

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.581:551.583

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ  
ФОРМИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ  
В ЗЕМНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

© 2022 г. Академик РАН И. И. Мохов<sup>1,2,3,\*</sup>

Поступило 11.03.2022 г.  
После доработки 08.04.2022 г.  
Принято к публикации 08.04.2022 г.

Получены аналитические условия для оценки вклада разных внутренних и внешних факторов в формирование Арктического (полярного) усиления при потеплении для Земной климатической системы – с более сильными изменениями приповерхностной температуры в высоких широтах по сравнению с более низкими.

*Ключевые слова:* Арктическое усиление, аналитические условия, изменения климата, энергетический баланс, естественные и антропогенные факторы, климатические обратные связи

DOI: 10.31857/S2686739722070143

Арктическое (полярное) усиление – характерная особенность современных изменений климата с более сильным трендом и изменчивостью приповерхностной температуры в высоких широтах по сравнению с более низкими широтами [1–13].

В данной работе представлены аналитические условия для оценки вклада разных внутренних и внешних климатических факторов в формирование Арктического усиления при потеплении для земной климатической системы (ЗКС) с использованием уравнения баланса энергии

$$F_{\downarrow} - F_{\uparrow} = F_{\leftrightarrow}, \quad (1)$$

Здесь  $F_{\downarrow}$  – поглощенная в ЗКС солнечная радиация,  $F_{\uparrow}$  – поток уходящей тепловой радиации (УТР),  $F_{\leftrightarrow}$  – меридиональный приток тепла (МПТ). В том числе получены аналитические условия формирования Арктического усиления на основе энергобалансовой модели [2], для которой

$$F_{\downarrow} = QS(x)(1 - \alpha), \quad (2)$$

$$F_{\uparrow} = A + BT, \quad (3)$$

$$F_{\leftrightarrow} = \beta(T - T_H), \quad (4)$$

где  $Q$  – солнечная постоянная;  $S(x)$  – функция распределения потока солнечной радиации в зависимости от  $x = \sin \varphi$ ,  $\varphi$  – широта;  $\alpha$  – альbedo, зависящее от приповерхностной температуры  $T$  и широты  $\varphi$ ;  $T_H$  – полушарная приповерхностная температура;  $A$ ,  $B$  и  $\beta$  – параметры, характеризующие УТР и МПТ.

Влияние парниковых газов ( $CO_2$ ) учитывалось аналогично [2]:

$$F_{\uparrow} = (A + BT)\lambda_c, \quad (5)$$

где параметр  $\lambda_c$  характеризует парниковый эффект уменьшения  $F_{\uparrow}$  с логарифмической зависимостью от содержания углекислого газа в атмосфере.

Без выделения эффектов влияния парниковых газов ( $CO_2$ ) выражение для перепада приповерхностной температуры ( $T_{ep}$ ) между экватором ( $T_e = T(x = 0)$  при  $S(x = 0)$ ) и Северным полюсом ( $T_p = T(x = 1)$  при  $S(x = 1)$ ) в рассматриваемой модели имеет вид

$$T_{ep} = Q[S(0)(1 - \alpha_e) - S(1)(1 - \alpha_p)] / (B + \beta), \quad (6)$$

где  $\alpha_e$  и  $\alpha_p$  – альbedo на экваторе и на полюсе соответственно (см. также [4, 14]).

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Россия

\*E-mail: mokhov@ifaran.ru

Аналогично представляется температурный перепад  $T_{xp}$  между любой широтой  $\varphi$  ( $x = \sin \varphi$ ) и полюсом

$$T_{xp} = Q[S(x)(1 - \alpha(x)) - S(1)(1 - \alpha_p)]/(B + \beta) \quad (6a)$$

или между любыми широтами  $\varphi_1$  ( $x_1 = \sin \varphi_1$ ) и  $\varphi_2$  ( $x_2 = \sin \varphi_2$ )

$$T_{x_1x_2} = Q[S(x_1)(1 - \alpha(x_1)) - S(x_2)(1 - \alpha(x_2))]/(B + \beta). \quad (6b)$$

При этом Арктическое усиление при общем потеплении соответствует условиям

$$dT_{xp}/dT_H < 0, \quad (7)$$

$$dT_{ep}/dT_H < 0, \quad (7a)$$

$$dT_{x_1x_2}/dT_H < 0. \quad (7b)$$

1. При вариациях только альbedo с зависимостью альbedo от температуры  $\alpha(T)$  с проявлением соответствующей (альbedo–температура) положительной обратной связи при неизменных других параметрах

$$dT_{ep}/dT_H = Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_e/dT_H]/(B + \beta). \quad (1.1)$$

Изменения альbedo могут быть связаны с разными причинами, в том числе со снежно-ледовым покровом в высоких широтах и с эффектами опустынивания в более низких широтах, с изменением в атмосфере содержания аэрозоля, с облачностью [4]. В рассматриваемом случае с учетом  $B + \beta > 0$  условие (7a) для проявления Арктического усиления при потеплении сводится к условию

$$S(1)/S(0) > (-d\alpha_e/dT_H)/(-d\alpha_p/dT_H). \quad (1.2)$$

Это выполняется, в частности, если  $\alpha_e = \text{const}$ , или при  $d\alpha_p/dT_H < 0$ , если  $d\alpha_e/dT_H > 0$ .

