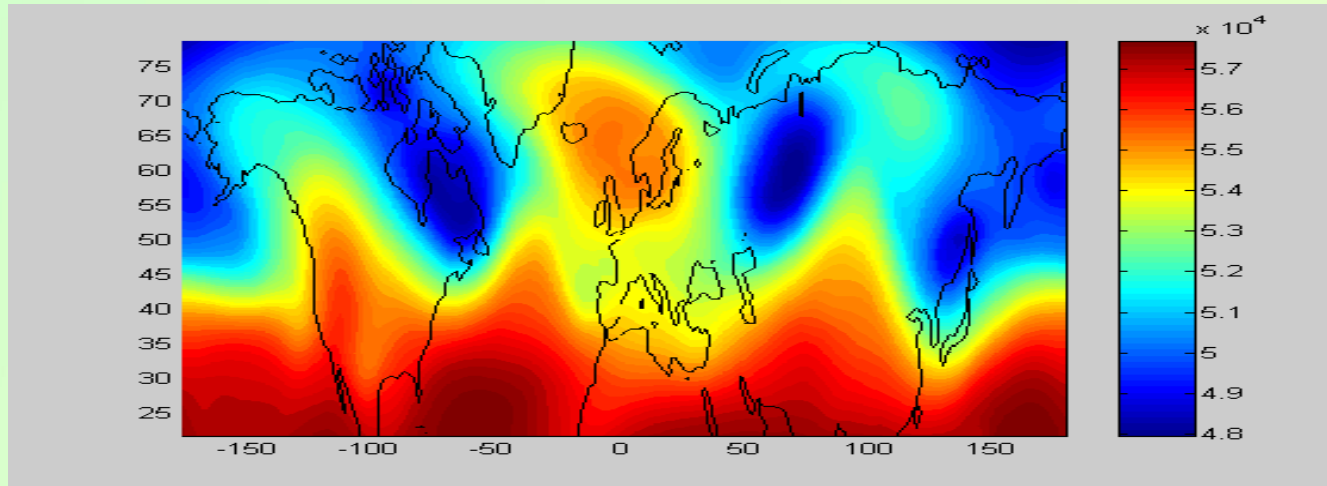
Крупчатников В.Н. Боровко И.В.

ИВМ и МГ СО РАН

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВМиМГ СО РАН
FWNM-2025-0003

Высота геопотенциала $p=500\text{гПа}$

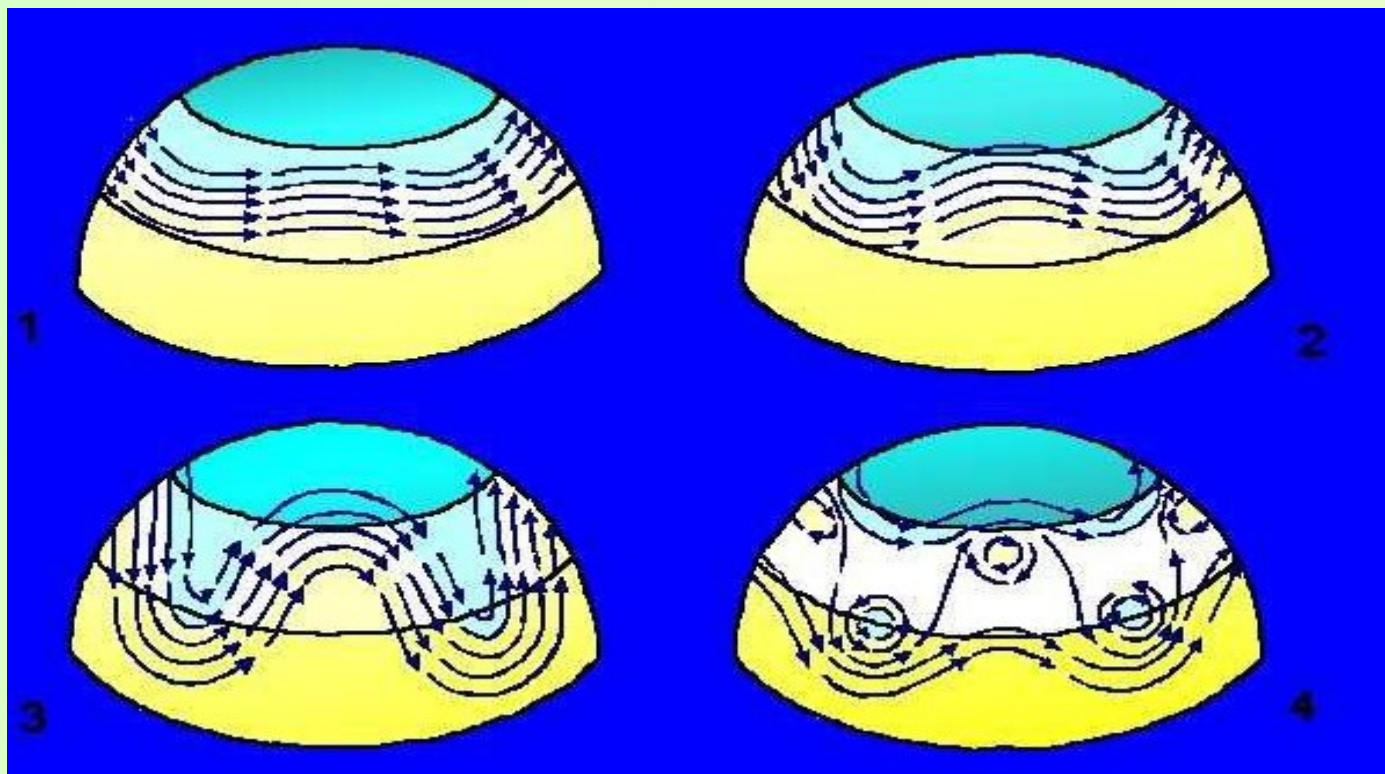
08.12.2002 (ERA5)



