Модель Земной системы ИВМ РАН

Володин Е.М. Институт вычислительной математики РАН. volodinev@gmail.com

Климатическая система: погода и климат

- **Климатическая система есть система, объединяющая атмосферу, океан, криосферу, сушу и биосферу.**
- **Климатическая система характеризуется конечным множеством параметров (скорость ветра в атмосфере и течений в океане, давление, температура, влажность, соленость и т.д.), значения которых в фиксированный момент времени в различных точках пространства определяют ее состояние.**
- **Погода есть текущее (мгновенное) состояние атмосферы (совокупность значений метеорологических элементов и атмосферных явлений, наблюдаемых в данный момент времени). Прогноз погоды – расчет траектории в фазовом пространстве (решение задачи Коши, детерминированный подход).**
- **Климат есть ансамбль состояний, который проходит климатическая система за достаточно большой (несколько десятилетий) промежуток времени.**

Основные принципы построения модели климата

1. **Наиболее полный учет всех процессов и механизмов, влияющих на климат.**
2. **Явное воспроизведение явлений различных пространственных и временных масштабов. Следствие: необходимость хорошего пространственного и временного разрешения. Для этого, в свою очередь, необходимо задействовать суперкомпьютеры.**
3. **Ошибка, усредненная по многим климатическим моделям, меньше, чем ошибка каждой модели. Следствие: необходимо развивать независимые модели.**

Модель климатической системы Земли

1. **Общая циркуляция атмосферы**
2. **Общая циркуляция океана.**
3. Углеродный цикл
4. Химия атмосферы
5. Аэрозольный блок
6. Биохимия океана
7. Ледниковые щиты
8. Параметризация некоторых электрических явлений.

Модель атмосферы включает в себя

1. Решение уравнений гидротермодинамики конечно-разностным методом
2. Параметризацию атмосферной радиации
3. Параметризацию турбулентности в пограничном слое
4. Параметризацию потоков на поверхности, а также самой поверхности (растительность, почва, сток рек и др.)
5. Параметризацию конвекции и конденсации
6. Гравитационно-волновое сопротивление
7. Вспомогательные блоки (фильтрация у полюсов, горизонтальная диффузия,…)

Дифференциальные уравнения модели

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{u}{acos\varphi}\frac{\partial u}{\partial \lambda}+\frac{v}{a}\frac{\partial u}{\partial \varphi}+\dot{\sigma}\frac{\partial u}{\partial \sigma}-v\left(f+\frac{u}{a}tg\varphi\right)+\frac{1}{a\cos\varphi}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}+\frac{RT}{\pi}\frac{\partial \pi}{\partial \lambda}\right)=F_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{u}{acos\varphi}\frac{\partial v}{\partial \lambda}+\frac{v}{a}\frac{\partial v}{\partial \varphi}+\dot{\sigma}\frac{\partial v}{\partial \sigma}+u\left(f+\frac{u}{a}tg\varphi\right)+\frac{1}{a}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi}+\frac{RT}{\pi}\frac{\partial \pi}{\partial \varphi}\right)=F_v,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{u}{acos\varphi}\frac{\partial T}{\partial \lambda}+\frac{v}{a}\frac{\partial T}{\partial \varphi}+\frac{\partial \dot{\sigma}T}{\partial \sigma}-$$
$$-\frac{RT}{c_p\pi\sigma}\left(\pi\dot{\sigma}+\sigma\left(\frac{\partial \pi}{\partial t}+\frac{u}{a\cos\varphi}\frac{\partial \pi}{\partial \lambda}+\frac{v}{a}\frac{\partial \pi}{\partial \varphi}\right)\right)=F_T,$$

$$\frac{\partial \pi Q}{\partial t}+\frac{1}{acos\varphi}\left(\frac{\partial u\pi Q}{\partial \lambda}+\frac{\partial v\cos\varphi\pi Q}{\partial \varphi}\right)+\frac{\partial \dot{\sigma}\pi Q}{\partial \sigma}=\pi F_q,$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t}+\frac{1}{a\cos\varphi}\left(\frac{\partial \pi u}{\partial \lambda}+\frac{\partial \pi v\cos\varphi}{\partial \varphi}\right)+\frac{\partial \pi\dot{\sigma}}{\partial \sigma}=0,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma}=-\frac{RT}{\sigma},$$

Конечноразностная схема для U

$$\frac{\partial}{\partial t}u_{i,j+1/2}m_{j+1/2}m' +$$

$$+1/6[[(u_{i,j+1/2} + u_{i+1,j+1/2})(u_{i+1,j+1/2} - u_{i,j+1/2}) +$$

$$+(u_{i,j+1/2} + u_{i-1,j+1/2})(u_{i,j+1/2} - u_{i-1,j+1/2})]m' +$$

$$+(v_{i-1/2,j} + v_{i+1/2,j})(u_{i,j+1/2} - u_{i,j-1/2})m_j +$$

$$+(v_{i-1/2,j+1} + v_{i+1/2,j+1})(u_{i,j+3/2} - u_{i,j+1/2})m_{j+1}] +$$

$$+1/12[(\overline{u_{i+1/2,j+1}}m' + v_{i+1/2,j+1}m_{j+1})(u_{i+1,j+3/2} - u_{i,j+1/2}) +$$

$$+(\overline{u_{i-1/2,j}}m' + v_{i-1/2,j}m_j)(u_{i,j+1/2} - u_{i-1,j-1/2}) +$$

$$+(-\overline{u_{i-1/2,j+1}}m' + v_{i-1/2,j+1}m_{j+1})(u_{i-1,j+3/2} - u_{i,j+1/2}) +$$

$$+(-\overline{u_{i+1/2,j}}m' + v_{i+1/2,j}m_j)(u_{i,j+1/2} - u_{i+1,j-1/2})] -$$

$$-1/4(r_{i+1/2,j+1/2}(v_{i+1/2,j} + v_{i+1/2,j+1}) +$$

$$r_{i-1/2,j+1/2}(v_{i-1/2,j} + v_{i-1/2,j+1})) +$$

$$+\frac{m'm_{j+1/2}}{\overline{\pi}^i_{i,j+1/2}}\Big(\overline{(\pi\dot{\sigma})}^i_{i,j+1/2,k+1/2}(u_{i,j+1/2,k+1} -$$

$$u_{i,j+1/2,k}) + \overline{(\pi\dot{\sigma})}^i_{i,j+1/2,k-1/2}(u_{i,j+1/2,k} - u_{i,j+1/2,k-1})\Big)/(2\Delta\sigma_k) +$$

$$m'(\Phi_{i+1/2,j+1/2,k} - \Phi_{i-1/2,j+1/2,k}) +$$

$$m'R\overline{T}^i_{i,j+1/2,k}(\log\pi_{i+1/2,j+1/2} - \log\pi_{i-1/2,j+1/2}) = F_U$$

Наиболее часто используемые конфигурации модели

1. **Атмосфера: 5x4 градуса по долготе и широте, 21 уровень до 30 км. Океан: 2.5x2 градуса по долготе и широте, 33 уровня. Для расчетов на тысячи лет, например, совместно с моделью ледниковых щитов, а также для образовательных целей. Оптимальное количество процессоров: 16-24. Скорость счета 25-70 лет за сутки.**
2. **Атмосфера: 2x1.5 градуса, 21 уровень до 30 км. Океан: 1x0.5 градуса, 40 уровней. Для расчетов на сотни лет. Оптимальное количество процессоров: 100-300. Скорость счета 15-17 лет за сутки.**
3. **Атмосфера: 2x1.5 градуса, 73 уровня до 60 км. Океан: 0.5x0.25 градуса, 40 уровней. Для расчетов на десятки-сотни лет. Оптимальное количество процессоров: 300-800. Скорость счета 6-10 лет за сутки.**
4. **Атмосфера: 0.67x0.5 градуса, 73 уровня до 60 км. Океан: 0.167x0.125 градуса, 40 уровней. Оптимальное количество процессоров: 1000-3000. Скорость счета 1-2 года за сутки.**

Расчет потоков с поверхности происходит по аэродинамическим (балк-) формулам

$$F_U = \quad C_U \,|V_a|\,(u_s \quad u_a),$$

$$F_V = \quad C_U \,|V_a|\,(v_s \quad v_a),$$

$$F_T = \quad C_P C_T \,|V_a|\,(\ _s \qquad _a),$$

$$F_Q = \quad L C_T \,|V_a|\,(Q_s \quad Q_a)$$

Расчет температуры поверхности суши:

$$_s C_s \frac{T_s}{t} = \quad F_T \quad F_Q + F_{RAD} + F_{SOIL}$$

Уравнения тепловлагопроводности в почве:

$$\frac{T}{t} = \frac{}{z} \qquad \frac{T}{z} + F_T$$

$$\frac{W}{t} = \frac{}{z} \quad _W \frac{W}{z} + \quad _{WT} \frac{T}{z} + \quad + F_W$$