2. При вариациях параметра эффективности МПТ  $\beta$  и альbedo при неизменных других параметрах

$$dT_{ep}/dT_H = Q\{[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_e/dT_H] - T_{ep}(d\beta/dT_H)\}/(B + \beta). \quad (2.1)$$

В этом случае условие (7a) для проявления Арктического усиления при потеплении сводится к условию

$$S(0)(-d\alpha_e/dT_H) - S(1)(-d\alpha_p/dT_H) < T_{ep}(d\beta/dT_H), \quad (2.2)$$

а при  $\alpha_e = \text{const}$ :

$$-S(1)(-d\alpha_p/dT_H) < T_{ep}(d\beta/dT_H). \quad (2.2a)$$

Если и  $\alpha_p = \text{const}$ , то для проявления Арктического усиления необходимо

$$d\beta/dT_H > 0, \quad (2.3)$$

т.е. при увеличении эффективности МПТ при потеплении. При  $d\alpha_p/dT_H < 0$  Арктическое усиление может проявляться не только при  $d\beta/dT_H \geq 0$ , но и при сравнительно слабом уменьшении  $\beta$  при потеплении:

$$|d\beta/dT_H| < |S(1)(d\alpha_p/dT_H)/T_{ep}|. \quad (2.2b)$$

Согласно оценкам, представленным, в частности в [4], величина  $\beta$  может увеличиваться при потеплении вследствие увеличения МПТ, связанного с переносом скрытого тепла в атмосфере.

3. Влияние облачности учитывалось с использованием следующих выражений:

$$\alpha = \alpha_o(1 - n) + \alpha_n n, \quad (3.1)$$

$$F_{\uparrow} = A_o - A_1 n + (B_o - B_n n)T, \quad (3.2)$$

где  $n$  – доля площади, занимаемой облачностью;  $\alpha_o$  и  $\alpha_n$  – альbedo безоблачной и покрытой облаками системы соответственно;  $A_o$ ,  $A_1$ ,  $B_o$ ,  $B_n$  – параметры, характеризующие поток УТР. При этом

$$A = A_o - A_1 n, \quad (3.2a)$$

$$B = B_o - B_n n. \quad (3.2b)$$

Эмпирические параметризации УТР (3), (3.2), предложенные в [2], теоретически обоснованы в [15] (см. также [4, 16, 17]). При этом полученные аналитические выражения для параметров УТР включают, в частности, их зависимость не только от приповерхностной температуры, но и от вертикальной температурной стратификации тропосферы и от содержания в атмосфере ключевого парникового газа – водяного пара.

При учете различий альbedo на разных широтах и не зависящей от широты доле облачности  $n$  выражения для альbedo на экваторе  $\alpha_e$  и на полюсе  $\alpha_p$  можно представить в виде

$$\alpha_e = \alpha_{eo}(1 - n) + \alpha_{en} n, \quad (3.3a)$$

$$\alpha_p = \alpha_{po}(1 - n) + \alpha_{pn} n, \quad (3.3b)$$

где  $\alpha_{eo}$  и  $\alpha_{po}$  – альbedo безоблачной системы, а  $\alpha_{en}$  и  $\alpha_{pn}$  – облачной системы, соответственно на экваторе и на полюсе.

В простейшем случае при учете зависимости от температуры только для доли облачности  $n$  условие проявления Арктического усиления  $dT_{ep}/dT_H < 0$  сводится к условию

$$\begin{aligned} & (dn/dT_H)\{[S(0)(\alpha_{en} - \alpha_{eo}) - \\ & - S(1)(\alpha_{pn} - \alpha_{po})](B_o - B_n n) - \\ & - B_n[S(0)(1 - \alpha_{eo} - (\alpha_{en} - \alpha_{eo})n) - \\ & - S(1)(1 - \alpha_{po} - (\alpha_{pn} - \alpha_{po})n)]\} > 0. \end{aligned} \quad (3.4)$$

С разнообразным влиянием облачности на температурный режим связана большая неопределенность оценок чувствительности ЗКС к внешним воздействиям. Это связано как с раз-

личным влиянием облаков разных ярусов и их радиационных характеристик, так и с различиями их изменений, в том числе при глобальном потеплении. Так, при количественных оценках Арктического усиления, в высоких широтах могут проявляться особенности, связанные с высоким альбедо как снежно-ледового покрова и облаков. В частности, в зависимости от соотношения значений  $\alpha_{pn}$  и  $\alpha_{po}$  в (3.4) могут заметно меняться условия проявления Арктического усиления.