Атмосферное блокирование:
квазистационарный вихрь
блокирует западный перенос и
распространение атмосферных
волн.

Последствия:
Экстремальные режимы
температуры и осадков,
аномальные морозы зимой и
засухи летом.

Циркуляцию атмосферы принято рассматривать как зонально симметричные поля, на которые наложены волновые возмущения. Одним из ярких примеров нелинейной динамики в атмосфере является явление обрушения планетарных волн в результате их усиления. Блокирование принято считать следствием обрушения волн.



Методы диагностики и анализа эволюции атмосферных режимов

Как известно, показатели Ляпунова (Ляпунов А.М., 1959; Оселедец В.И., 1968) измеряют экспоненциальные скорости расхождения или сближения ближайших орбит аттрактора в пространстве состояний системы.

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{f}(\bar{x}(t)), \quad \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0$$

Спектр показателей Ляпунова λ_i для некоторых различных начальных условий задается следующим образом

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\|\delta \bar{x}_i(t)\|}{\|\delta \bar{x}_i(t_0)\|}$$

где δx_i - возможные изменения траекторий системы

Оценка показателей Ляпунова климатической системы представляет сложность из-за большого количества степеней свободы. Информационная энтропия - это мера неопределенности системы в теории информации и статистической физике. Для непрерывно распределенной случайной величины с плотностью распределения

- $\rho(\alpha)$ она определяется как

$$S = - \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\alpha) \ln \rho(\alpha) d\alpha \quad (1)$$

В работе [Песин Я.Б., 1977] было доказано, что метрическая энтропия равна интегралу суммы всех положительных показателей Ляпунова, и, таким образом, является показателем неустойчивости траекторий.

Интегральной региональной энтропией (ИРЭ) называется функция

$$IRE = \int_D \xi^2 dA$$

где ξ - относительный вихрь, dA - элемент площади области D

Например, баротропная циркуляция полностью определяется относительным вихрем, для нее информационная энтропия может быть выражена по формуле (1), где в качестве ρ взята плотность распределения относительного вихря на эквивалентно баротропном уровне. В работе (Дымников В.П., Казанцев Е.В., Харин В.В, 1992) было показано, что если относительный вихрь имеет нормальное распределение с нулевым средним значением, информационная энтропия с точностью до константы равна логарифму энстрофии:

$$S = \ln(IRE) + c$$

Таким образом, *IRE*, как и энтропия, является показателем неустойчивости потока, но ее преимуществом является то, что ее достаточно просто оценить.

Энтрофия в жидкости связана с тенденцией диссипации, которая используется при изучении турбулентных течений. Она так же соответствует завихренности, как кинетическая энергия соответствует скорости.

Относительно высокие значения IRE , полученные из поля атмосферного течения при изучении атмосферного блокирования, могут быть связаны как с началом или прекращением блокирующих событий, так и с переходами крупномасштабного потока в целом.

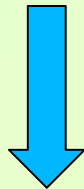
В работе (Дымников В.П. 2007) было предложено в качестве критерия устойчивости квазистационарных динамических систем использовать величину