Испарение с растительности:

$$F_Q = \frac{L \quad (Q_s \quad Q_a)}{R}$$

где R – сопротивление испарению,

$$R = \frac{1}{C_T \mid V_a \mid} + R_{veg} \qquad R_{veg} = F(T)F(W)F(RAD)$$

Поверхностный и подповерхностный сток

$$R_{f1} = P + W_s - [1 - \max(A, 0)]\, W_{s,max}, \tag{60}$$

где функция $A(W_s, P)$ имеет следующий вид

$$A(W_s, P) = \left[\left(1 - \frac{W_s}{W_{s,max}} \right)^{\frac{1}{1+a}} - \frac{P}{(1+a)W_{s,max}} \right]^{1+a}. \tag{61}$$

Здесь показатель a характеризует мелкомасштабную изменчивость рельефа и задан следующим образом

$$a = \max \left[\frac{\sigma - \sigma_{min}}{\sigma + \sigma_{max}}, 0.01 \right], \tag{62}$$

$$R_{f2} = \Delta t \Delta z \rho d_{min} \frac{W}{W_{max}}, \qquad R_{f2} = \Delta t \Delta z \rho d_{min} \frac{W}{W_{max}} + (d_{max} - d_{min}) \left(\frac{W - W_h}{W_{max} - W_h} \right)^d$$

Типы почвы

Процент содержания песка, глины и органики в 8 типах почв

Номер	Почва	Песок	Глина	Органика
1	грубая	83	9	8
2	средняя	37	30	33
3	мелкая	17	67	16
4	грубо-средняя	60	20	20
5	грубо-мелкая	50	38	12
6	средне-мелкая	27	48	25
7	грубо-средне-мелкая	46	35	19
8	органическая	16	16	68

Типы растительности

Параметры модели, связанные с растительностью

NN	a	b	c	C_{Fq}	ψ_b	ψ_w	Lt_{max}	z_r
1	2336	0.01	154	0.0273	-100	-500	4.5	1.0
2	9802	10.60	180	0.0357	-190	-250	4.0	1.0
3	6336	7.10	207	0.0340	-200	-250	5.0	1.0
4	2870	3.70	233	0.0310	-200	-250	7.0	1.0
5	2870	3.70	233	0.0310	-200	-250	2.0	0.5
6	56651	10.80	165	0.0357	-190	-250	3.0	3.0
7	2582	1.09	110	0.0238	-120	-230	3.0	0.5
8	93989	0.01	855	0.0275	-200	-400	0.8	2.0
9	93989	0.01	855	0.0275	-200	-400	1.0	2.0
10а	9802	10.55	180	0.0275	-200	-400	1.5	0.5
10б	2582	1.09	110	0.0238	-0.3	-150	0.4	0.5
11а	9802	10.60	180	0.0357	-190	-250	0.5	1.0
11б	7459	5.70	25	0.0000	-100	-200	3.0	1.0

Здесь цифры означают: 1 – тропический лес, 2 – лиственный листопадный лес, 3 – смешанный лес, 4 – хвойный лес, 5 – лиственничный лес, 6 – деревья саванны, 7 – трава, 8 – лиственные кусты с травой, 9 – лиственные кусты с открытой почвой, 10 – тундра, 11 – возделываемые травянистые культуры с отдельными деревьями.

Параметризация турбулентности в пограничном слое атмосферы

$$\frac{}{t} = \frac{}{z}(\mathrm{K}\ \frac{}{z} \qquad F_{ENTR}(\mathrm{z}/\mathrm{h})^{**}3) = \frac{F}{z}$$

$$K_\psi = l_\psi^2 \left|\frac{\partial \vec{V}}{\partial z}\right| F_\psi(Ri), \qquad Ri = \frac{g}{\theta_v}\frac{\partial \theta_v / \partial z}{\left|\partial \vec{V}/\partial z\right|^2}$$

Альтернативная идея параметризация состоит в применении метода потока массы:

$$\frac{}{t} = \frac{(M_U\ M_D)}{p}$$

Конденсация и облачность

Простейшие параметризации конденсации, облачности и влажной конвекции:

Конденсация.

Если есть T, q и $q>q_{max}(T)$, то происходит конденсация, после которой

$q-dq=q_{max}(T+dT)$.

В линейном приближении

$dq=(q-q_{max}(T))/(1+L/Cp*dq_{max}(T)/dT))$,

$dT=dq*L/Cp$

Балл облачности: $C=0$, если $r<r0$, $C=C(r)$, если $r0<r<r1$, $C=1$, если $r>r1$.

Простейшая параметризация конденсации и облачности. Продолжение.

Водность облака: $W=W(T,P)$

Влажная конвекция: если $(T(k+1)-T(k))/(z(k+1)-z(k))<dT/dz$(вл.ад.),

то после работы конвекции $(T(k+1)-T(k))/(z(k+1)-z(k))=dT/dz$(вл.ад)

Достоинства: простота и понятность.

Недостатки:

неучет некоторых процессов (например, испарения осадков);

Неучет подсеточной изменчивости при расчете осадков;

Расчет осадков и облачности происходит независимо;

Плохо получаются облака некоторых типов (например, на верхней границе пограничного слоя)

Во влажной конвекции 4 неизвестных и 2 уравнения остальные 2 произвольны.

Более сложная параметризация конденсации и облачности (Tiedtke 1993)

Рассматривается образование трех видов облаков:

слоистые облака,

облака глубокой конвекции,

облака пограничного слоя,

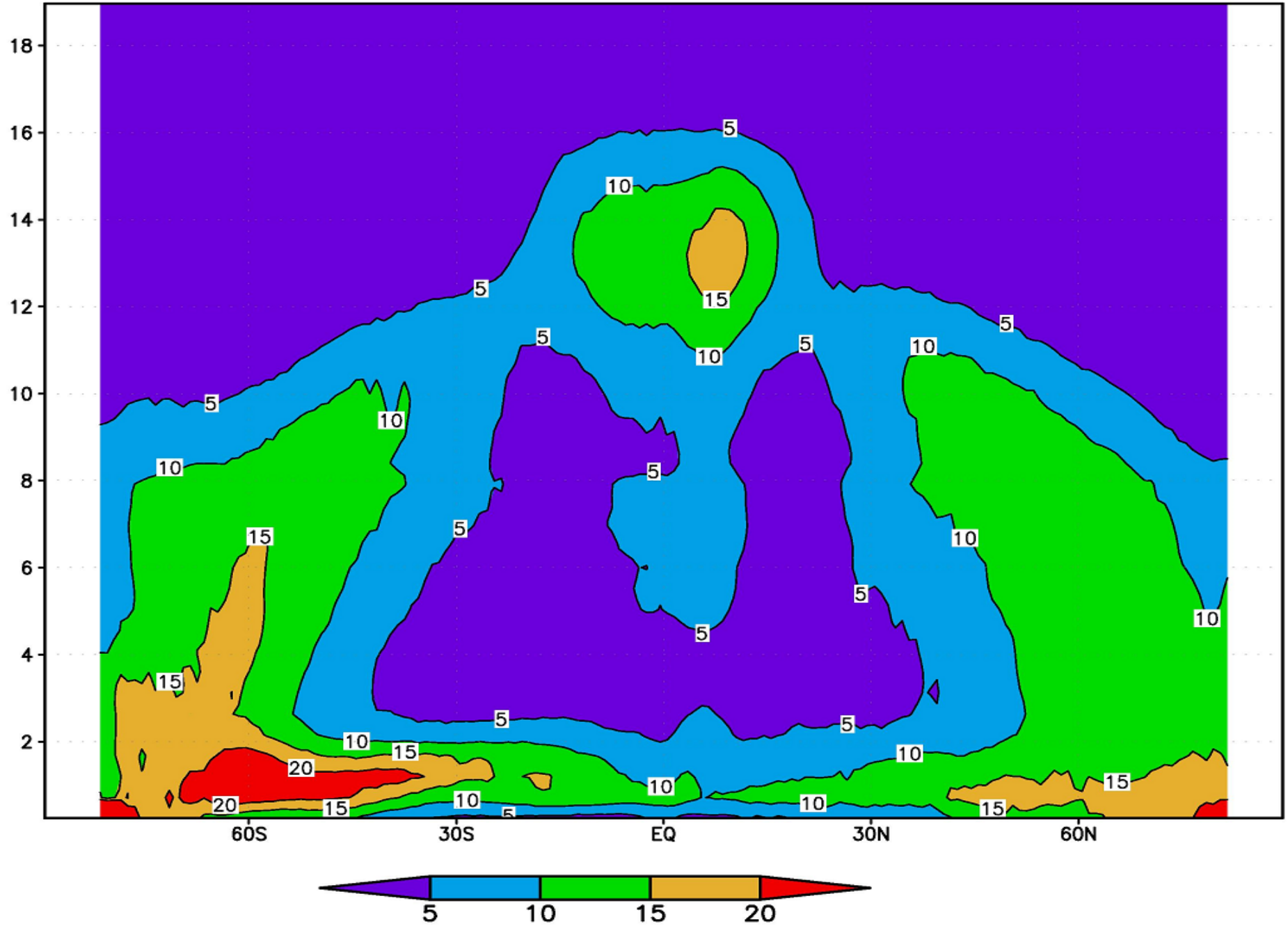
а также:

