



Атмосферные блокинги и связанные с ними климатические аномалии

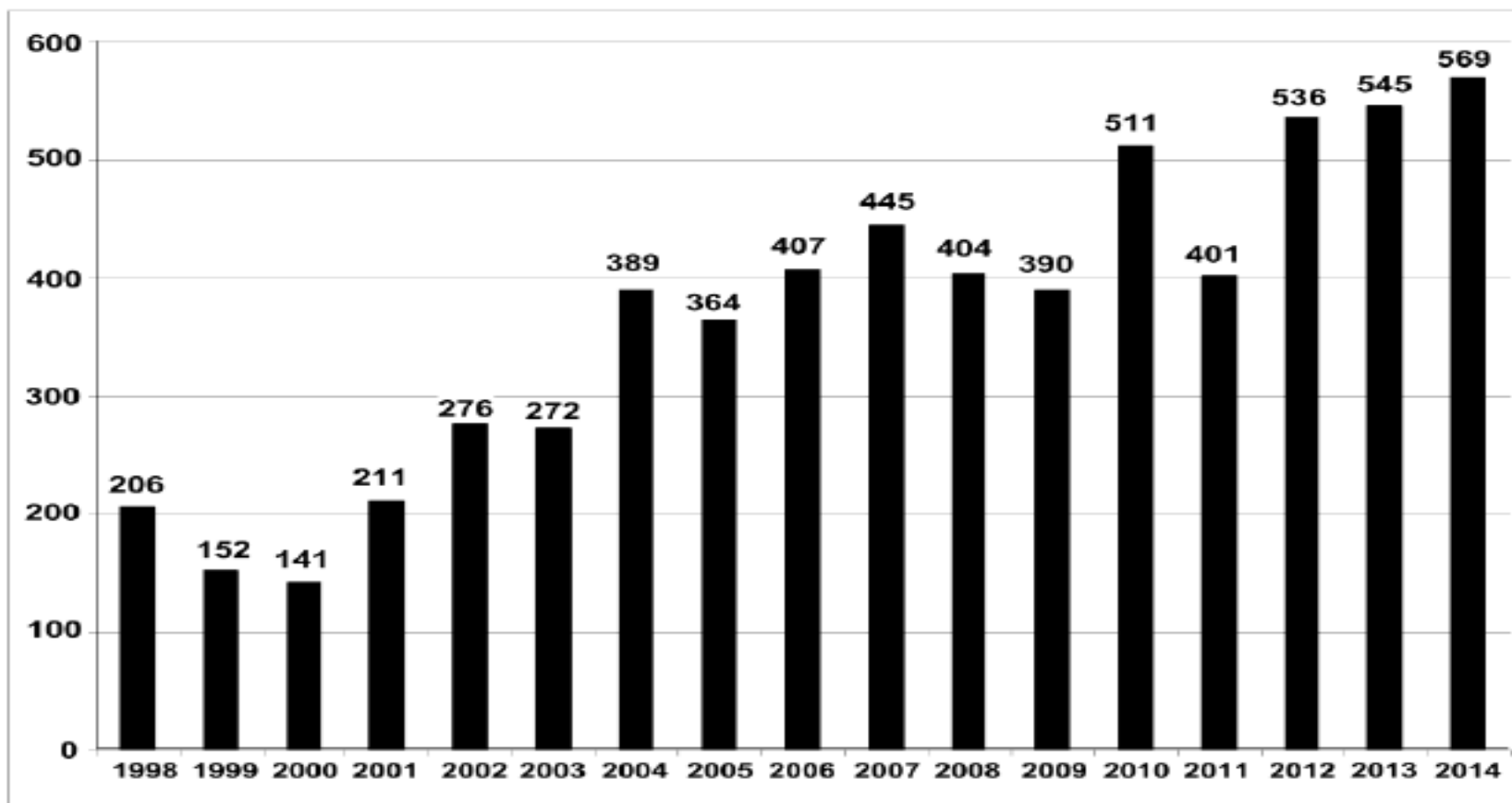
И.И. Мохов

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

mokhov@ifaran.ru

Нелинейные волны - 2016

Изменения числа опасных атмосферных явлений в России

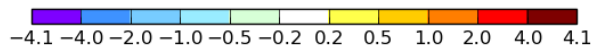
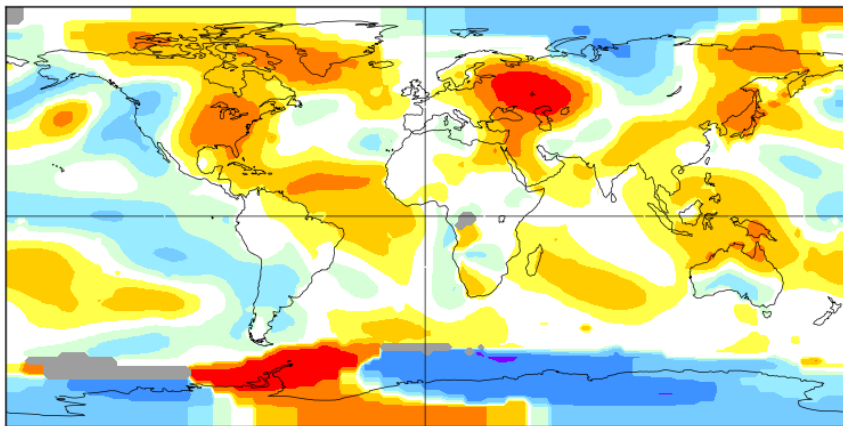


по данным Росгидромета

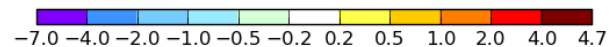
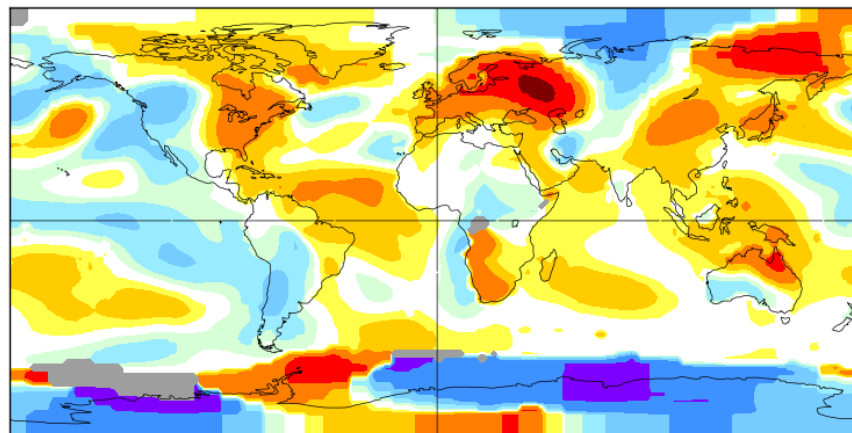
При этом формирование длительных, более двух недель, региональных аномалий циркуляционного, температурного и гидрологического режимов, в том числе засух летом и сильных морозов зимой, связано с блокирующими режимами в атмосфере - блокингами.

Температурные аномалии, связанные с атмосферными блокинками

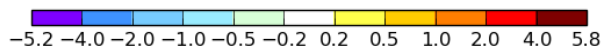
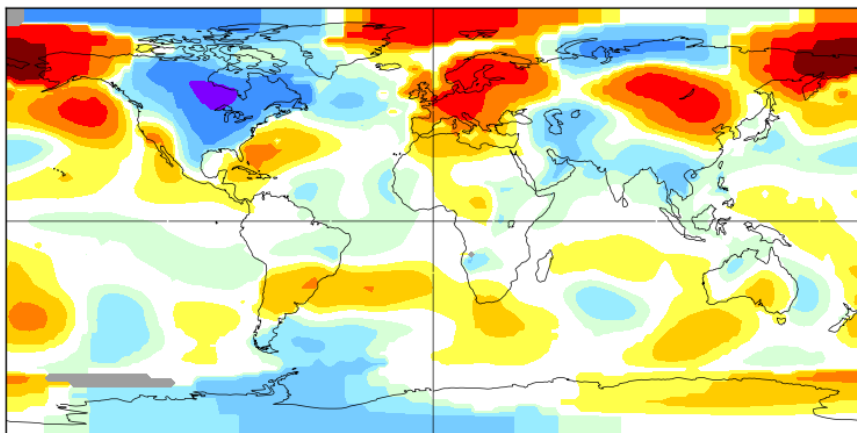
Jun-Jul-Aug 2010 L-OTI(°C) Anomaly vs 2000-2009 0.06



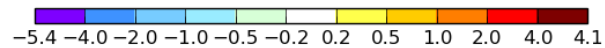
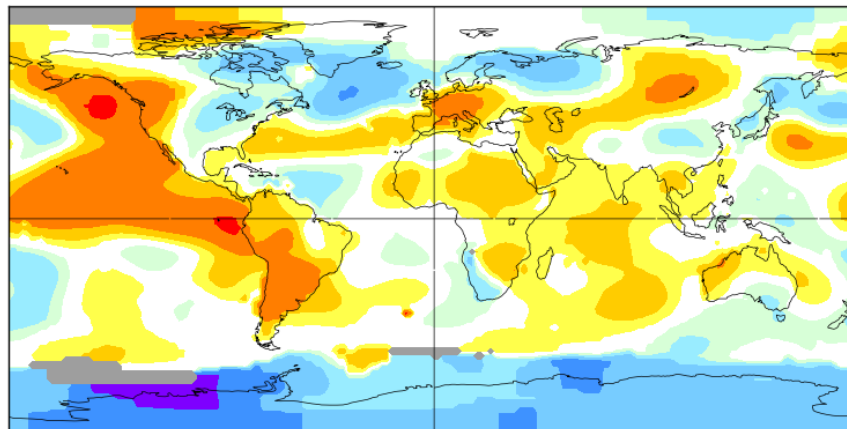
July 2010 L-OTI(°C) Anomaly vs 2000-2009 0.03



Dec-Jan-Feb 2014 L-OTI(°C) Anomaly vs 2004-2013 0.05



Jun-Jul-Aug 2015 L-OTI(°C) Anomaly vs 2005-2014 0.11



Повторяемость атмосферного блокирования на разных долготах летом в Северном полушарии