$$I = - \frac{IRE + M}{E}$$

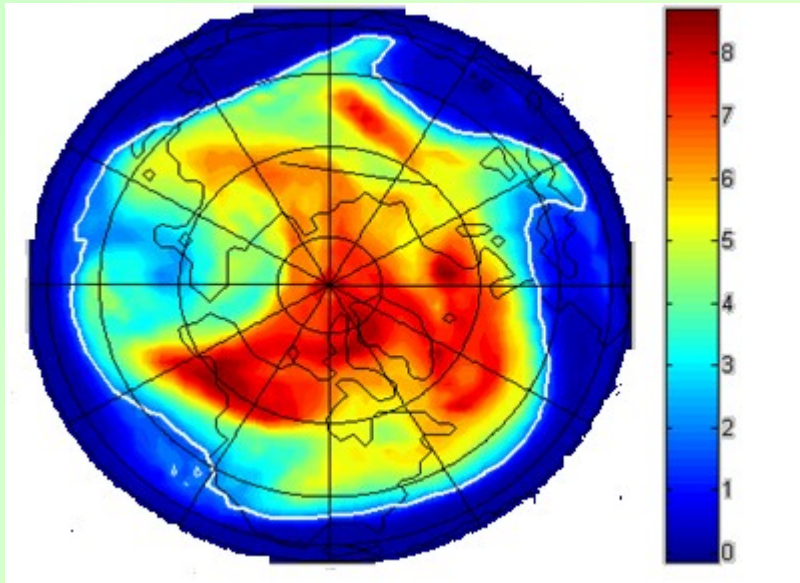
где M и E - угловой момент и кинетическая энергия основного потока, умноженные на некоторые константы.

Максимальные значения интегральной региональной энтропии могут быть показателем смены режима циркуляции в рассматриваемой области.

Высокие значения ИРЭ, как правило, определяются динамическими полями с большой волновой активностью, которые могут быть связаны с обрушением волн Россби.



Потенциальный вихрь Эртеля



Пример карты потенциального вихря Эртеля на поверхности $\theta = 330 \text{ K}$
данные INMCM 48, белой линией показан уровень $Q=2\text{PVU}$

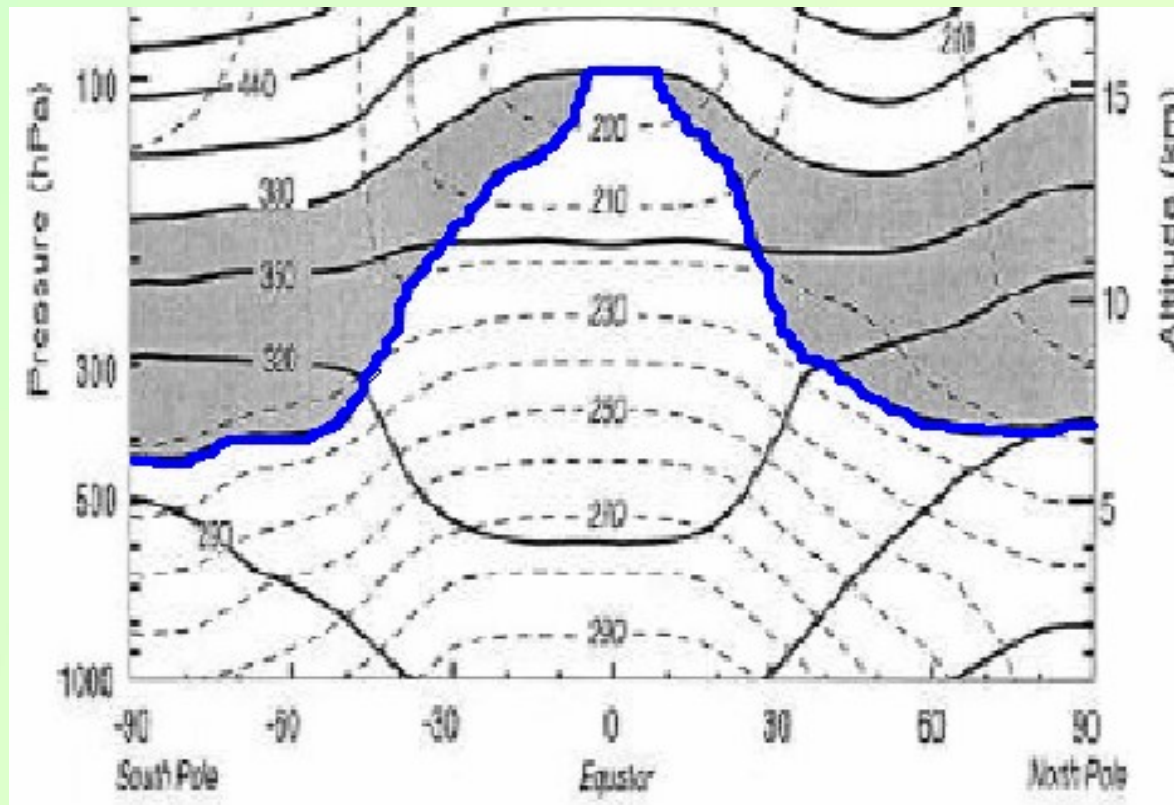
$$Q = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

$$\xi_p = u_y - v_x$$

Обрушение волн определяется как крупномасштабное и быстрое, необратимое опрокидывание контуров потенциальной завихренности на изоэнтропических поверхностях.