испарение облачности,

формирование осадков,

испарение осадков

Облачность (%) осредненная вдоль кругов широты (CALIPSO)



Прогностические переменные – балл облачности ***a*** и водность облаков ***l***

$$\frac{a}{t} = A(a) + S(a)_{CV} + S(a)_{BL} + S(a)_C \quad D(a),$$

$$\frac{l}{t} = A(l) + S_{CV} + S_{BL} + C \quad E \quad G_P \quad \frac{1}{} \frac{F_{ENTR}}{z},$$

где A – перенос, C – скорость конденсации, E – скорость испарения, G_P – скорость образования осадков из облачных капель, S_{CV} и S_{BL} – источник облачной влаги вследствие работы параметризации конвекции и пограничного слоя соответственно, F_{ENTR} – поток вследствие вовлечения на верхней границе пограничного слоя, $S(a)_{CV}$, $S(a)_{BL}$, $S(a)_C$ – скорости изменения объема облаков вследствие конвекции, турбулентности в пограничном слое и конденсации, $D(a)$ – скорость уменьшения площади облачности вследствие испарения облачных капель.

$$\frac{q}{t} = A(q) \quad S_{BL} \quad C + E + E_P \quad \frac{1}{} \frac{F(q)_{ENTR}}{z},$$

$$\frac{s}{t} = A(s) + L(S_{BL} + C \quad E \quad E_P) \quad \frac{1}{} \frac{F(s)_{ENTR}}{z}, \mathrm{s=CpT+gz}$$

Пример кучево-дождевого облака

Параметризация конвекции методом потока массы

$$C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{cu} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}(M_u S_u + M_d S_d - M_c S) + L(c - \epsilon)$$

$$\left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_{cu} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}(M_u q_u + M_d q_d - M_c q) + \epsilon - c$$

$$M_u = M_b \int_0^{\lambda_D} \frac{1}{\lambda_0} e^{\lambda(z-z_b)} d\lambda = \left(\frac{M_b}{\lambda_0 (z - z_b)}\right) (\exp(\lambda_D(z)(z - z_b)) - 1)$$

$$E_u = \frac{M_b}{\lambda_0} \int_0^{\lambda_D} \lambda e^{\lambda(z-z_b)} d\lambda = \frac{\partial M_u}{\partial z} - D_u \qquad D_u(z) = -\frac{M_b}{\lambda_0}\frac{\partial \lambda_D}{\partial z} \exp(\lambda_D(z)(z - z_b))$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(M_u S_u) = (E_u - D_u)S + LC_u$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(M_u q_u) = E_u q - D_u q^* - C_u$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(M_u l) = -D_u l_d + C_u - R_r$$

Изменения облачности вследствие растекания конвективного потока

$$S_{CV} = \frac{D_U}{} l_U,$$

$$S(a)_{CV} = (1 \quad a)\frac{D_U}{}$$

Образование слоистых облаков

Вычисляем изменение насыщенной влажности:

$$\frac{dq\max}{dt} = \frac{dq\max}{dp}_{ma} + \frac{dq\max}{dT}\frac{dT}{dt}_{diab},$$

Два способа конденсации: конденсация в уже существующих облаках и образование новых облаков:

C = C1 + C2

Конденсация в уже существующих облаках вычисляется по формуле:

$$C_1 = \begin{cases} a\dfrac{dq\max}{dt}, \dfrac{dq\max}{dt} < 0 \end{cases}$$

$$S(a) = \begin{cases} (1 \quad a)\dfrac{dq_{MAX}/dt}{q_{MAX} \quad q}, \dfrac{dq_{MAX}}{dt} < 0 \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} S(a)\dfrac{dq_{MAX}}{dt}, \dfrac{dq_{MAX}}{dt} < 0 \end{cases}$$

Испарение облаков

Считается, что облака могут испаряться в результате двух процессов: (1) крупномасштабного опускания воздуха и адиабатического нагревания, (2) турбулентного перемешивания облачного воздуха и ненасыщенного окружающего воздуха:

$$E = E_1 + E_2.$$

Первый процесс учитывается тем же способом, как и формирование облачности вследствие конденсации поднимающегося и охлаждающегося воздуха:

$$E_1 = a\frac{dq_{MAX}}{dt}, \frac{dq_{MAX}}{dt} > 0.$$

При учете уменьшения количества облаков вследствие перемешивания с ненасыщенным окружением считается, что испарение облаков пропорционально дефициту влаги в окружении:

$$E_2 = aK(q_{MAX} \quad q), \qquad D(a) = E_2 / l_C$$

Формирование осадков

Переход облачной влаги в осадки вычисляется по следующей формуле:

$$G_P = aC_0 l_C (1 \quad \exp(\quad (l_C / l_{CRIT})^{**}2)),$$

где C_0^{-1} – характерный временной масштаб конверсии облачных капель в осадки, а l_{CRIT} – типичное содержание воды в облаках, при котором начинают эффективно образовываться осадки.

Испарение падающих осадков

$$E_P = (1 \quad a)^{*}5.44^{*}\mathrm{E} \quad 4^{*}(q_{MAX} \quad q)^{*}\sqrt{P/5.9E \quad 3\sqrt{p/p_0}}$$

Глубокая и мелкая конвекция Betts 1986

$$T_{new} = T_{old} + (T_r - T_{old})\Delta t/\tau,$$

$$Q_{new} = Q_{old} + (Q_r - Q_{old})\Delta t/\tau,$$

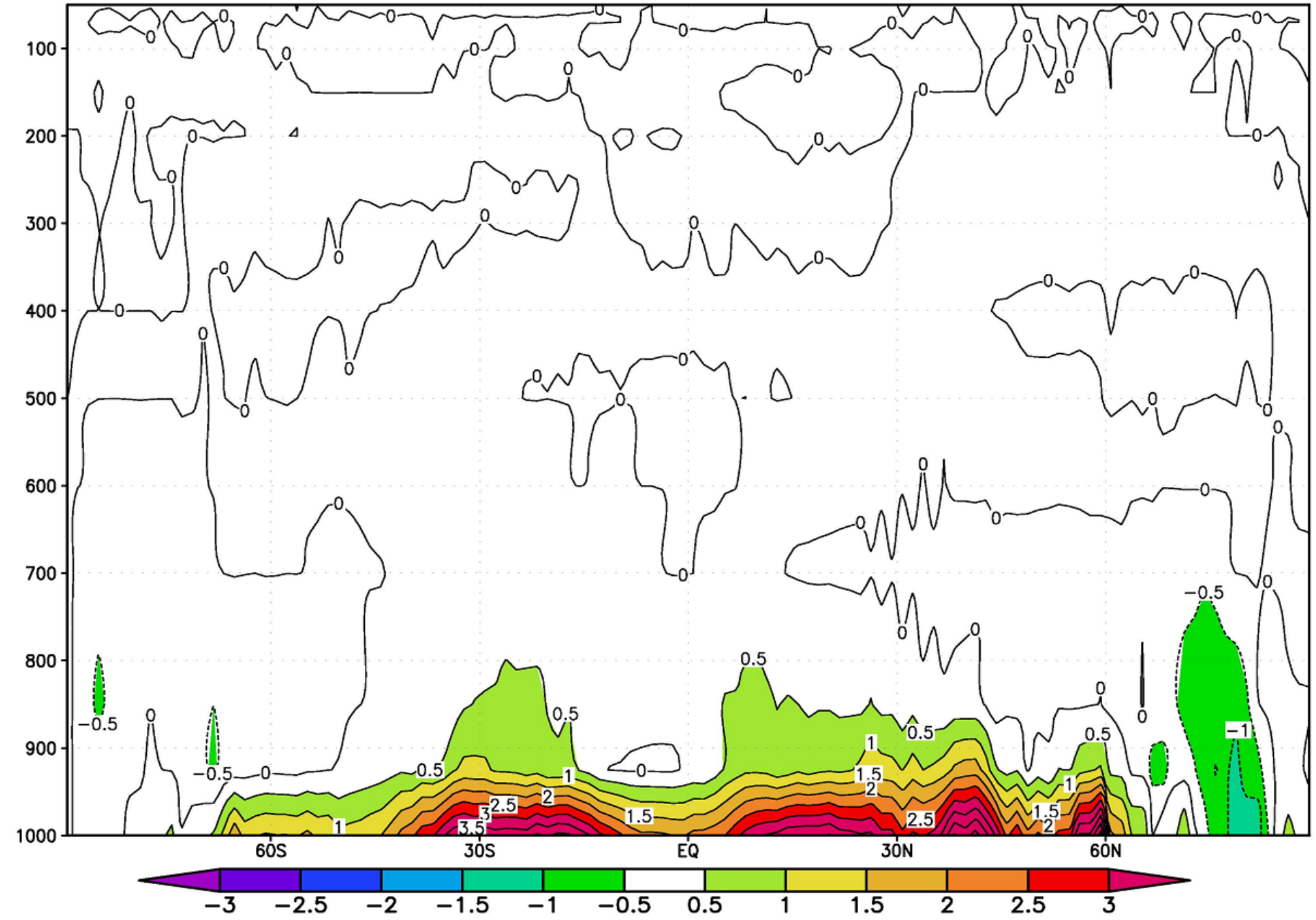
Гравитационно-волновое сопротивление

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_{GW} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial F_E}{\partial z},$$
$$\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)_{GW} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial F_N}{\partial z}.$$