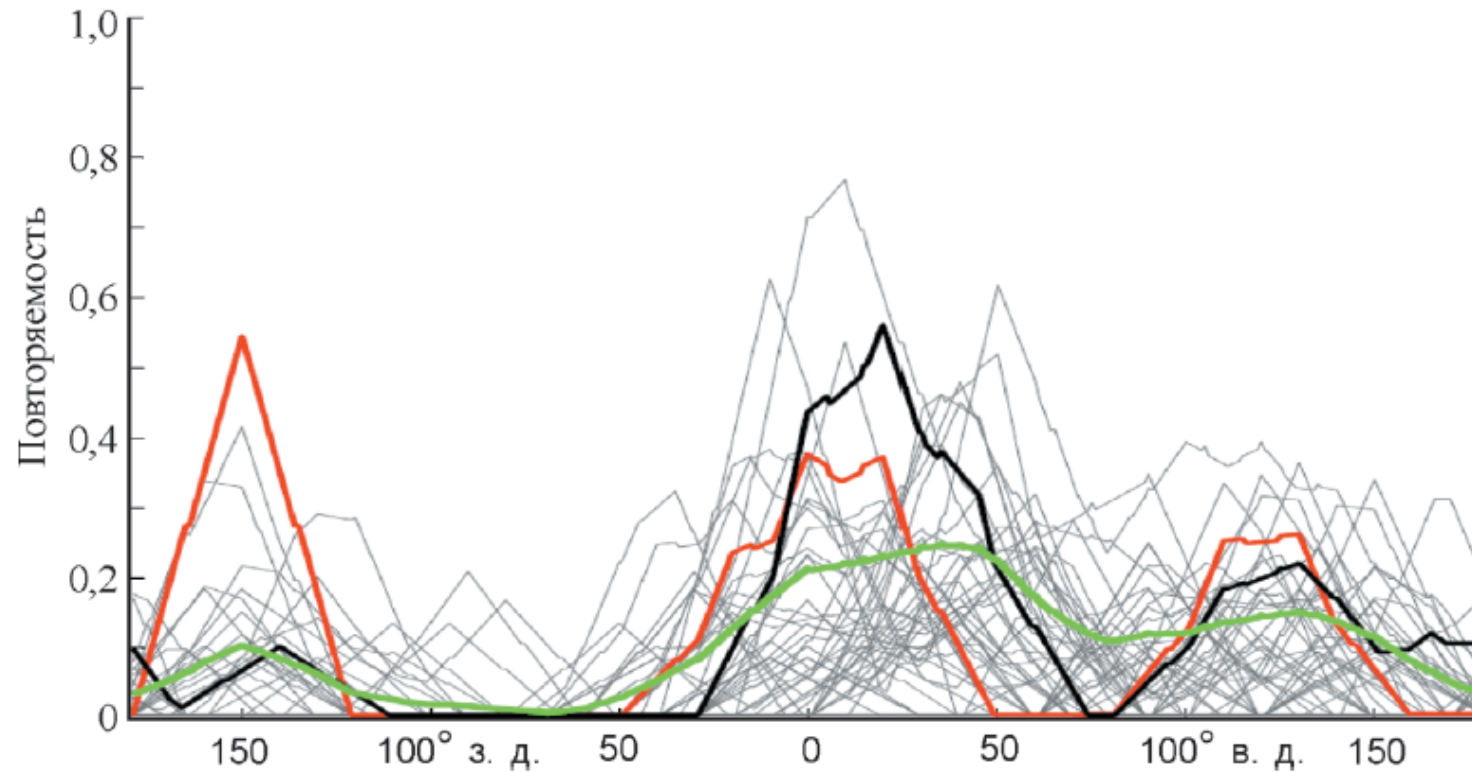
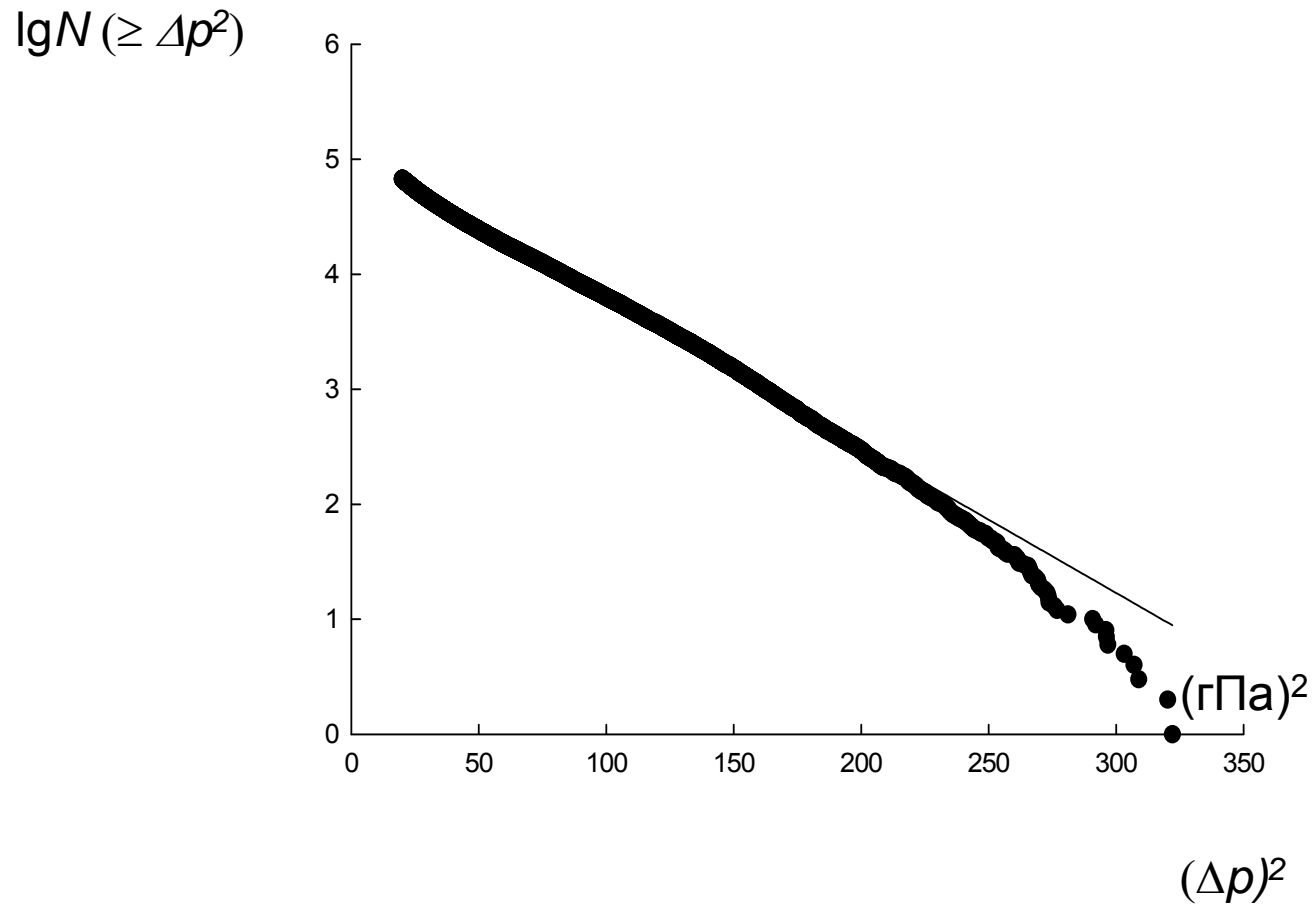


Рис. 18. Меридиональное распределение повторяемости атмосферных блокировок в летний период в Северном полушарии по данным за 1969—2013 гг. На фоне распределений для разных лет, отмеченных серыми линиями, выделены распределения для лета 2010 г. (черным цветом) и 2013 г. (красным цветом), а также среднее распределение для всех лет (зеленым цветом).

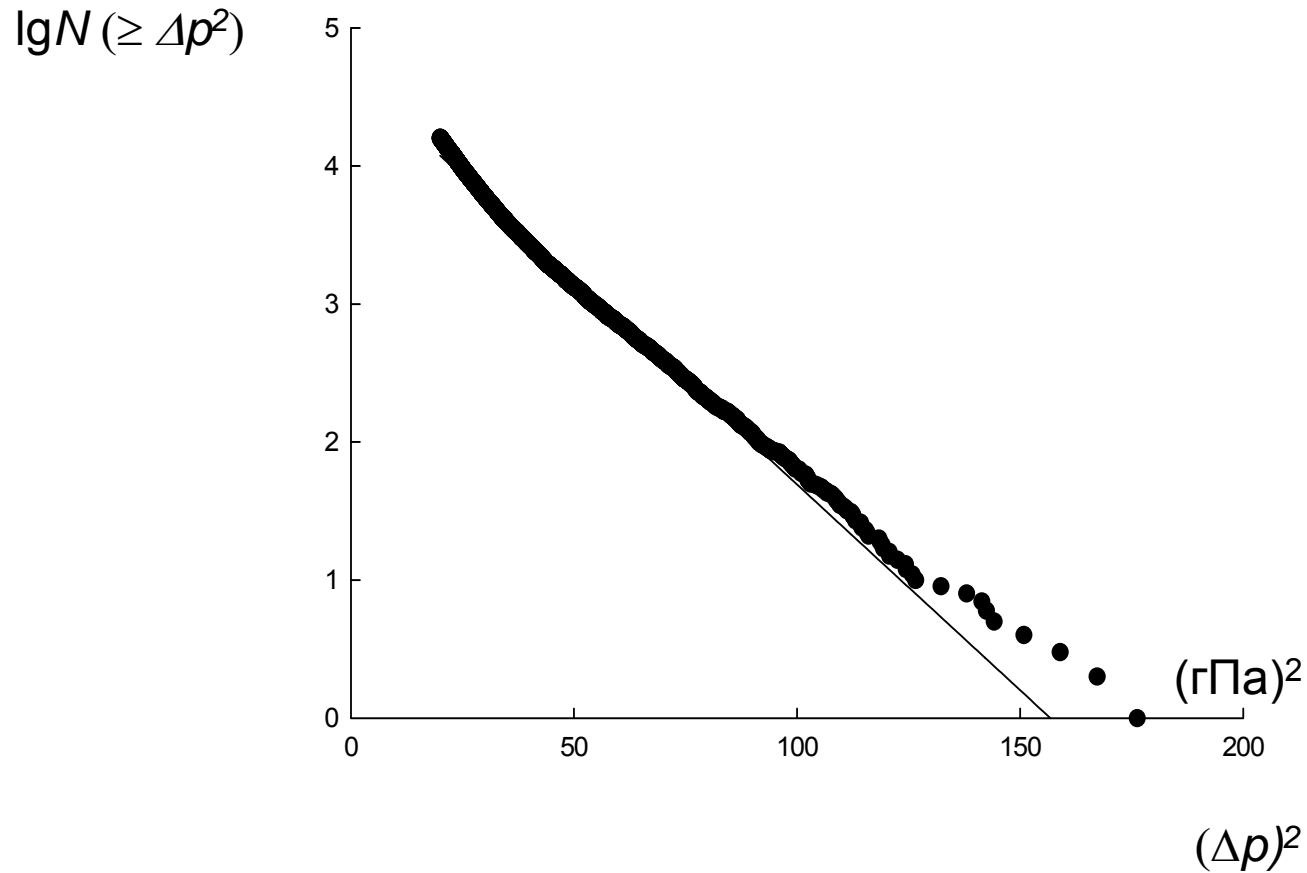
Внетропические циклоны



Кумулятивное число циклонов с кинетической энергией $\geq E_k \sim (\Delta p)^2$

- Крупные (за исключением самых мощных) атмосферные вихри по энергии распределены экспоненциально, как в статистике Больцмана.
- Можно сказать, что они являются частью канонического ансамбля Гиббса, где океан играет роль термостата, а атмосфера является подсистемой, где вихри – это флуктуации, распределенные по Больцману.

Внетропические антициклоны



Кумулятивное число антициклонов с кинетической энергией $\geq E_k \sim (\Delta p)^2$

Блокинги

Rex (1950)

Синоптический метод обнаружения блокирующих процессов в атмосфере основан на требовании одновременного выполнения ряда условий:

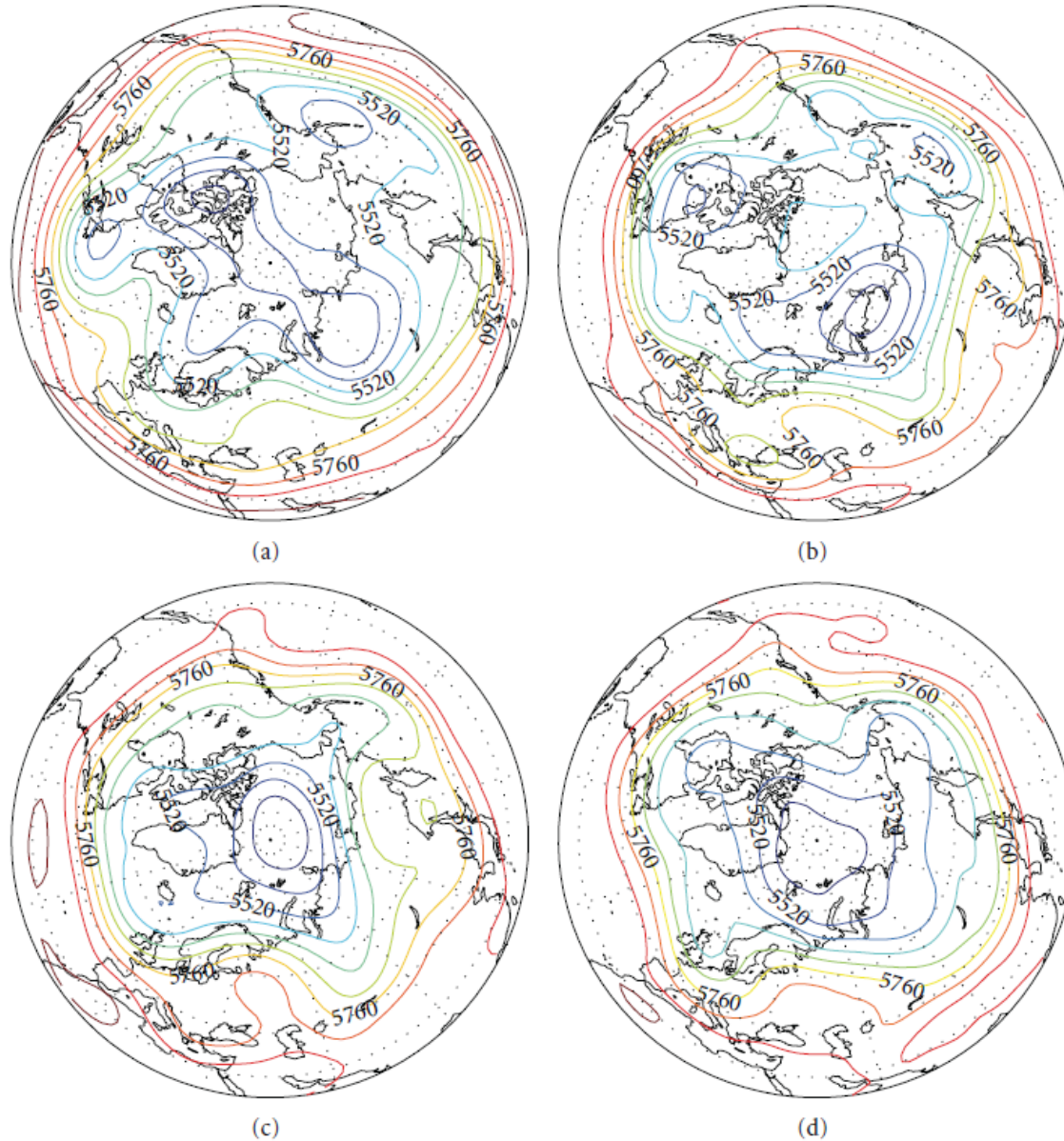
- 1) существование малоподвижного высокого антициклона;
- 2) развитие меридионального типа циркуляции, характеризующегося одной из трех форм: расщепленным западным потоком (диполем в барическом поле - на севере ($\sim 60^\circ$ с.ш.) антициклон, на юге ($\sim 40^\circ$ с.ш.) - циклон, омегаобразным или меридиональным гребнем;
- 3) пространственная протяженность блокирующей системы - $35-45^\circ$ долготы;
- 4) расположение антициклона или гребня к северу от 30° с.ш.;
- 5) сохранение такой ситуации в течение определенного интервала времени.