Критерием обрушения волн Россби является обращение градиента потенциального вихря на данной поверхности.

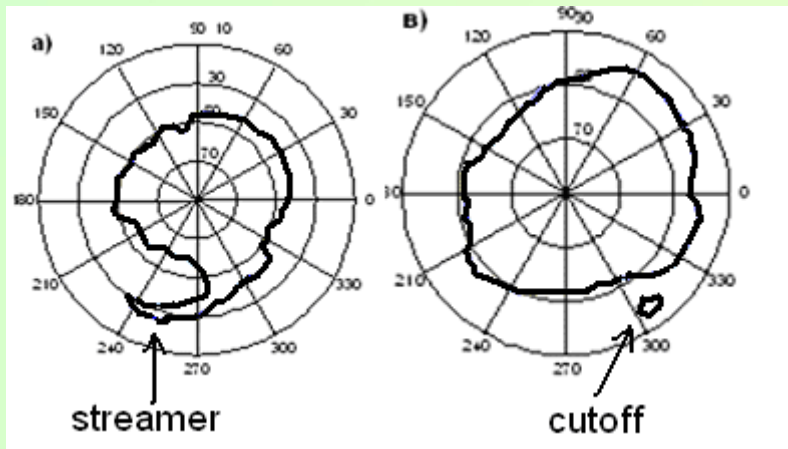
Изолинию $Q=2PVU$ можно считать динамической тропопаузой



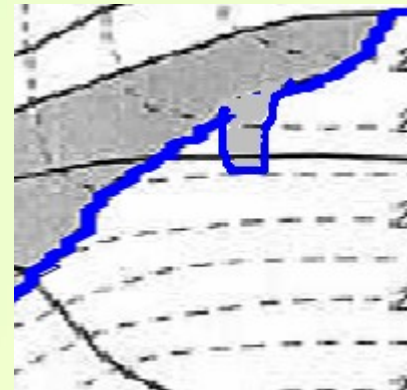
Синим цветом показана изолиния $Q=2PVU$ сплошными линиями - изолинии среднегодовой потенциальной температуры, пунктирными - изолинии температуры

Признаками обрушения волн являются нитевидные участки полярного вихря в районе тропопаузы - так называемые стримеры.

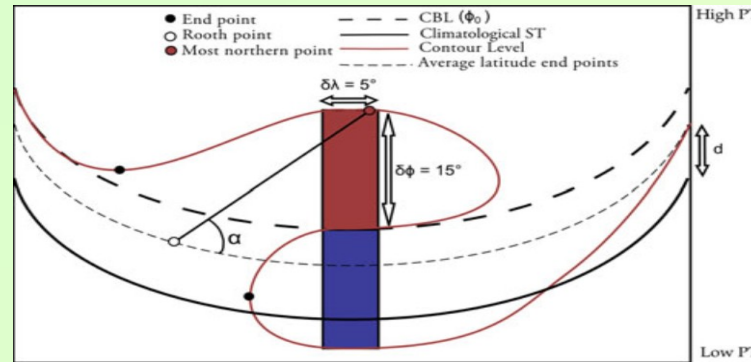
Чёрной сплошной линией показана изолиния $Q=2PVU$ на изоэнтропической поверхности



*"Сечения" (cutoff)
) Синяя линия-
динамическая
тропопауза*



Обрушение волн можно разделить на два основных типа в зависимости от направления контура: антициклоническое и циклоническое



Схематический алгоритм для определения направления обрушения волн Россби при блокирующем событии. Красная контурная линия представляет собой характерный уровень контура θ для блокирующего события. (Weijenborg et al., 2012)

Стримеры могут быть условно разделены на два типа – стратосферные и тропосферные. Стратосферными считаются стримеры, у которых значение Q больше $2PVU$ и которые вытягиваются в сторону экватора, тропосферными – стримеры, вытягивающиеся в сторону полюса.

Количество стримеров линии $Q=2PVU$ на поверхности 330К (данные модели INMCM48, исторический эксперимент, 1991-1995 г)

	Количество вихревых структур				
	ЦТ	ЦС	АТ	АС	всего
					
зима	162	84	138	223	607
весна	218	122	162	281	783
лето	303	164	178	479	1124
осень	159	91	125	269	644
год	842	461	603	1252	3158