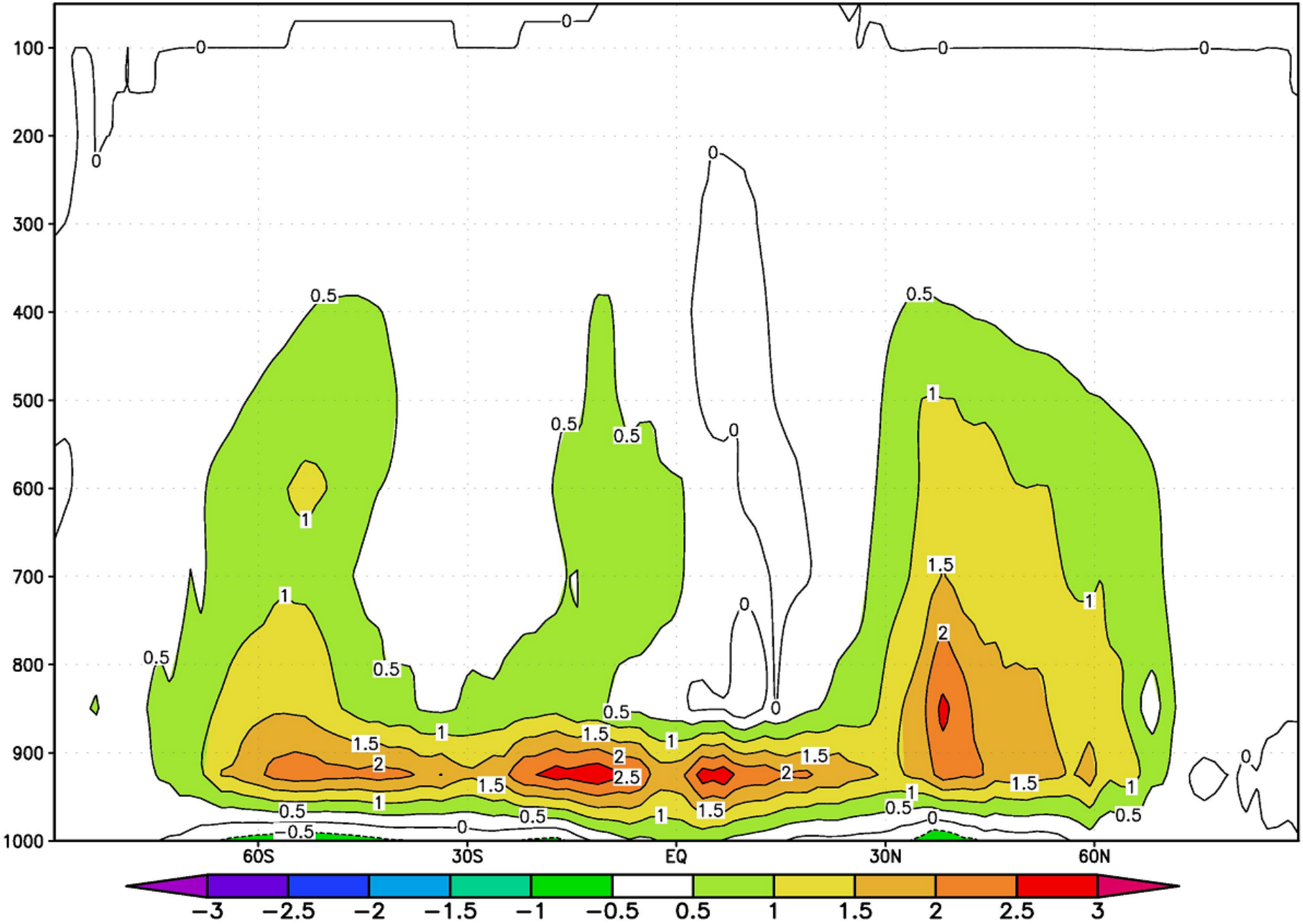
$$F_E = \sum_{\varphi=1}^{N} cos\alpha_\varphi F_\varphi,$$

$$F_N = \sum_{\varphi=1}^{N} sin\alpha_\varphi F_\varphi,$$

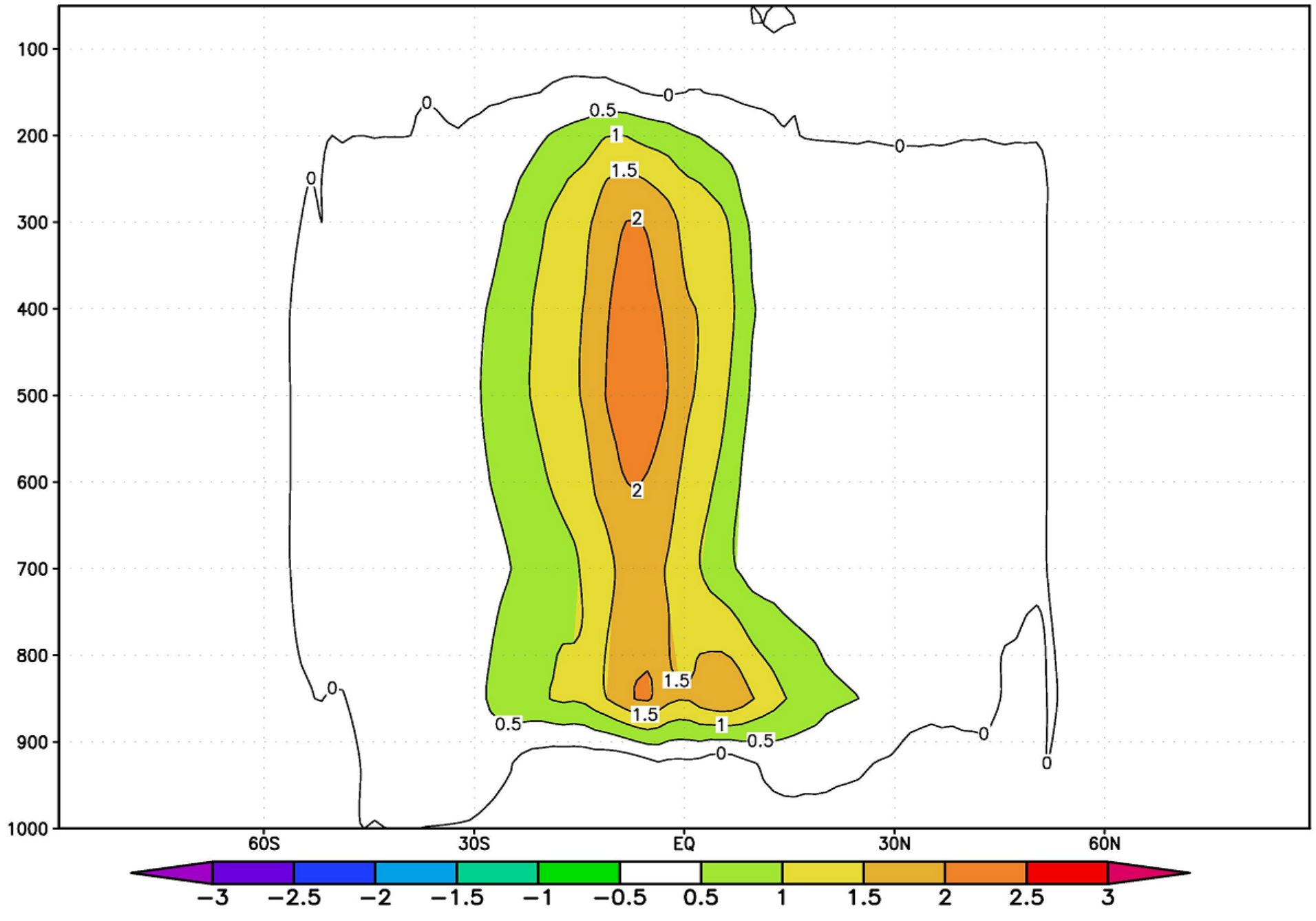
Нагревание (К/сут) вследствие потока явного тепла