.

Блокинги

Блокирование может быть связано с особенностями обтекания поверхности (**блокирование меридионального типа**), с крупномасштабной неустойчивостью зонального потока, приводящей к образованию мощной системы взаимодействующих антициклона и циклона (**блокирование расщепляющегося типа**), или мощного гребня и двух циклонов (**омега-блокирование**).

Блокирование с расщеплением линий тока в основном наблюдается над Атлантикой и Евразией, блокирование меридионального типа практически всегда в районе Уральских и Скалистых гор.



The NCEP-NCAR reanalyses for the Northern Hemisphere 500 hPa heights for (a) May, (b) June (20–30), (c) July, and (d) August (1–20), 2010. The contour interval is 60 dam.

**Anthony R. Lupo,¹ Igor I. Mokhov,² Merseid G. Akperov,²
Alexander V. Chernokulsky,² and H. Athar³ (2012)**

Блокинги

зима 1963 г.

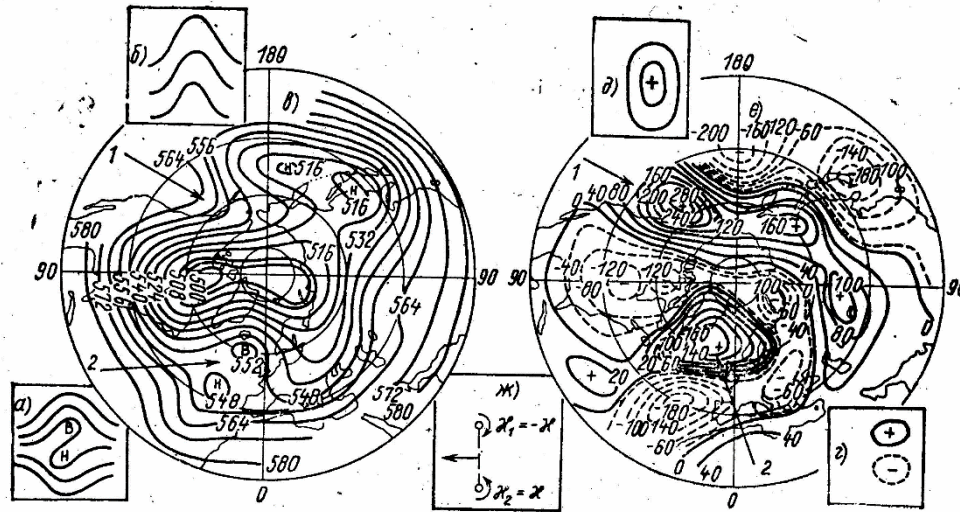


Рис. 1. Типы блокирования.

а, б — расщепляющийся и меридиональный в поле геопотенциала на карте AT_{500} соответственно; в — блокирование меридионального (1) и расщепляющегося (2) типов на среднемесячной карте AT_{500} за январь 1963 г.; г, д — блокирование расщепляющегося и меридионального типов соответственно в поле отклонений геопотенциала от многолетнего на карте AT_{500} ; е — блокирование меридионального (1) и расщепляющегося (2) типов в поле отклонений геопотенциала от многолетнего среднего на карте AT_{500} за январь 1963 г.; ж — гидродинамическая интерпретация блокирования расщепляющегося типа с помощью пары вихрей

лето 1971 г.

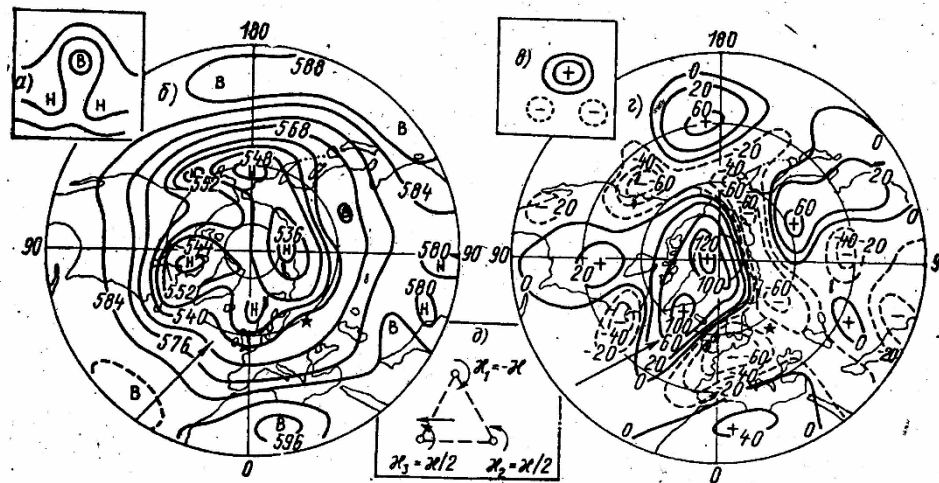


Рис. 2. Омега-блокирование.

а — в поле геопотенциала на карте AT_{500} , б — на среднемесячной карте AT_{500} за июнь 1971 г. (см. стрелку), в — в поле отклонений геопотенциала на карте AT_{500} , г — в поле отклонений геопотенциала от многолетнего среднего за июнь 1971 г. (см. стрелку), д — гидродинамическая интерпретация с помощью тройки вихрей.

Обухов и др. (1984)

Блокинги

Структура блокирующего образования расщепляющегося типа (наличие двух примерно одинаковых по интенсивности антициклона на севере и циклона на юге) легко объяснима с позиций классической гидродинамики.

Если имеется два точечных вихря с равными по величине и противоположными по знаку интенсивностями $c_1 = -c$, $c_2 = c$, $c > 0$ на расстоянии d (так называемая пара вихрей), то эта конфигурация является равновесной. При этом вихри движутся перпендикулярно прямой, их соединяющей, со скоростью

$$U = c/2\pi d .$$

Если такая конфигурация находится в зональном потоке с постоянной скоростью, равной по величине, но противоположной по направлению скорости движения вихрей, то вихревая пара будет неподвижна относительно поверхности.

Блокинги

Основная причина блокирования расщепляющегося типа - неустойчивость струйного течения (предшествует блокированию).

В некотором поперечном сечении струи происходит уменьшение меридионального градиента абсолютного вихря $\eta = \omega + f$, ω - относительный вихрь, f - параметр Кориолиса ($f = 2\Omega \sin\varphi$, Ω - угловая скорость вращения Земли, φ - широта). Это, как следствие, вызывает генерацию антициклонической завихренности ($\omega < 0$) на севере и такого же по модулю циклонической завихренности на юге, так чтобы суммарный вихревой заряд $c_1 + c_2 = \iint \omega dS$ оставался равным нулю.

Блокинги

Омега блокирование имеет ту же природу, что и блокирование расщепляющегося типа, т.е. связано с неустойчивостью струйного течения. Поле относительного вихря при омега блокировании представимо тройкой вихрей $\chi_1 = -\chi$, $\chi_2 = \chi_3 = \chi/2$. Такая вихревая тройка является равновесной, если вихри расположены в вершинах правильного треугольника со стороной r , и движется как единое целое в направлении прямой, соединяющей вихри χ_2 и χ_3 , со скоростью

$$U = \chi \sqrt{3} / 4\pi r$$

В зональном потоке со скоростью, равной по величине, но противоположной по направлению скорости движения вихрей такая тройка вихрей стационарна относительно поверхности.

Блокинги

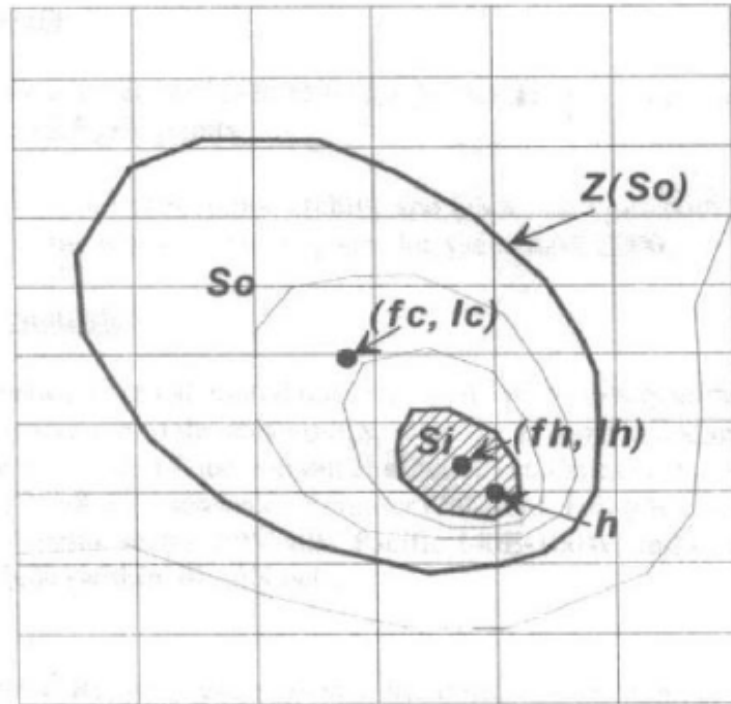
Есть различные модели блокингов. Невыясненной до конца остается роль вихрей синоптического масштаба (с временами порядка недели и менее) в формировании, развитии и диссипации блокирующих структур.

Ряд моделей предполагает, что формирование блокинга возможно даже при полном отсутствии передачи энергии от синоптических вихрей к более медленным. Причиной развития блокингов может быть баротропная или смешанная баротропно-бароклинная неустойчивость.

В других же моделях синоптические вихри существенны для формирования и развития блокингов, являясь источником энергии для торможения зонального потока.

Отдельные модели блокингов не учитывают неадиабатические источники и стоки энергии в системе, хотя неадиабатические процессы существенны для формирования и развития блокингов.

Blockings identification

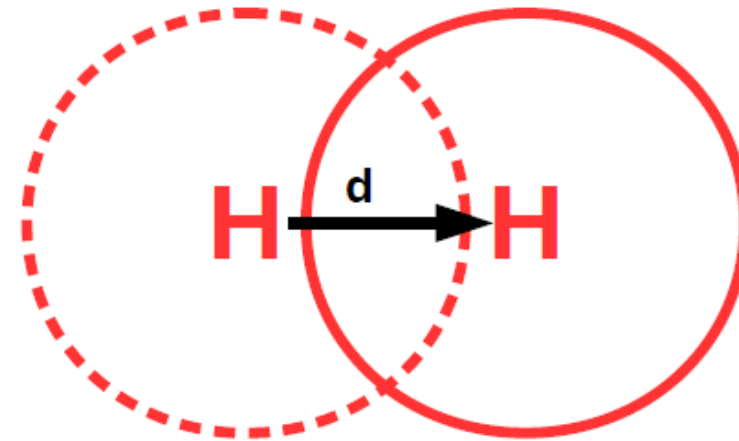


$$fh = \iint_{S_0} f(x) ds, \quad lh = \iint_{S_0} l(x) ds$$

$$\text{Area} = \iint_{S_0} ds$$

Duration ≥ 5 days

Quasi-stationary events: threshold of daily propagation d



$$d = 0.3R; 0.4R; 0.5R$$

Блокинги

Лежёнасом и Оклендом (1983) был предложен простой метод диагностики блокирования.