Диагностика блокирования

Критерий Пелли-Хоскинса

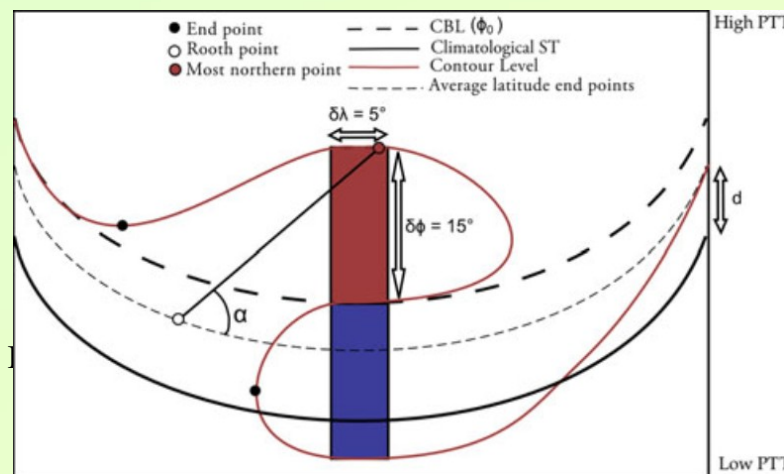
$$B(\lambda_0, \phi_0) = \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0}^{\phi_0 + \Delta\phi/2} \theta(\lambda_0, \phi_0) d\phi - \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0 - \Delta\phi/2}^{\phi_0} \theta(\lambda_0, \phi_0) d\phi$$

θ — потенциальная температура на динамической тропопаузе,

$\Delta\phi$ равно 30° .

$$B(\lambda_0, \phi_0) > 0$$

временная локальная блокировка (обрушение)



(Weijenborg et al., 2012)

Блокирование: продолжительность не менее четырех дней.

Критерий блокирования (Тибальди-Молтени)

$$GHGS(\lambda_0, \varphi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \varphi_0) - Z_{500}(\lambda_0, \varphi_S)}{\varphi_0 - \varphi_S} \quad GHGN(\lambda_0, \varphi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \varphi_N) - Z_{500}(\lambda_0, \varphi_0)}{\varphi_N - \varphi_0}$$

Z_{500} -высота поверхности уровня давления 500 гПа,

$$\varphi_S = \varphi_0 - 15^\circ$$

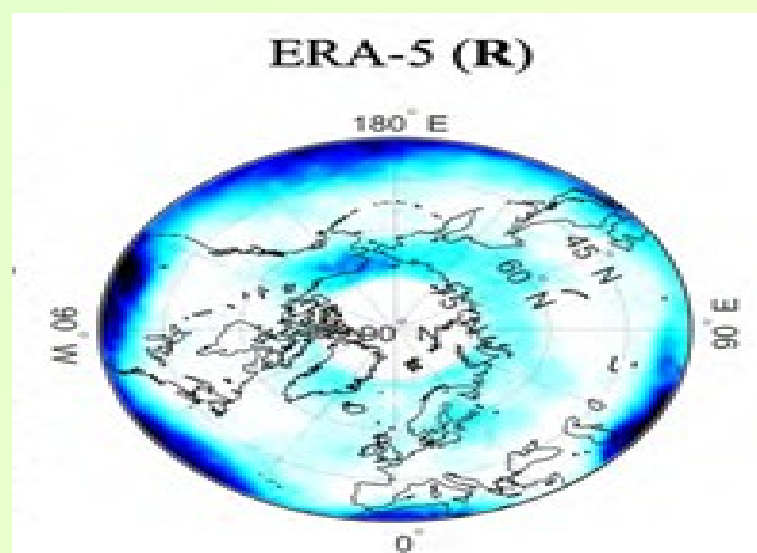
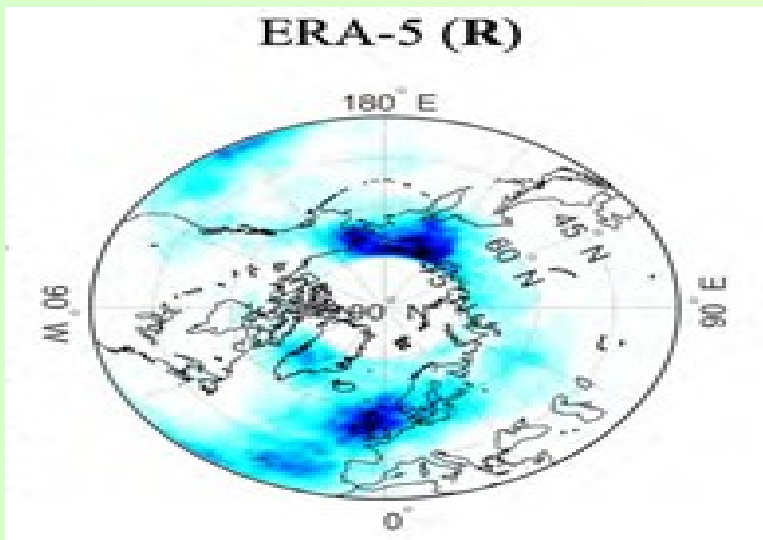
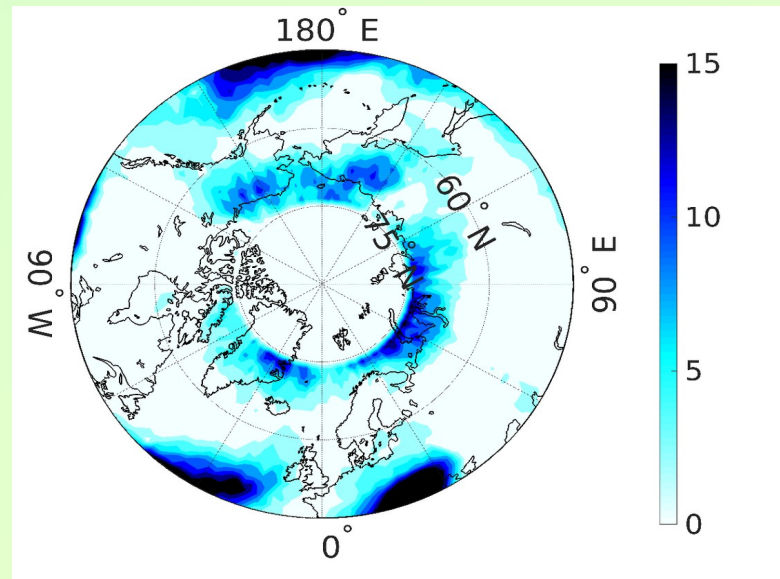
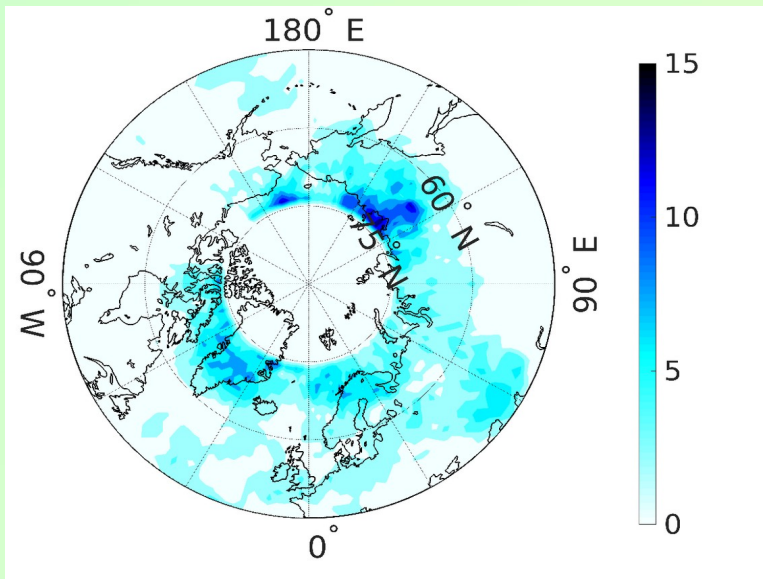
$$\varphi_N = \varphi_0 + 15^\circ$$