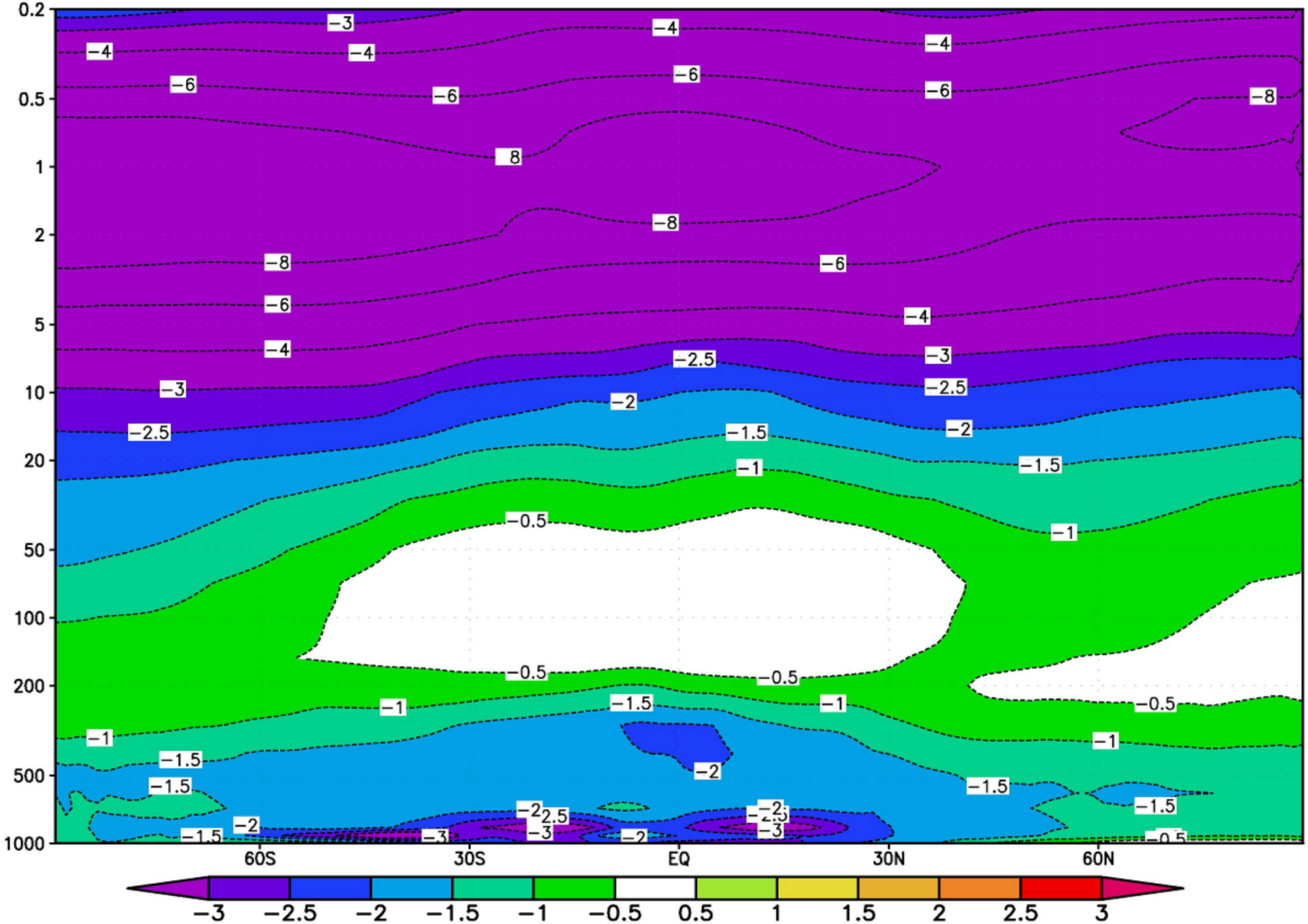
Нагревание вследствие крупномасштабной конденсации (К/сут)



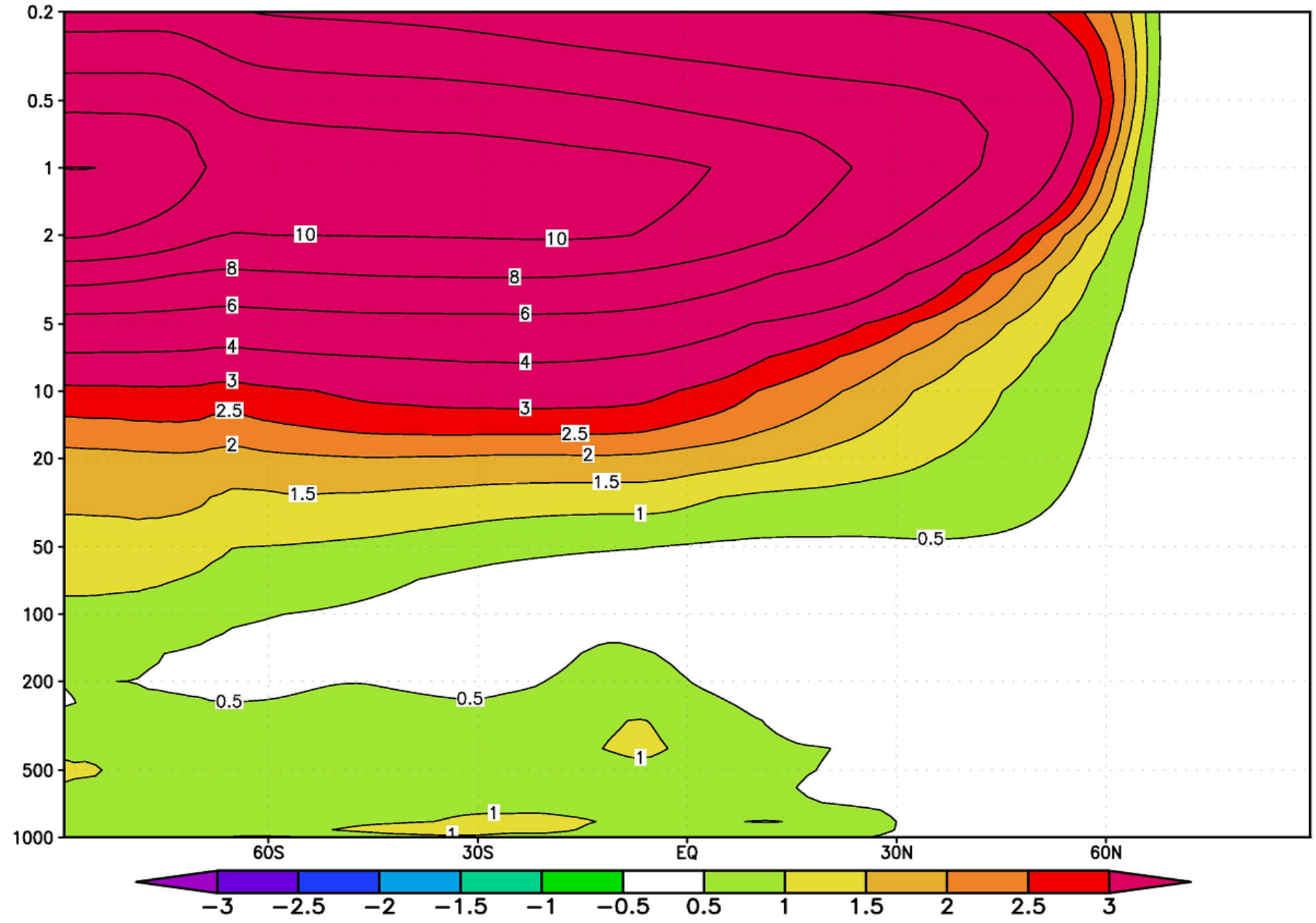
Нагревание вследствие глубокой конвекции