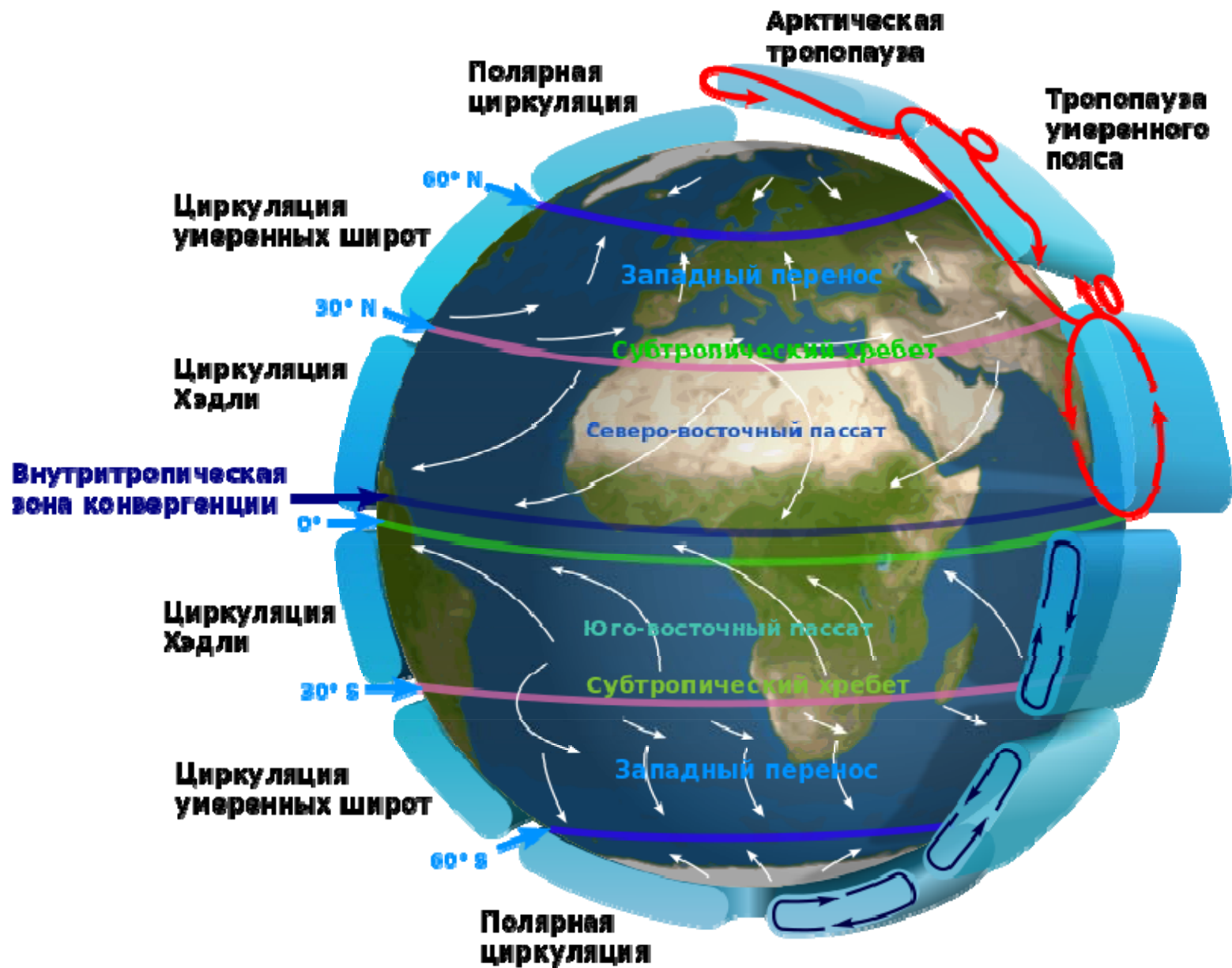
При обычном зональном переносе в тропосфере средних широт Северного полушария меридиональный градиент геопотенциала направлен в сторону экватора. Причем наибольшая величина градиента в широтном поясе 40-60° с.ш. Согласно критерию Лёженаса и Окленда блокирование осуществляется при

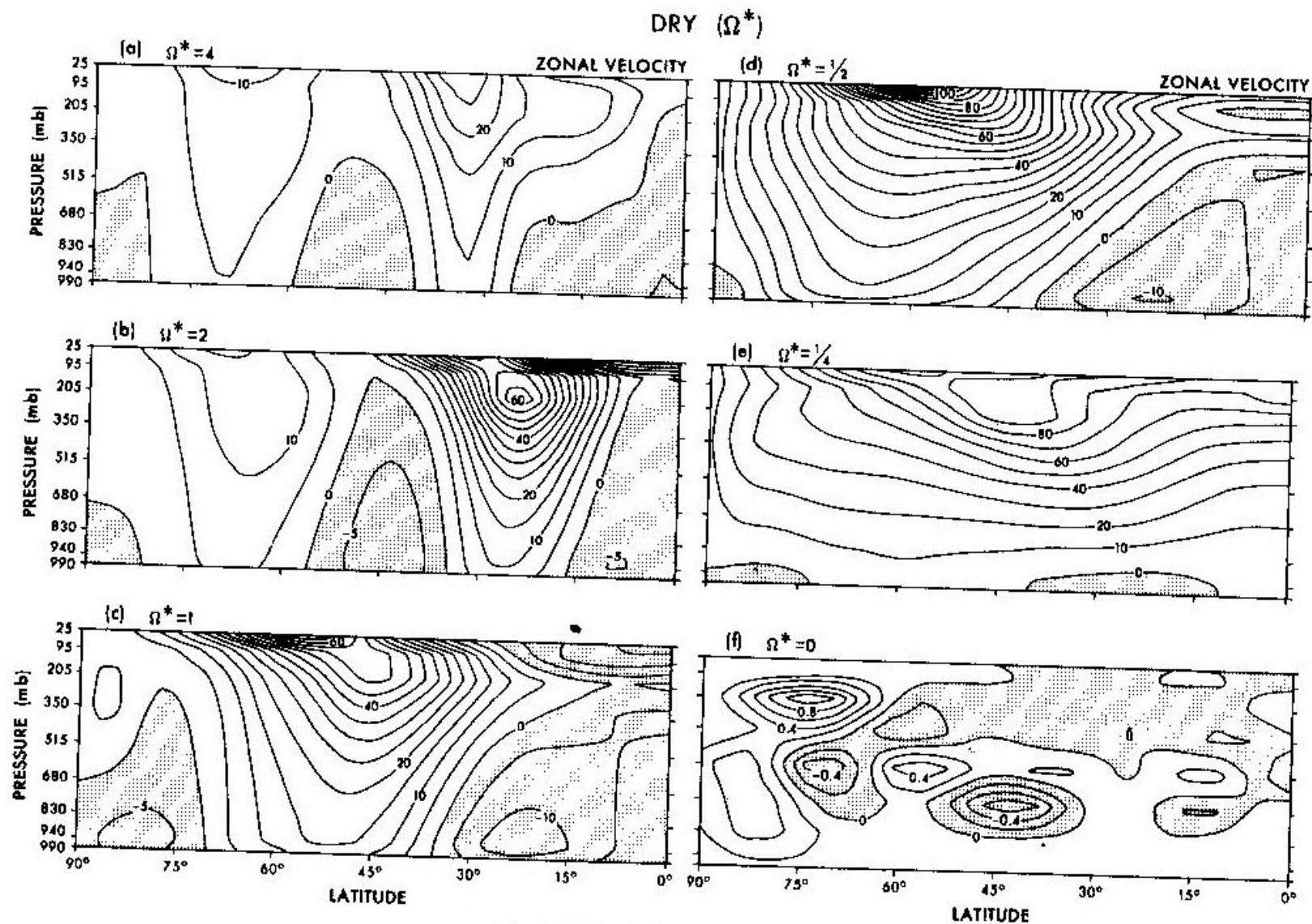
$$I(l) = H(l, 40^\circ \text{с.ш.}) - H(l, 60^\circ \text{с.ш.}) < 0$$

и

$$[I(l-10) + I(l) + I(l+10)] < 0$$

в течение не менее 5 суток. Здесь H – высота изобарической поверхности 500 мб, l – долгота, I – индекс Лежёнаса-Окленда.





Зональная скорость в сухой атмосфере при разной угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси, нормированной на современную, по модельным расчетам

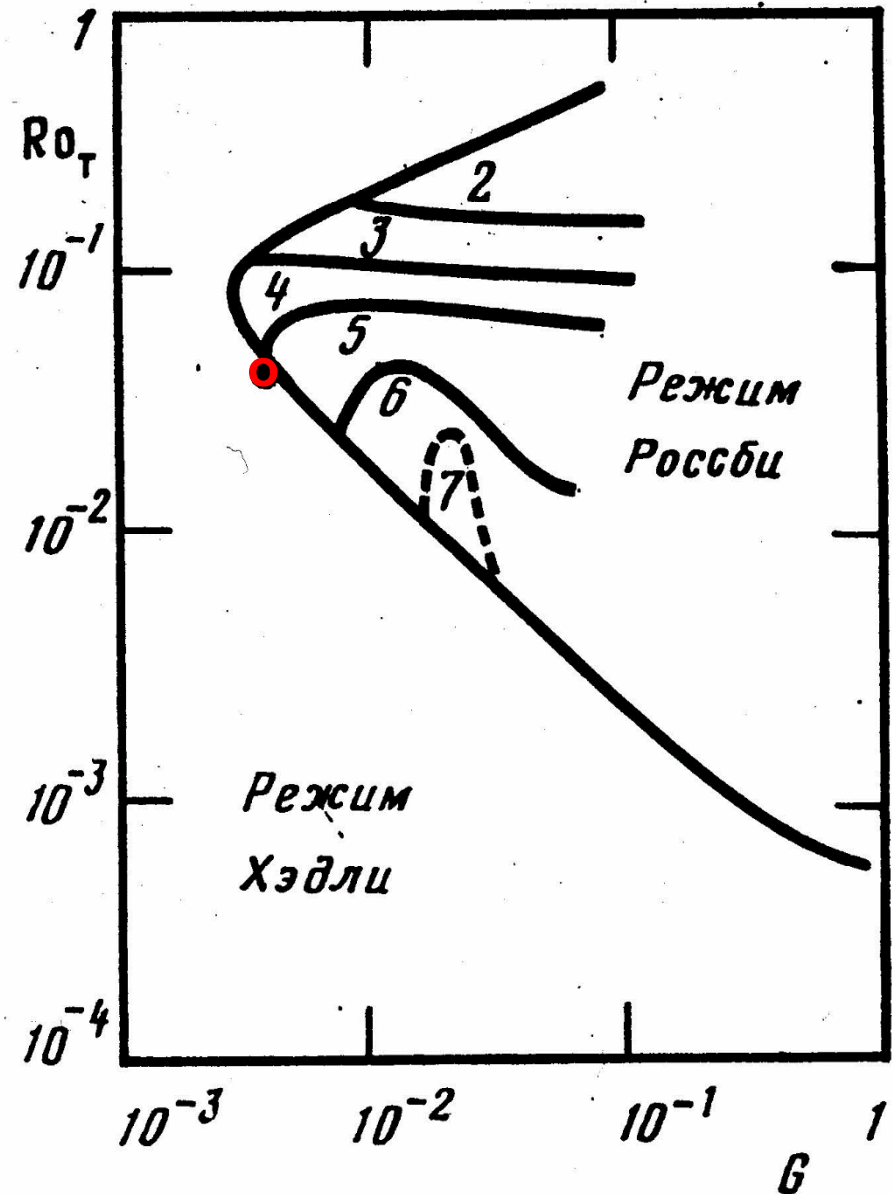
Williams (1988)

Циркуляционные режимы

Рис. 3. Границы областей режимов Хэдли и Россби (с различными волновыми числами) в зависимости от термического числа Россби Ro_T и вращательного числа G для лабораторных экспериментов [7]. Точкой отмечен средний атмосферный режим согласно [8]

Fultz et al. (1959)

Hunt (1979)



Волны Россби

Согласно результатам моделирования общей циркуляции земной атмосферы в сопоставлении с лабораторными экспериментами в приближении f -плоскости бароклинная атмосфера в среднегодовом режиме находится вблизи границы раздела режимов Хэдли (осесимметричного) и Россби (волнового).

Переход от летнего режима к зимнему соответствует росту термического числа Россби Ro_T (G – вращательное число). При этом система переходит от режима Хэдли к волновому режиму Россби (состояния с волновыми числами $m=5,4,3$) с дальнейшим выходом снова в режим Хэдли.

Осенью система находится вблизи среднегодового режима и при переходе от лета к зиме наиболее вероятно появление волновых режимов с $m=5$ и $m=4$.

Блокинги Волны Россби

Режим “бабьего лета”
 (“Indian Summer”) как
стационирование
волны Россби

осень 1979 г.