Условия моментального блокирования (обрушения волн)

$$GHGS(\lambda_0, \varphi_0) > 0 \quad GHGN(\lambda_0, \varphi_0) < -10 \text{ м/}^\circ \text{ шир.}$$

**Блокированием считается выполнение условий в течение
пяти суток**

Tibaldi, S.; Molteni, F. On the Operational Predictability of Blocking. / Tellus, 1990}, 42A, 343--365. doi:10.3402/tellusa.v42i3.11882



Климатология частоты моментальных блокирований (по Молтени-Тибальди зимой (слева) и летом (справа) по данным исторического эксперимента (сверху) и реанализа (внизу)).

С помощью модельных данных исследована чувствительность длительности и интенсивности блокирований к климатическим изменениям.

INMCM48 - используемая модель климатической системы
Воспроизводит динамику атмосферы, океана, морского льда, растительности и почвы с учетом парниковых газов

Океанический блок имеет разрешение 1×0.5 градусов и 40 уровней по вертикали.

Разрешение атмосферного блока 2×1.5 градуса по долготе и широте и 21 уровень по вертикали.

(* Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya, Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2018. V. 33. №6. P. 367–374.

Численный эксперимент

B0 - базовый эксперимент (исторический, 1900-2000г.)

C1- увеличение концентрации CO₂

A2 - уменьшение альбедо

Альбедо снега и льда A :