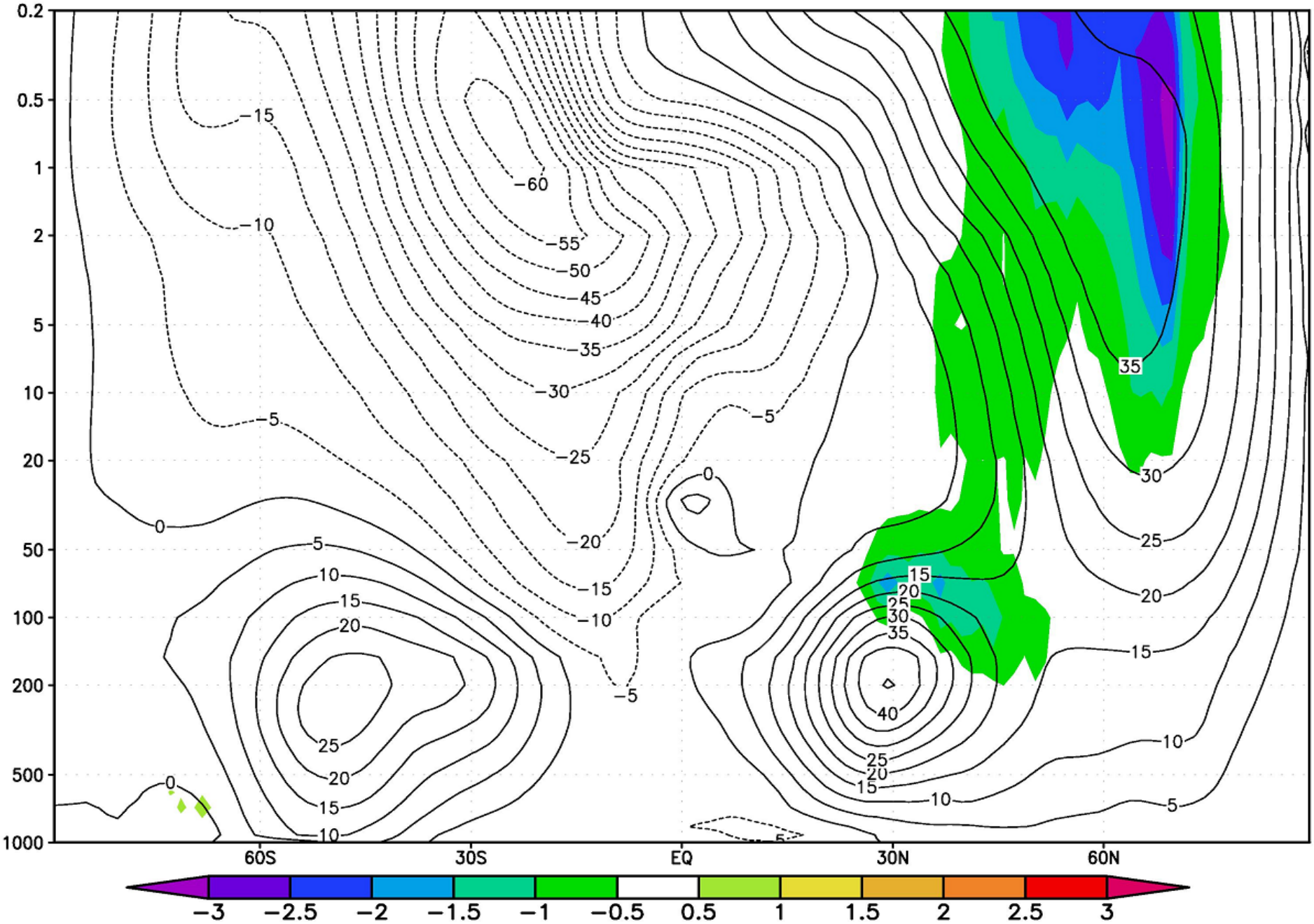
Нагревание вследствие взаимодействия с длинноволновой радиацией



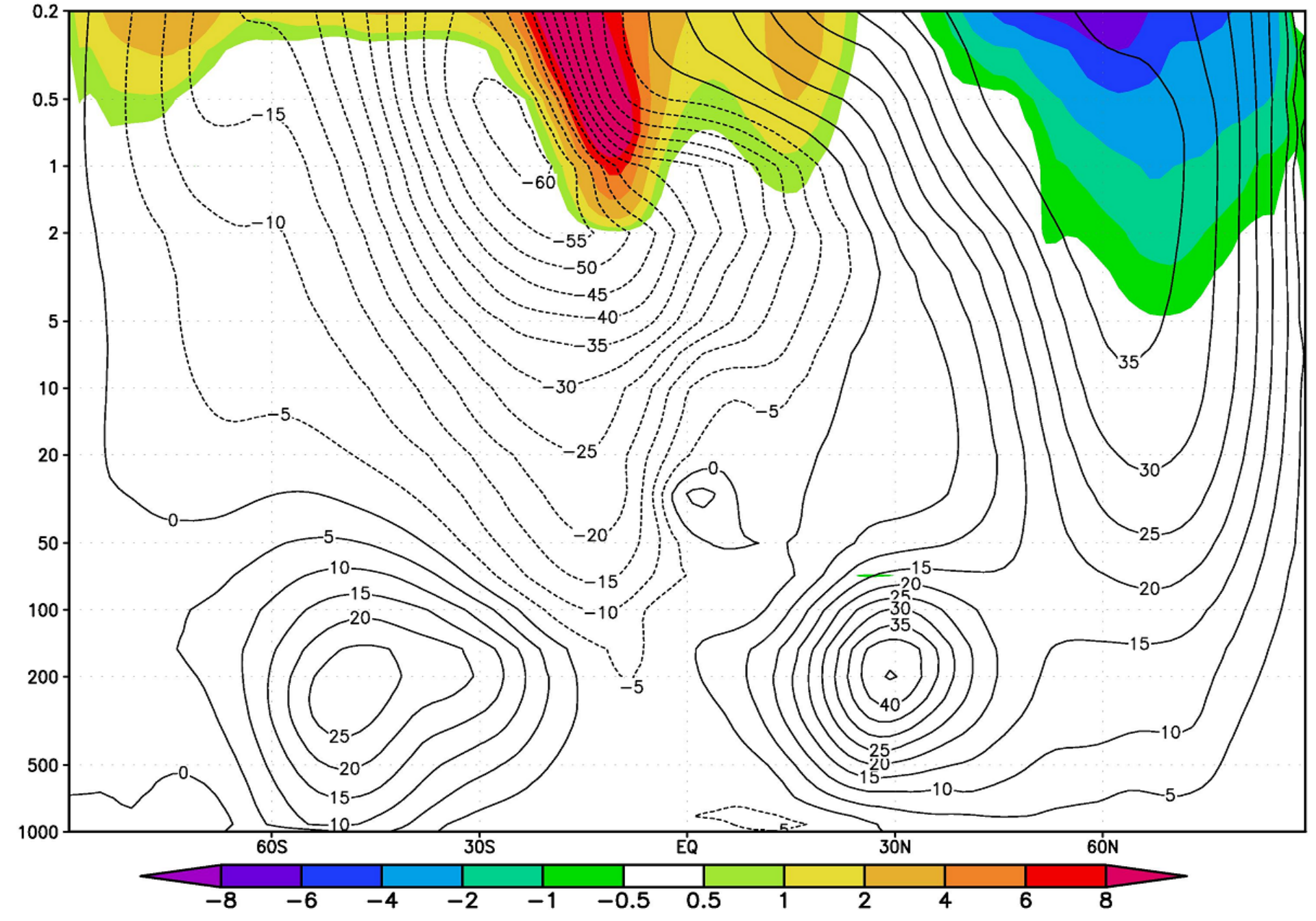
Нагревание вследствие взаимодействия с солнечным излучением