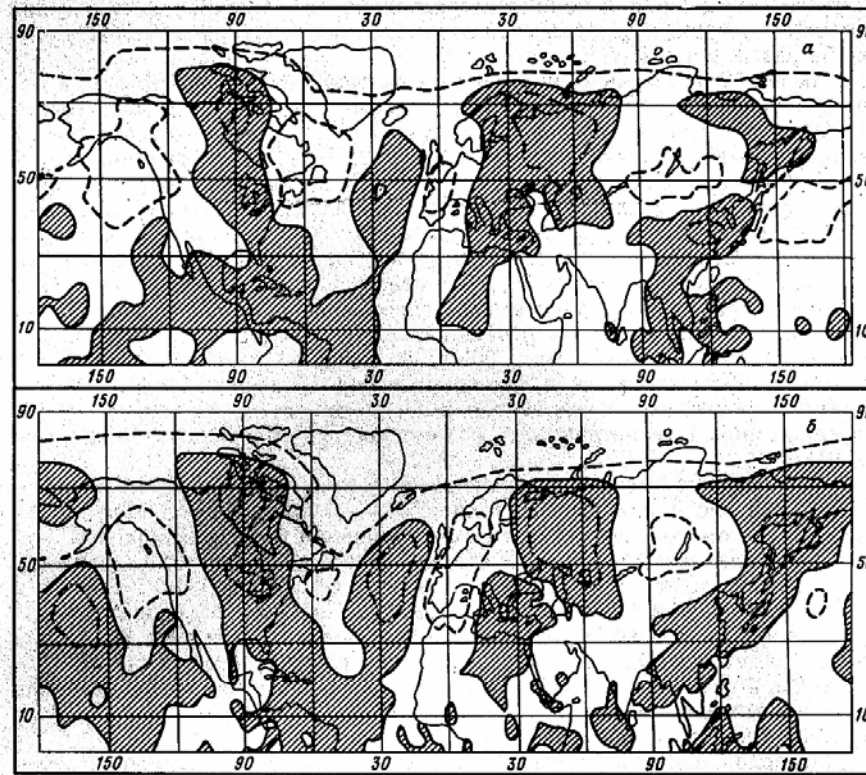


Рис. 1. Границы областей положительных (заштриховано) и отрицательных вариаций температуры (а) и геопотенциала (б) на поверхности 500 мбар для среднего (пятидневного) режима 13—17.X относительно среднего режима 7—11.X 1979 г. Пунктиром и штрихпунктиром отмечены соответственно области уменьшения и увеличения температуры на 5 К, а геопотенциала на 100 м

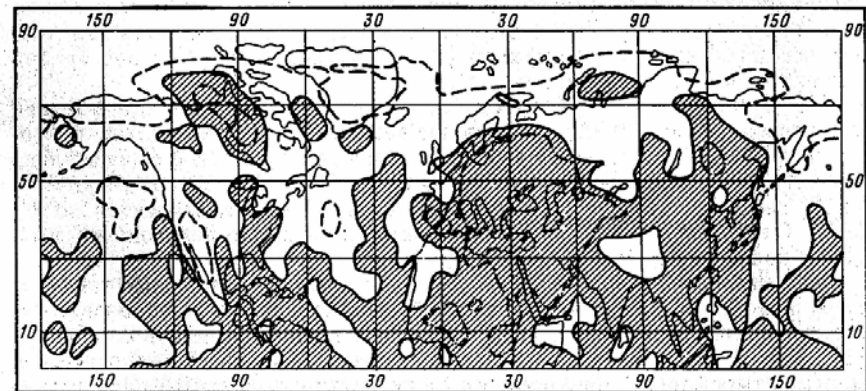


Рис. 2. Аналогично рис. 1 для вариаций температуры на поверхности 1000 мбар

Волны Россби

Простейший вариант: баротропная модель атмосферы в приближении β -плоскости с зональным распространением волн Россби.

Скорость волн Россби: $U_R = \beta/k^2$.

При зональном волновом числе $k = 2\pi/\lambda$ с длиной волны $\lambda = 2\pi R \cos\varphi/m$ и m – числе волн вдоль круга широты φ ($\beta = 2\Omega \cos\varphi/R$, R и Ω - радиус и угловая скорость вращения Земли)

$$U_R = 2\Omega R (\cos\varphi)^3 / m^2 \quad (1).$$

В канале конечной ширины скорость волны Россби меньше, чем в асимптотическом варианте (1).

Блокинг Волны Россби

Таблица 1

Широтные зависимости скорости волны Россби U_R [м/с] согласно (1) при разных волновых числах m и зональной скорости U (500 мбар) по данным для 13—17.X.1979 г.

Широта, °N	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
U_R m	16,1 1	9,2 2	4,4 4	7,2 4	11,0 4	15,4 4	20,5 4	26,0 4	14,2 6	9,4 8
U (500 мбар)	8,0	5,6	4,3	7,1	10,3	12,6	16,8	16,8	12,1	7,9
U_R m	4,0 2	4,1 3	2,8 5	4,6 5	7,0 5	9,8 5	13,1 5	16,7 5	10,3 7	7,4 9

при $U=U_R$

$$dU/dT = -2U_R(0)(dm/dT)/m$$

при $dU/dT < 0 \rightarrow dm/dT > 0$

Характеристики блокингов расщепляющегося типа могут быть оценены на основе простейшей модели пары баротропных вихрей с противоположными завихренностями $-k$ (антициклон) и k (циклон) в баротропном квазизональном потоке U , направленном на восток. Ось, соединяющая центры вихрей, предполагается перпендикулярной направлению течения, так что антициклон располагается к северу от циклона. Условие стационарности такой пары вихрей имеет вид [6]:

$$U = \frac{\kappa}{2\pi kL} \geq 0,$$

где $\kappa = \int \omega_z ds$, ω_z – вертикальная компонента относительной завихренности и интегрирование проводится по всей площади вихря. При этом принимается, что проекция вихрей на земную поверхность – касающиеся друг друга эллипсы с осями L по долготе и kL по широте, где k – параметр задачи. Далее для простоты вихри считаются симметричными с $k = 1$ и пространственное распределение скорости u в вихре предполагается симметричным относительно центра вихря с максимумом u_m , расположенным на окружности радиуса $L/4$ с квадратичным радиальным профилем изменения. Здесь и далее индексом m отмечено максимальное значение соответствующей величины.

С учетом уравнения неразрывности из (1) следует

$$U = f(k)u_m, \quad (1a)$$

где $f(k) \sim O(1)$. Использование уравнения геострофического баланса при условии гидростатики приводит к следующему выражению:

$$u_m = \left| \frac{g(\partial H / \partial y)}{f} \right|_m, \quad (2)$$

где $f = 2\Omega \sin \phi$ – параметр Кориолиса, Ω – угловая скорость вращения Земли, ϕ – широта, H – высота изобарической поверхности 500 мбар (относительно фона) в вихре, ось y направлена на север. В соответствии с распределением скорости распределение H предполагается симметричным относительно центра вихря с максимумом H_m в центре.

На основе (2) можно получить оценку

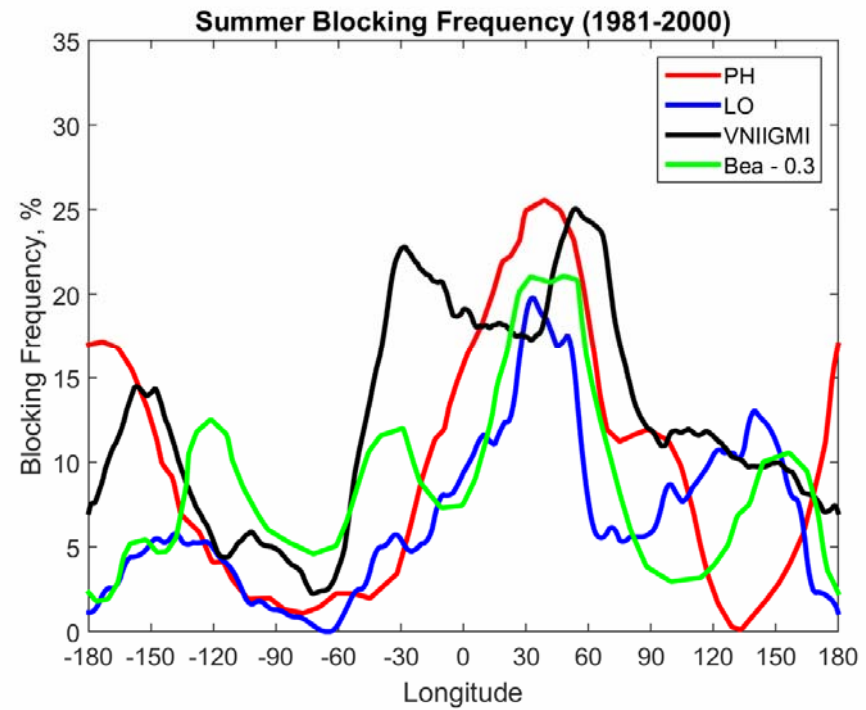
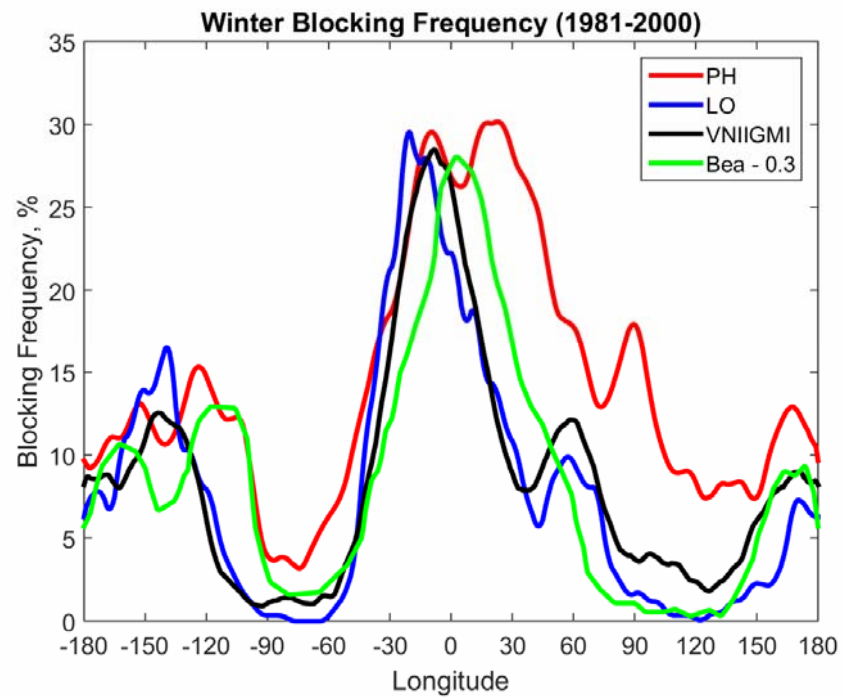
$$U \sim \frac{g H_m}{f L}. \quad (2a)$$

$$\frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \sim \frac{1}{H_m} \frac{dH_m}{dT} - \frac{1}{U} \frac{dU}{dT},$$

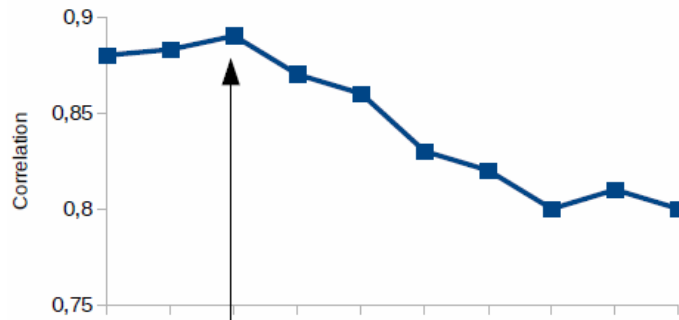
$$\frac{1}{\tau} \frac{d\tau}{dT} \sim \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} - \frac{1}{U} \frac{dU}{dT}.$$

H_m характеризует интенсивность блокинга, L – размер, τ – время жизни
 T - температура