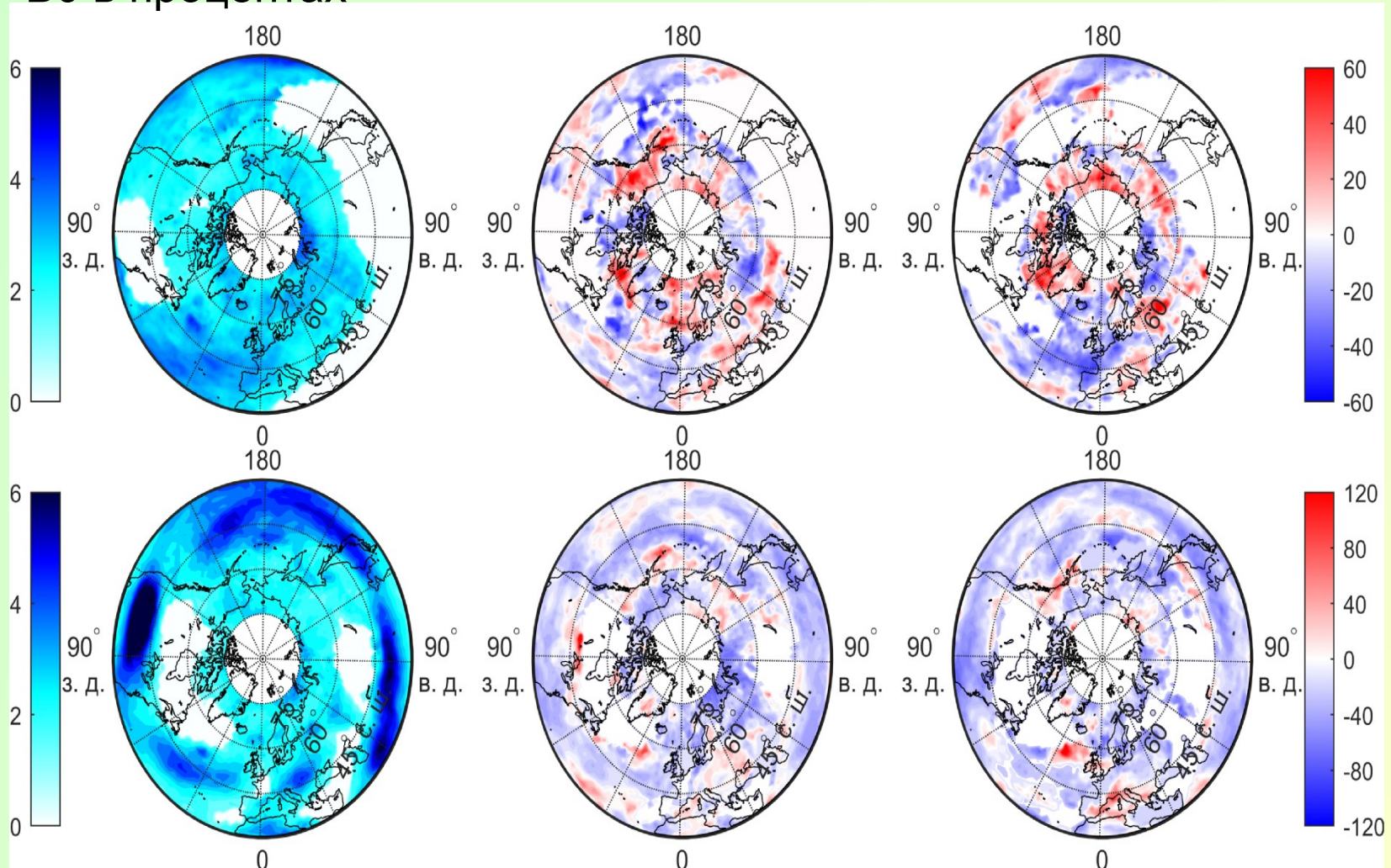
$A = A_m$ при температуре таяния T_m

$A = A_f$ при $T_s < T_f$, где T_s -температура поверхности, $T_f=263.15$ К

$$T_f < T_s < T_m \quad A = A_f - (A_f - A_m) \frac{T_s - T_f}{T_m - T_f}$$

Эксперимент	A_f	A_m	CO ₂ ,ppm
B0	0,8	0,6	360
C1	0,8	0,6	450
A2	0,7	0,5	360

Средняя длительность блокирующих ситуаций в зимний период(сверху) и в летний период(снизу). Слева-V0, в центре - разность между С1 и V0 в процентах, справа - разность между A2 и V0 в процентах



Интенсивность блокирования

Следуя формулировке Давини и др. (2012), после обнаружения блокирующего события в точке сетки (λ_0, ϕ_0) мы сначала определяем $RC(\lambda_0, \phi_0)$ следующим образом:

$$RC(\lambda_0, \phi_0) = \frac{1}{2} \left[\frac{z_{500}(\lambda_w, \phi_0) + z_{500}(\lambda_0, \phi_0)}{2} + \frac{z_{500}(\lambda_E, \phi_0) + z_{500}(\lambda_0, \phi_0)}{2} \right]$$

блокирующие долготы региона (λ_w, λ_E)