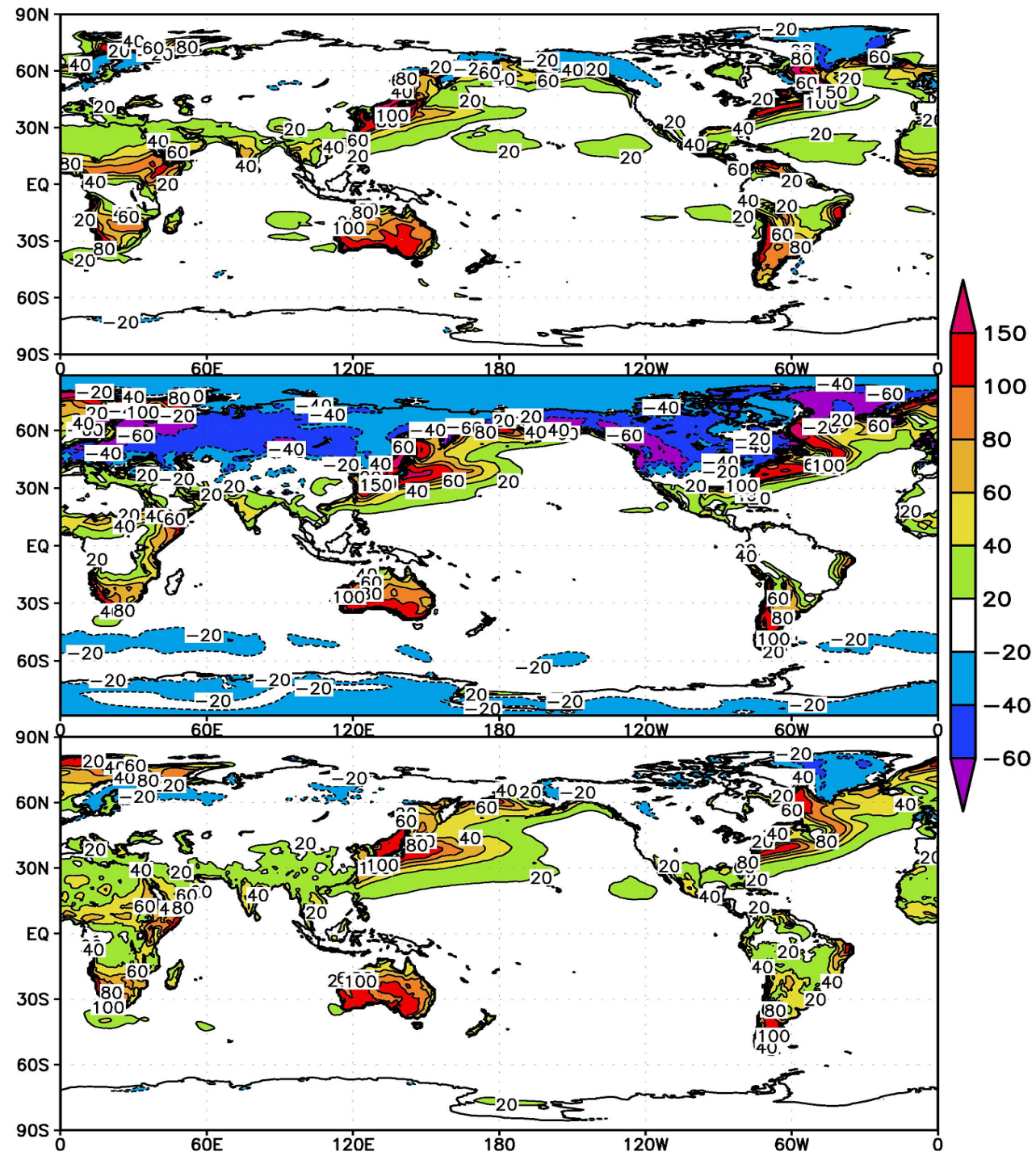


Ускорение вдоль долготы (м/с/сут) вследствие орографического ГВС



Ускорение вследствие неорографического ГВС





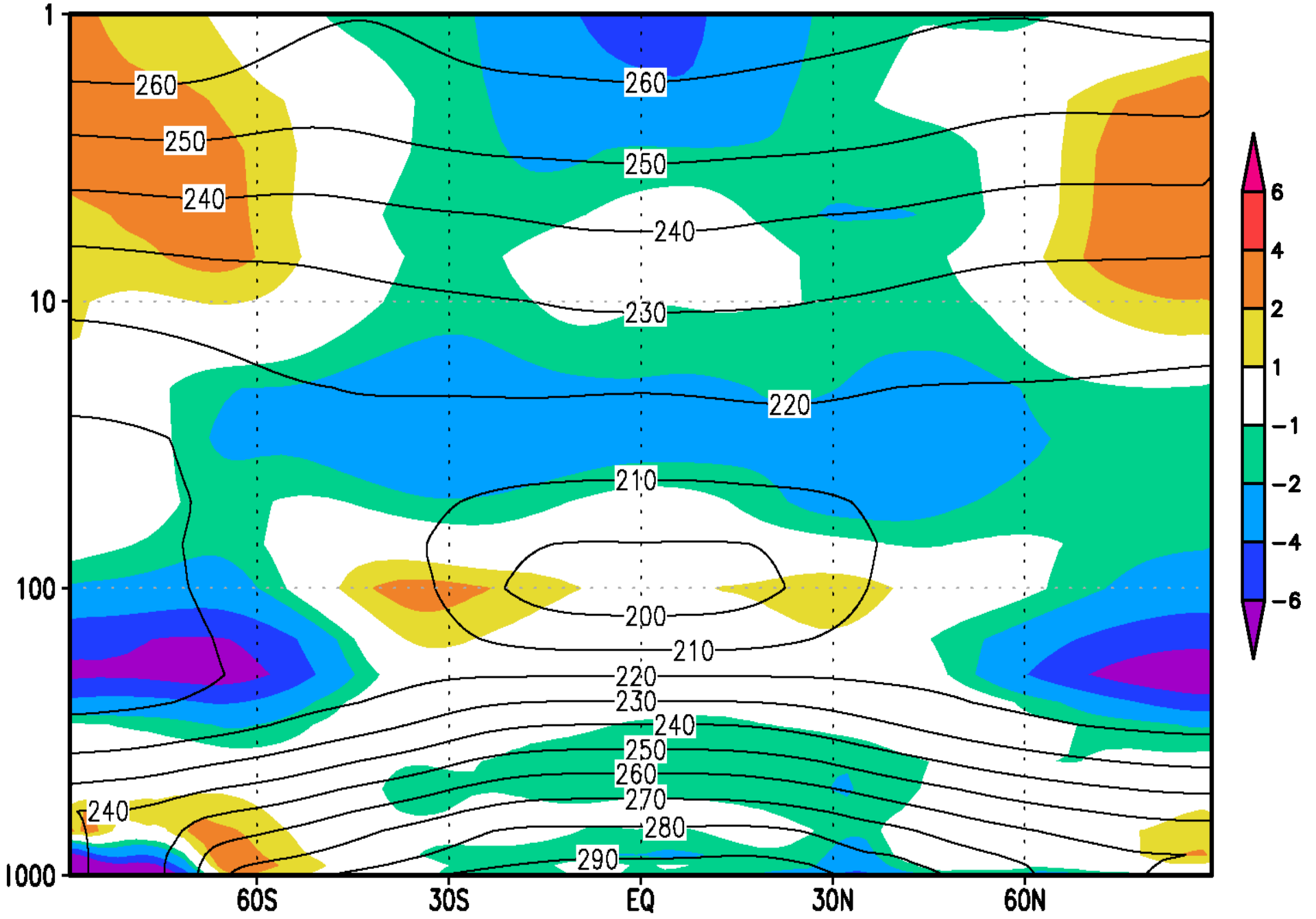
Поток явного тепла в декабре-феврале

Модель климата ИВМ

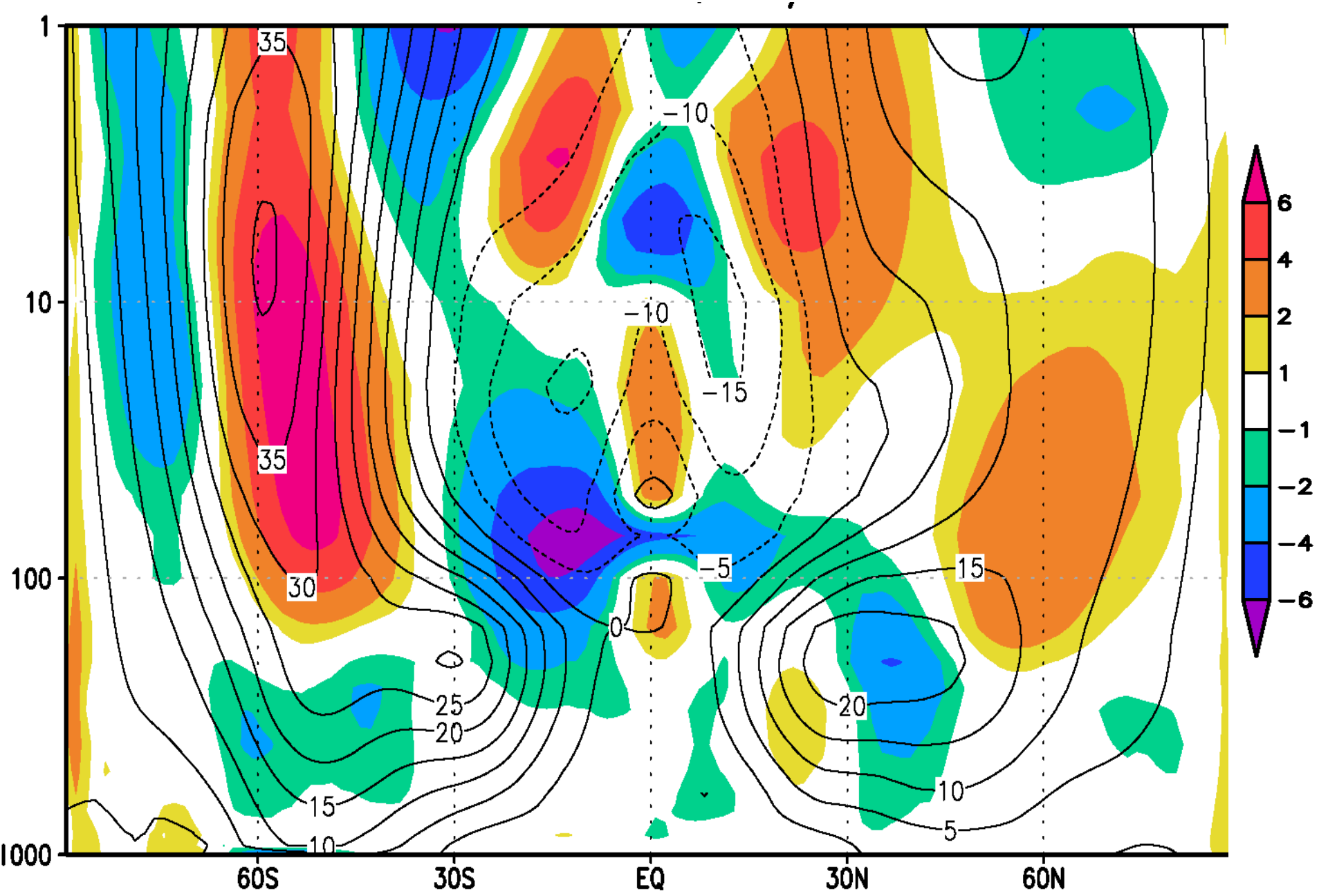
Реанализ NCEP-2

Реанализ ERA-Interim

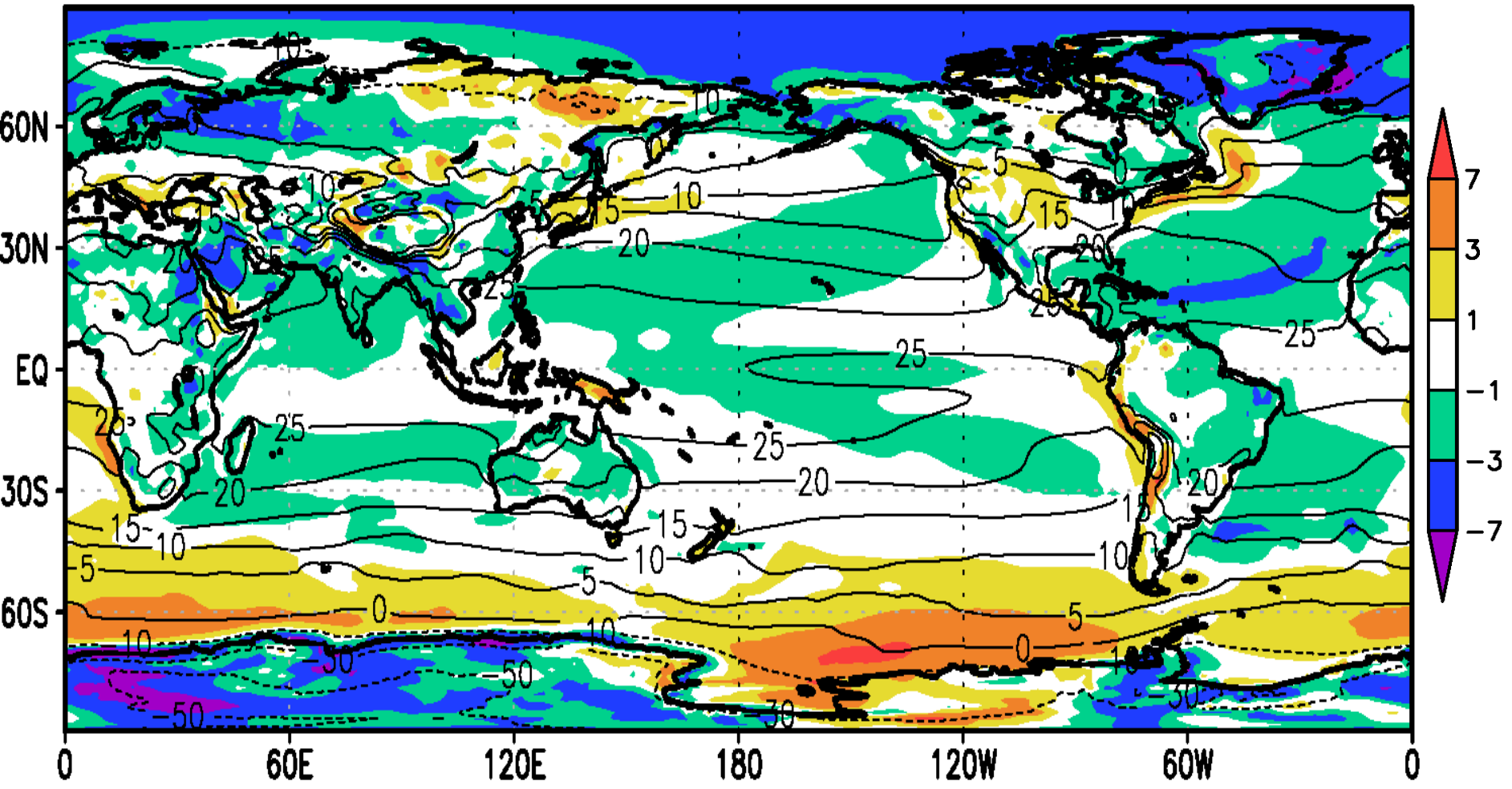
Среднегодовая ошибка температуры атмосферы в модели

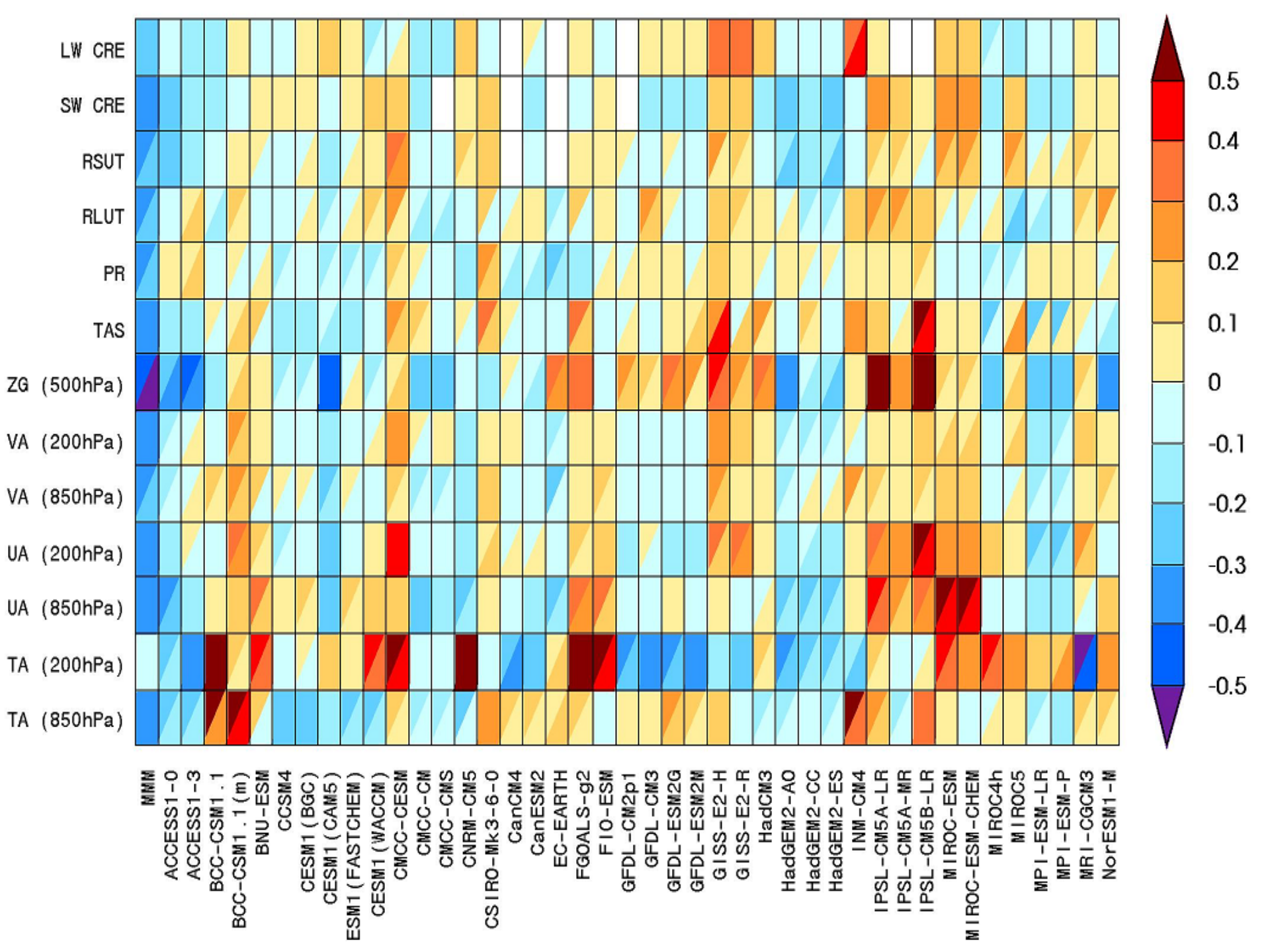


Среднегодовая ошибка зональной скорости в модели



Среднегодовая ошибка температуры поверхности по сравнению с ERA-Interim




LW CRE
SW CRE
RSUT
RLUT
PR
TAS
ZG (500hPa)
VA (200hPa)
VA (850hPa)
UA (200hPa)
UA (850hPa)
TA (200hPa)
TA (850hPa)
MMM
ACCESS1-0
ACCESS1-3
BCC-CSM1.1
BCC-CSM1.1(m)
BNU-ESM
CCSM4
CESM1(BGC)
CESM1(CAM5)
ESM1(FASTCHEM)
CESM1(WACCM)
CMCC-CESM
CMCC-CM
CMCC-CMS
CNRM-CM5
CSIRO-Mk3-6-0
CanCM4
CanESM2
EC-EARTH
FGOALS-g2
FIO-ESM
GFDL-CM2p1
GFDL-CM3
GFDL-ESM2G
GFDL-ESM2M
GISS-E2-H
GISS-E2-R
HadCM3
HadGEM2-AO
HadGEM2-CC
HadGEM2-ES
INM-CM4
IPSL-CM5A-LR
IPSL-CM5A-MR
IPSL-CM5B-LR
MIROC-ESM
MIROC-ESM-CHEM
MIROC4h
MIROC5
MPI-ESM-LR
MPI-ESM-P
MRI-CGCM3
NorESM1-M
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5