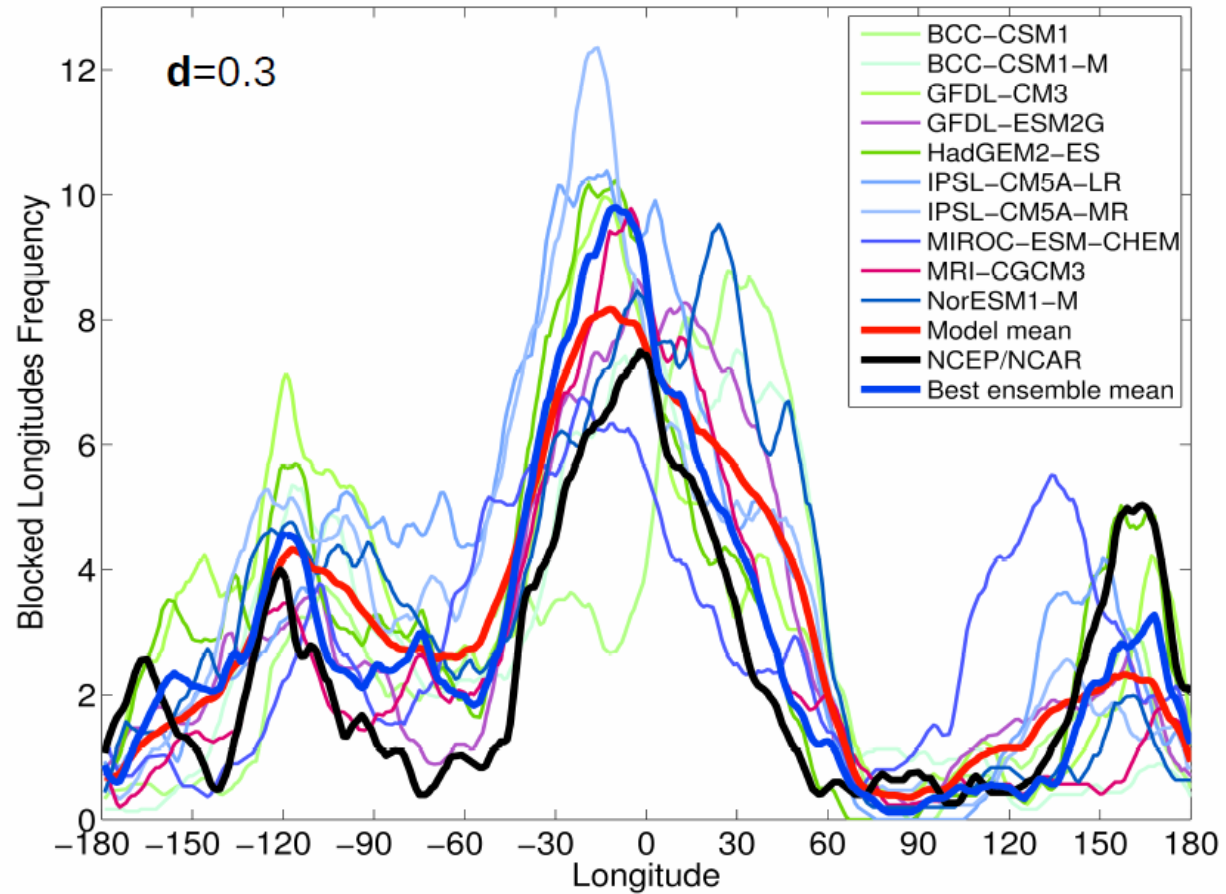
Сравнение методов детектирования блокингов



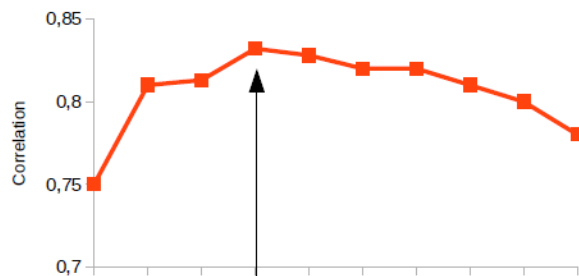
Winter blockings in 1976-2005



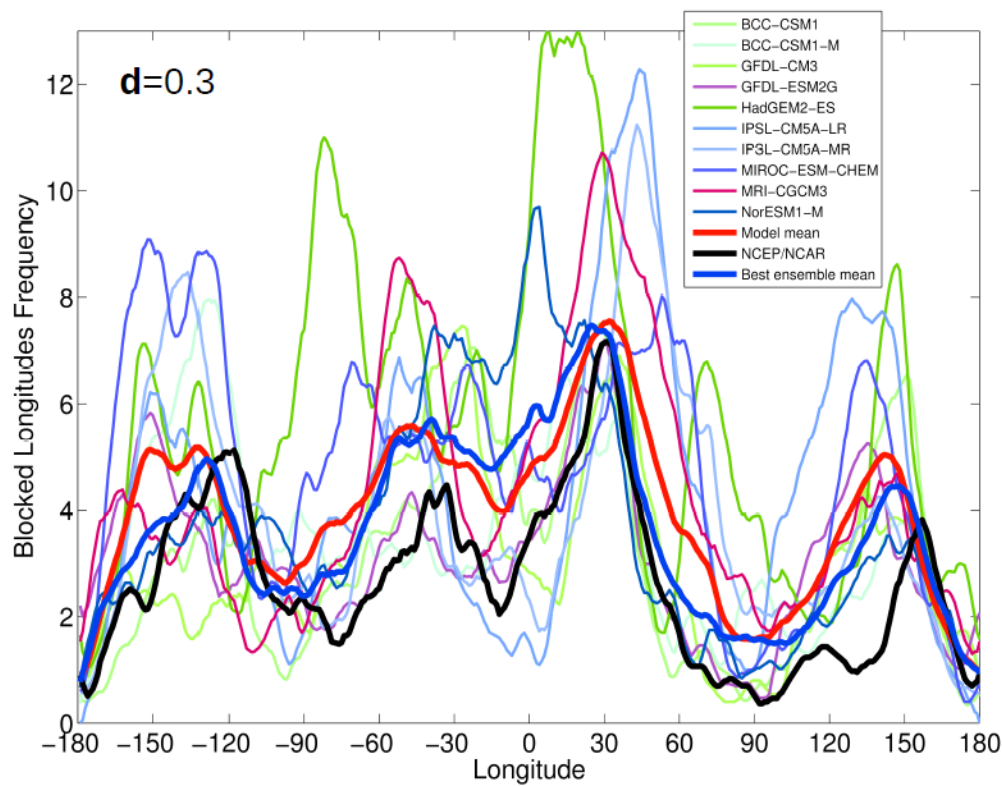
Best ensemble
GFDL-ESM2G
HadGEM2-ES
MRI-CGCM3



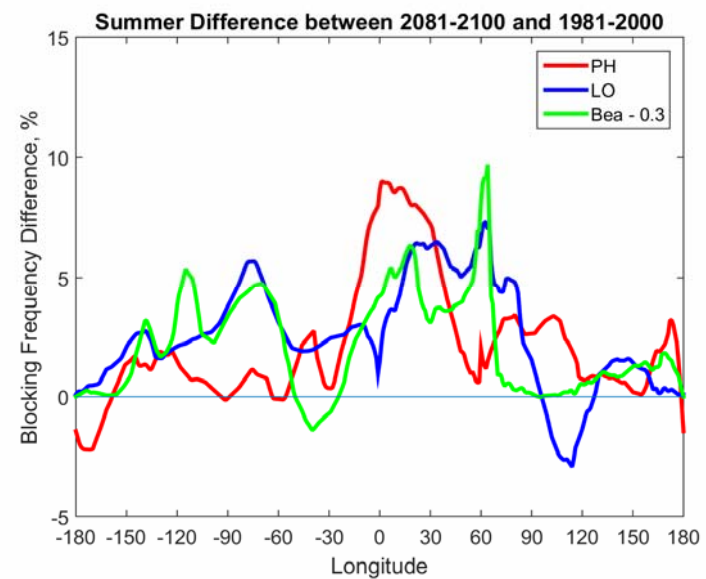
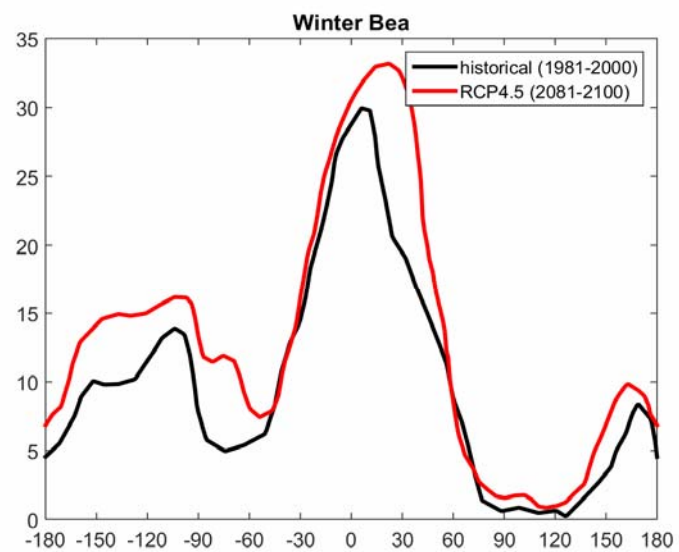
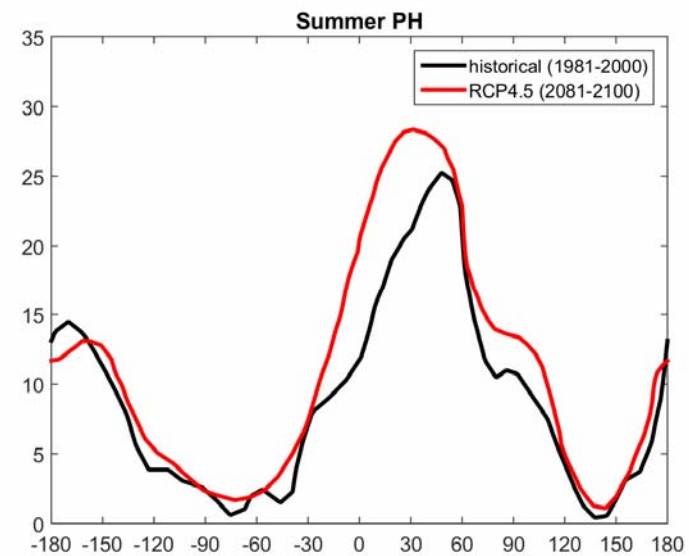
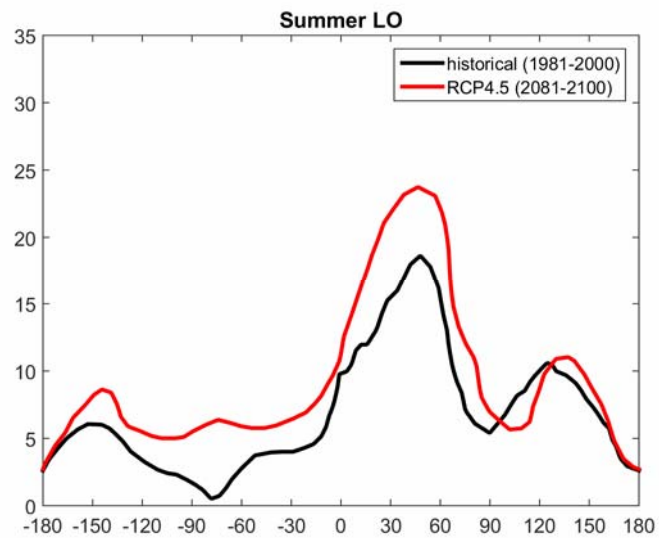
Summer blockings in 1976-2005



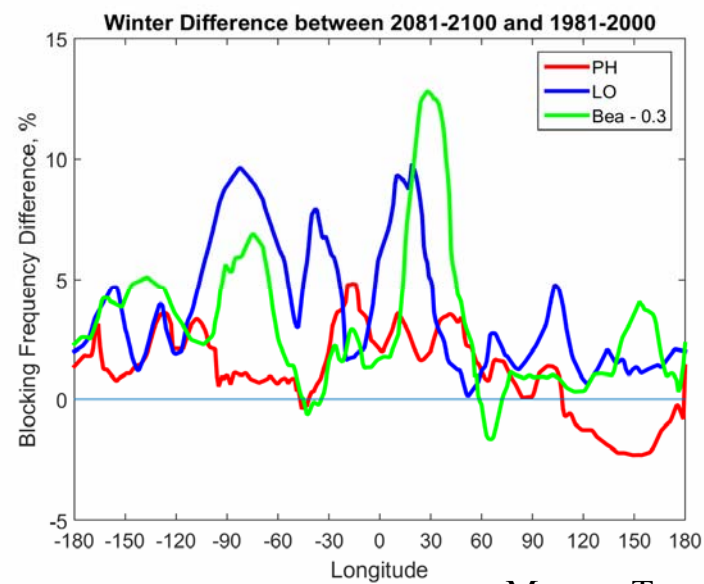
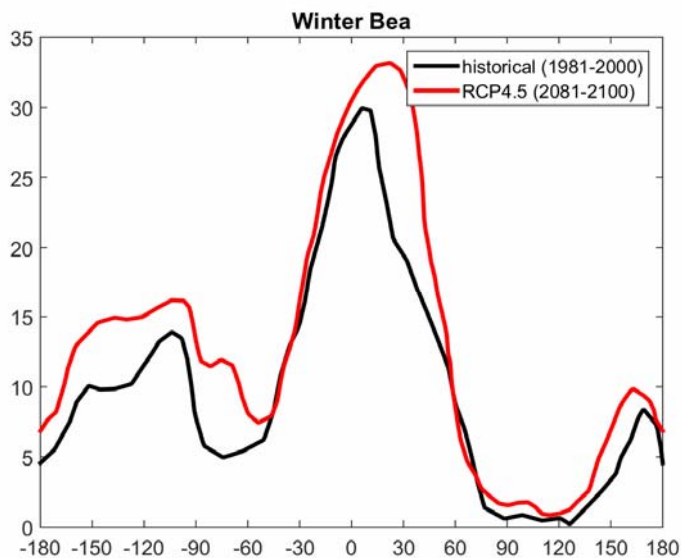
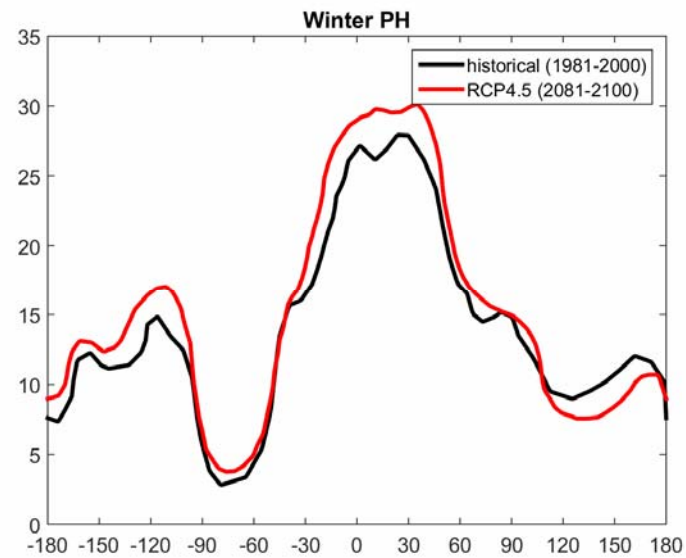
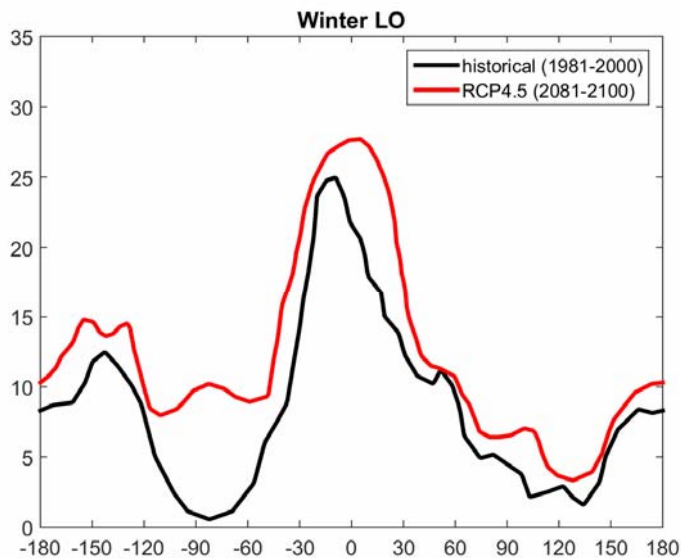
Best ensemble
BCC-CSM1.1
BCC-CSM1.1(m)
MRI-CGCM3
NorESM1-M