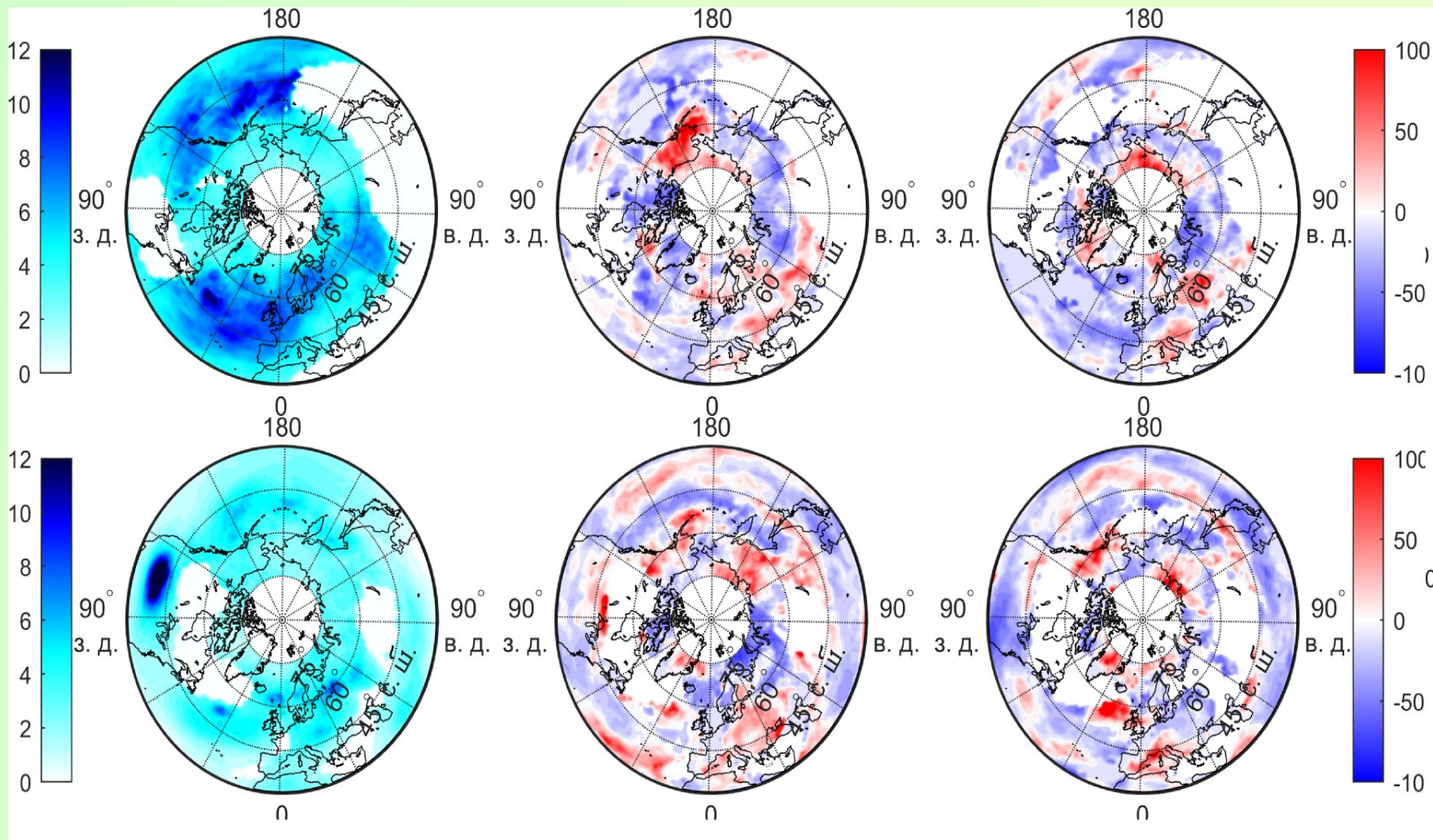
Интенсивность блокировки $BI(\lambda_0, \phi_0)$ представляет собой безразмерное значение.

$$BI(\lambda_0, \phi_0) = 100 \cdot \left[\frac{z_{500}(\lambda_0, \phi_0)}{RC(\lambda_0, \phi_0)} - 1 \right]$$

Интегральная интенсивность блокирующей ситуации рассчитывалась как сумма индекса BI за период, когда выполнялись условия Тибальди-Молтени:

$$I = \sum_{t=t_0}^{t_{\max}} BI$$

Средняя интенсивность блокирующих ситуаций в зимний период(сверху) и в летний период(снизу). Слева-V0, в центре - разность между C1 и V0 в процентах, справа - разность между A2 и V0 в процентах



Заключение

Были получены оценки изменения длительности и интенсивности блокирований при уменьшении количества льда. Показано, что при климатических изменениях происходит смещение основных областей блокирования. Значительные изменения характеристик циркуляции происходят в Карском море, особенно в эксперименте с изменением альbedo льда. Это связано с тем, что при изменениях климата наиболее существенные потери льда происходят в районе Баренцева и Карского морей, в результате чего меняются тепловые и радиационные потоки с подстилающей поверхности.