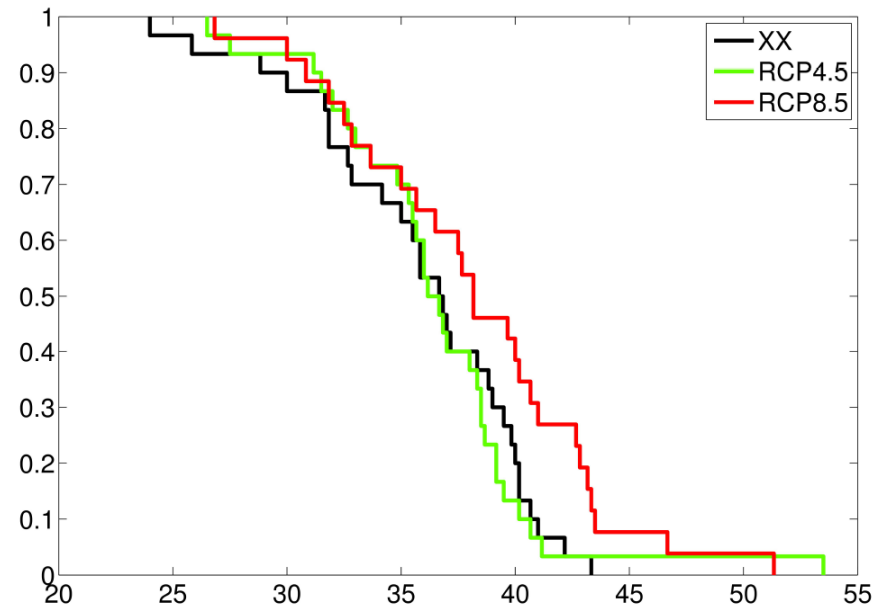
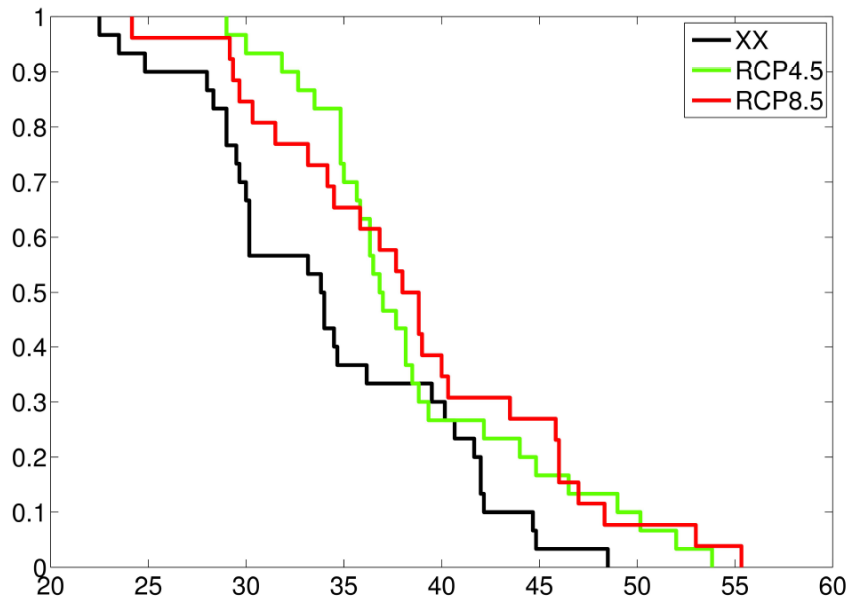
Изменения повторяемости блокингов (лето)



Изменения повторяемости блокингов (зима)



Изменения кумулятивных распределений



Вероятность превышения общей длительности (сут.) летнего (слева) и зимнего (справа) блокирования в Евро-Атлантическом регионе (60° з.д.- 60° в.д.) в зависимости от длительности блокирования по ансамблевым модельным расчетам для последнего 30-летия 21 века при сценариях RCP 4.5 и RCP 8.5 в сопоставлении с последним 30-летием 20 века (XX).

Отношение значений действия [энергия x время] для блокингов Северного полушария по модельным расчетам при удвоенном и современном содержании CO₂ в атмосфере: для разных секторов и сезонов

	лето VII-IX	осень X-XII	зима I-III	весна IV-VI	год I-XII
Атлантический сектор (80°W-40°E)	0.22	1.06	1.18	1.06	0.97
Тихоокеанский сектор (140°E-100°W)	1.01	0.83	0.95	0.85	0.91
Континенты (40-140°E, 100-80°W)	0.80	0.26	4.11	4.55	1.76
Северное полушарие	0.69	0.84	1.32	1.40	1.07

(Мохов, 2006)

Число блокингов N_{2xCO_2} (N_{2xCO_2}/N_{1xCO_2})

сектор	лето VII-IX	осень X-XII	зима I-III	весна IV-VI	год I-XII
Атлантический	0.6 (0.35)	2.0 (0.69)	2.8 (1.17)	3.2 (1.52)	8.6 (0.95)
Тихоокеанский	2.2 (0.85)	1.8 (0.75)	2.2 (1.00)	1.6 (0.64)	7.8 (0.80)
Континенты	1.6 (1.07)	0.4 (0.57)	1.0 (1.43)	2.8 (4.00)	5.8 (1.61)
СП	4.4 (0.76)	4.2 (0.70)	6.0 (1.13)	7.6 (1.43)	22.2 (0.99)

Длительность блокингов [сут] τ_{2xCO_2} ($\tau_{2xCO_2}/\tau_{1xCO_2}$)

сектор	лето VII-IX	осень X-XII	зима I-III	весна IV-VI	год I-XII
Атлантический	8.0 (0.94)	9.1 (1.32)	7.7 (1.08)	7.9 (0.91)	8.1 (1.05)
Тихоокеанский	7.5 (1.10)	10.1 (1.31)	7.5 (1.23)	8.8 (1.10)	8.4 (1.17)
Континенты	6.9 (0.81)	6.5 (0.82)	8.8 (1.38)	7.9 (1.20)	7.7 (1.01)
СП	7.3 (0.95)	9.3 (1.27)	7.8 (1.18)	8.1 (1.00)	8.1 (1.09)

Lupo, Oglesby, Mokhov (1997)

Интенсивность блокингов I_{2xCO_2} (I_{2xCO_2}/I_{1xCO_2})

сектор	лето	осень	зима	весна	год
Атлантический	1.8 (0.82)	3.1 (1.04)	3.2 (0.99)	2.4 (0.83)	2.8 (0.97)
Тихоокеанский	2.0 (1.00)	2.8 (0.89)	3.0 (0.80)	2.4 (0.97)	2.5 (0.91)
Континенты	1.9 (0.80)	2.9 (0.90)	3.3 (1.24)	2.6 (1.10)	2.5 (0.98)
СП	1.9 (0.89)	3.0 (0.96)	3.1 (0.94)	2.5 (0.95)	2.6 (0.95)

Размер блокингов [10^3 км] L_{2xCO_2} (L_{2xCO_2}/L_{1xCO_2})

сектор	лето	осень	зима	весна	год
Атлантический	2.15 (0.91)	2.74 (1.06)	2.81 (0.97)	2.58 (0.96)	2.66 (1.00)
Тихоокеанский	2.69 (1.04)	2.56 (0.97)	2.79 (0.98)	2.82 (1.12)	2.72 (1.03)
Континенты	2.60 (1.07)	2.34 (0.79)	3.14 (1.30)	2.73 (0.93)	2.74 (1.05)
СП	2.58 (1.04)	2.62 (0.99)	2.86 (1.02)	2.69 (1.02)	2.70 (1.02)

**Blocking characteristics (X) from model simulations for different seasons and regions:
Ratio X(2CO₂) to X(1CO₂)**

Euro-Atlantic region	January-March	April-June
Number	1.2	1.5
Duration	1.1	0.9
Intensity	1.0	0.8
Size	1.0	1.0
Blocking days	1.3	1.4
Total action	1.2	1.1

NH continents	January-March	April-June
Number	1.4	4.0
Duration	1.4	1.2
Intensity	1.2	1.1
Size	1.3	0.9
Blocking days	2.0	4.8
Total action	4.1	4.6

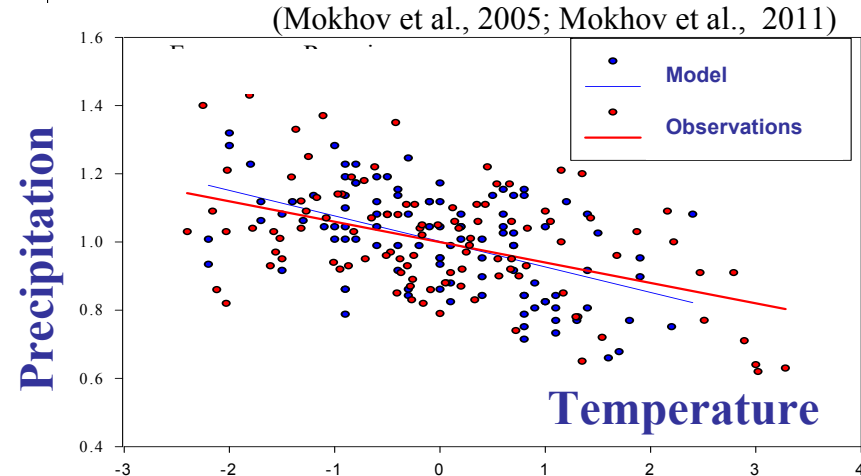
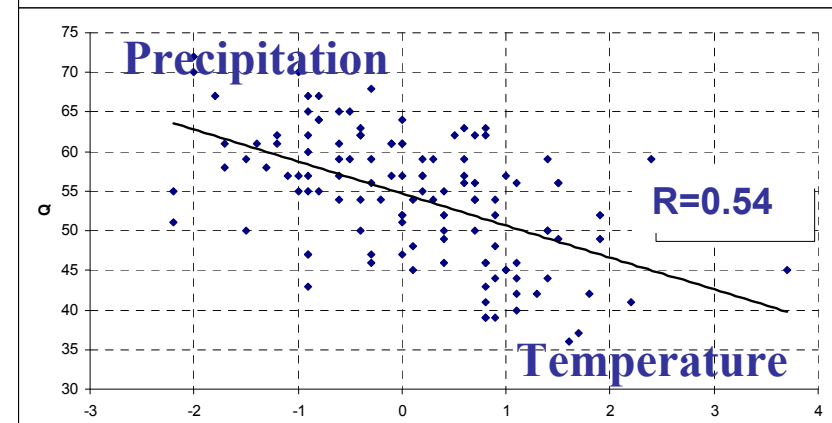
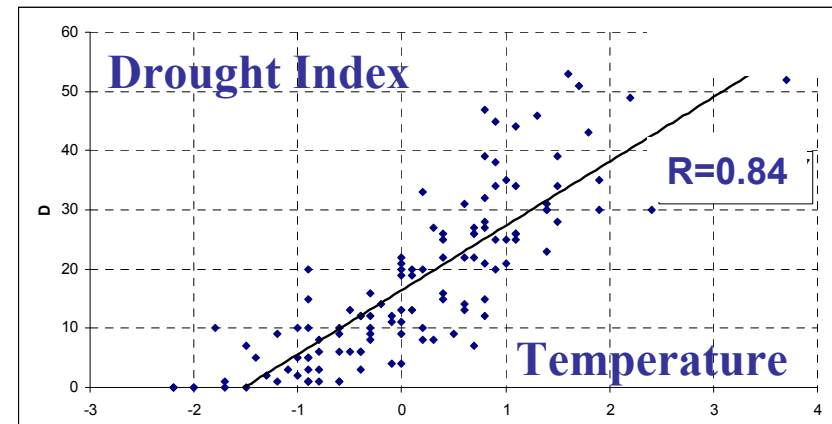
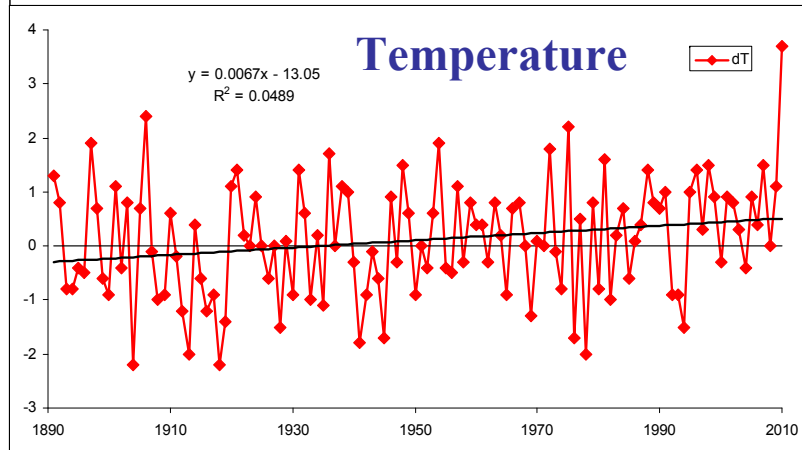
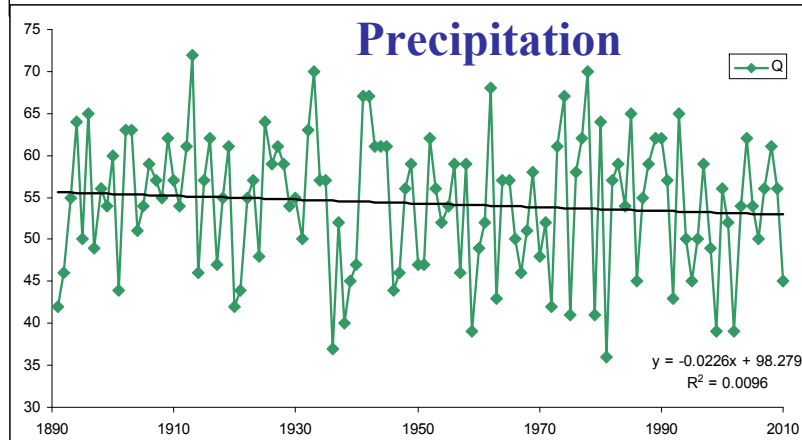
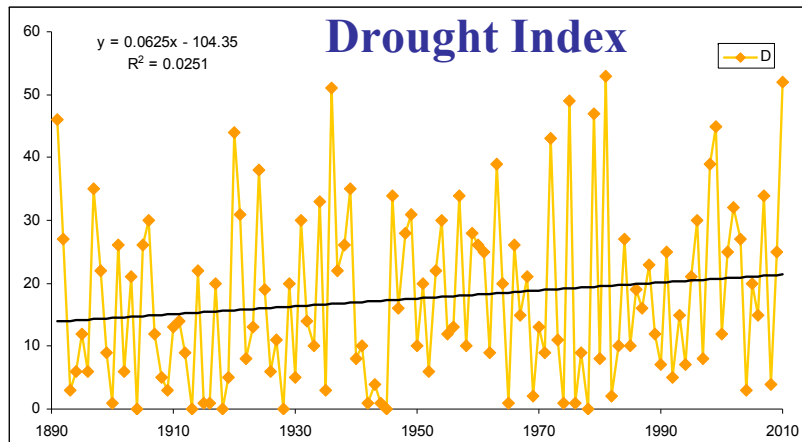
**ДЕЙСТВИЕ КАК ИНТЕГРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
КЛИМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР: ОЦЕНКИ ДЛЯ АТМОСФЕРНЫХ
БЛОКИНГОВ**

Таблица 2. Диапазон оценок значений действия для блокингов СП по данным [7] в годы Эль-Ниньо и Ла-Нинья: нормированных на соответствующие значения действия в годы без Эль-Ниньо и Ла-Нинья для разных секторов при разных вариантах связи интенсивности и размеров блокингов (при пропорциональности интенсивности блокингов их размеру и площади)

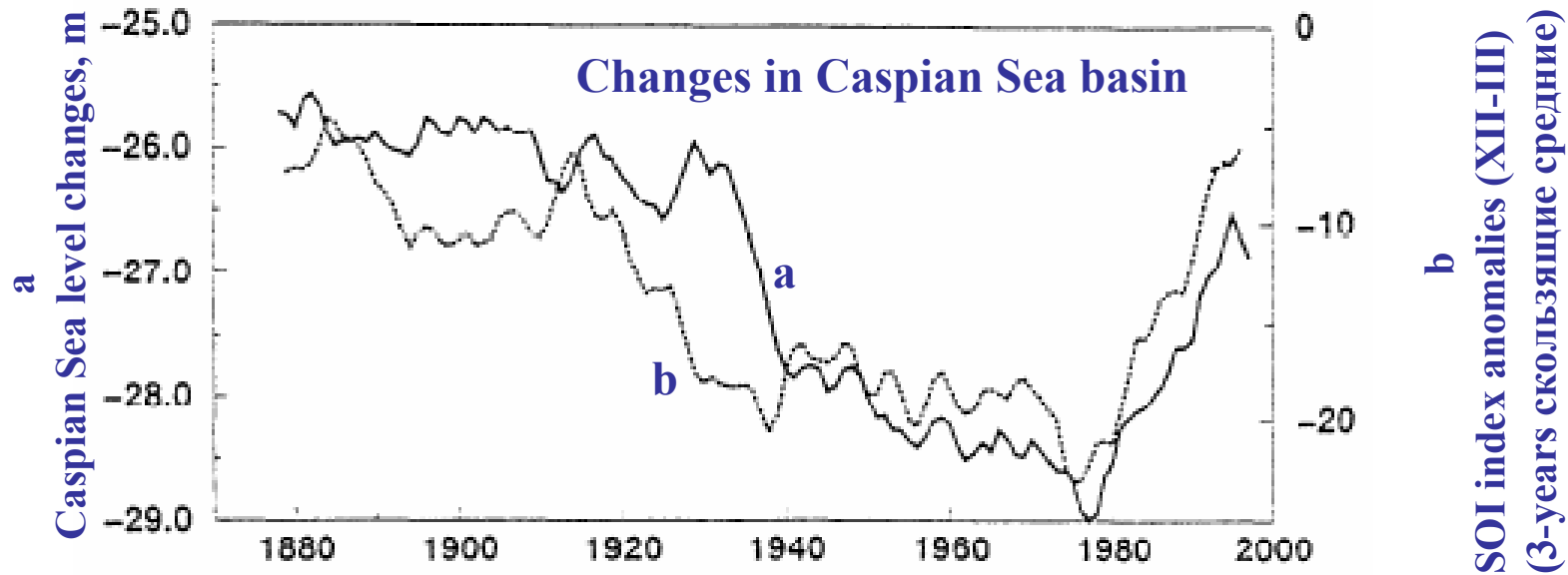
Сектор	Годы, Эль-Ниньо	Годы, Ла-Нинья
Атлантический сектор (80°W–40°E)	1.02–1.04	1.15–1.19
Тихоокеанский сектор (140°E–100°W)	0.54–0.64	0.83–0.97
Континенты (40–140°E, 100–80°W)	0.90–0.93	0.75–0.78
СП	0.87–0.91	1.04–1.05

(Мохов, 2006)

Interannual variations in May-July for European part of Russia (1891-2010)



Regional effects associated with El-Nino phenomena



(Arpe, Bengtsson, Golitsyn, Mokhov, Semenov, Sporyshev, 2000)

Anomalies in the blocking-days number and total blockings action in Euro-Atlantic region in El-Nino/La-Nina years (like 2010)

Euro-Atlantic region	El-Nino years	La-Nina years
Blocking days	1.07	1.06

(Wiedenmann, Lupo, Mokhov and Tikhonova, 2002)

Euro-Atlantic region	El-Nino years	La-Nina years
Total blockings action	1.02-1.04	1.15-1.19

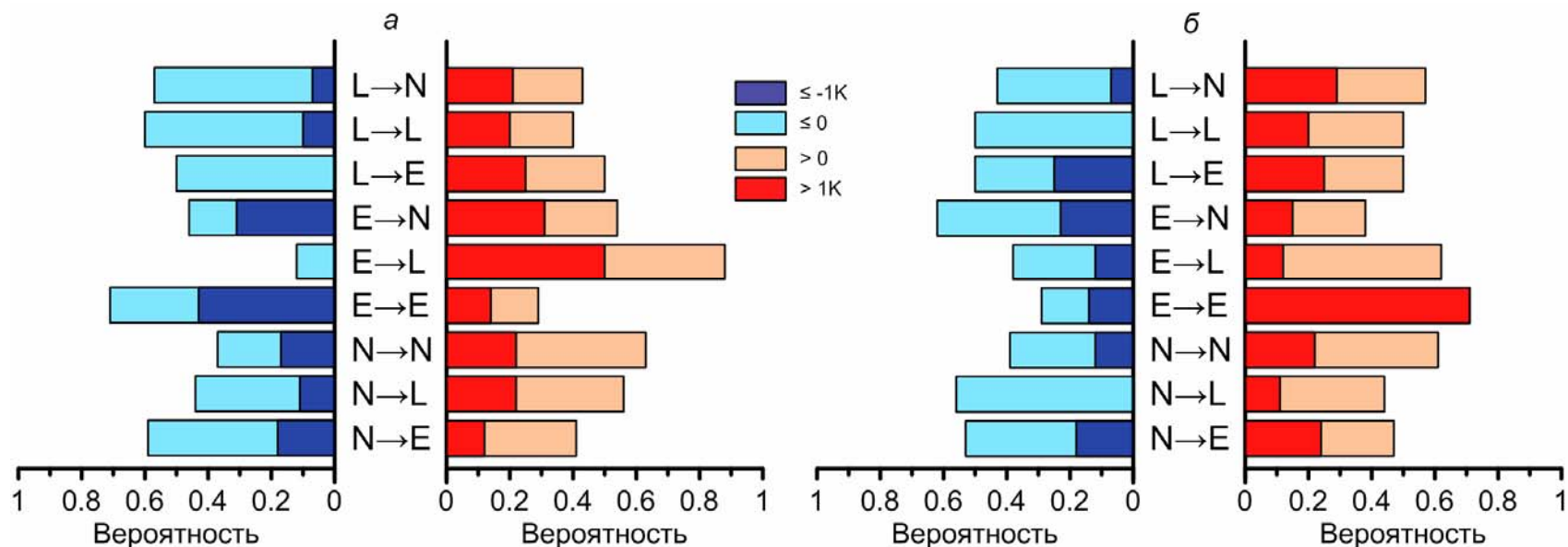
(Mokhov, 2006)

Региональные эффекты, связанные с явлениями Эль-Ниньо / Ла-Нинья

Общее действие атмосферных блокингов
в Евро-Атлантическом и Тихоокеанском секторах Северного
полушария в годы **Эль-Ниньо / Ла-Нинья (как в 2010 г.)**
относительно нейтральных лет (как в 2013 г.)

Общее действие блокингов СП	годы Эль-Ниньо / нейтральные годы	годы Ла-Нинья / нейтральные годы
Евро-Атлантический сектор	1.02-1.04	1.15-1.19
Тихоокеанский сектор	0.54–0.64	0.83–0.97

(Мохов, 2006)



Вероятности различных положительных (правая шкала) и неположительных (левая шкала) аномалий приповерхностной температуры δT (К) для ЕТР и АТР в мае-июле для различных фаз явлений Эль-Ниньо (характеризуемых индексом Nino4) по 123-летним данным (1891-2013 гг.).

Спасибо за внимание