4. При учете изменений, наряду с параметром эффективности МПТ  $\beta$  и альбедо, изменений параметра  $B$ , характеризующего чувствительность УТР к изменению приповерхностной температуры,

$$dT_{ep}/dT_H = Q\{[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_c/dT_H] - T_{ep}[(d\beta/dT_H) + (dB/dT_H)]/(B + \beta)\} / (B + \beta). \quad (4.1)$$

В рассматриваемом случае условие Арктического усиления при потеплении сводится к условию

$$Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_c/dT_H] - T_{ep}[(d\beta/dT_H) + (dB/dT_H)] < 0, \quad (4.2)$$

а при  $\alpha_c = \text{const}$

$$Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - T_{ep}[(d\beta/dT_H) + (dB/dT_H)]] < 0. \quad (4.2a)$$

В случае и  $d\alpha_p/dT_H = 0$  выполнение (4.2a) возможно только при

$$dB/dT_H > -(d\beta/dT_H). \quad (4.26)$$

Если  $d\beta/dT_H = 0$ , то из (4.2) следует

$$Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_c/dT_H] - T_{ep}(dB/dT_H) < 0, \quad (4.3)$$

а при  $\alpha_c = \text{const}$

$$-d\alpha_p/dT_H > -Q^{-1}T_{ep}(dB/dT_H)/S(1). \quad (4.3a)$$

В случае и  $d\alpha_p/dT_H = 0$  условие (4.3a) для формирования Арктического усиления имеет вид

$$dB/dT_H > 0. \quad (4.36)$$

Параметр  $B$  характеризует чувствительность УТР  $F_{\uparrow}$  к изменению приповерхностной температуры  $T$ . Применимость линейной зависимости  $F_{\uparrow}$  от  $T$ , полученной эмпирически [2], была теоретически обоснована в [15] в сопоставлении с данными наблюдений (см. также [4]). В том числе было получено аналитическое представление  $F_{\uparrow}$  для разных широтных зон с использованием интегральных функций пропускания для теплового излучения и физических параметризаций вертикальной стратификации для температуры и радиационно активных составляющих атмосферы, включая водяной пар, углекислый газ и аэрозоль. Существенно, полученное в [15] линейное представление  $F_{\uparrow}$  от  $T$  с аналитическими выражения-

ми для коэффициентов, можно использовать для описания климатических режимов, отличных от современного. Влияние зависимости параметра  $B$  от температуры на проявление Арктического усиления связано с зависимостью УТР не только от приповерхностной температуры, но и от вертикальной температурной стратификации тропосферы и от содержания в атмосфере водяного пара. Проявлению линейной зависимости  $F_{\uparrow}$  от  $T$  способствует, в частности, то, что при потеплении увеличение потока УТР (зависящего от  $T^4$ ) сопровождается уменьшением ширины спектрального окна прозрачности атмосферы (см. также [17]). В высоких широтах существенное значение имеет положительная корреляция вертикального температурного градиента в тропосфере с приповерхностной температурой с формированием положительной климатической обратной связи [13, 18].

5. При изменениях естественного внешнего форсинга  $Q$  (потока солнечного излучения) с учетом зависимости от температуры планетарного альбедо и эффективности МПТ

$$dT_{ep}/dT_H = \{Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_c/dT_H] - T_{ep}(d\beta/dT_H) + (dT_H/dQ)^{-1}[S(0)(1 - \alpha_c) - S(1)(1 - \alpha_p)]\} / (B + \beta). \quad (5.1)$$

При  $B + \beta > 0$  условие Арктического усиления при потеплении  $dT_{ep}/dT_H < 0$  сводится к условию

$$Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_c/dT_H] < T_{ep}[(d\beta/dT_H) - Q^{-1}(B + \beta)(dT_H/dQ)^{-1}], \quad (5.2)$$

а при  $\alpha_c = \text{const}$

$$-S(1)(-d\alpha_p/dT_H) < T_{ep}[(d\beta/dT_H) - Q^{-1}(B + \beta)(dT_H/dQ)^{-1}]. \quad (5.2a)$$

В случае и  $d\alpha_p/dT_H = 0$  выполнение (5.2a) возможно при

$$Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_c/dT_H] < T_{ep}[(d\beta/dT_H) - Q^{-1}(B + \beta)(dT_H/dQ)^{-1}], \quad (5.26)$$

т.е. при превышении параметра чувствительности эффективности МПТ к изменению температуры некоторого критического значения, зависящего от параметра чувствительности температурного режима к изменению солнечной постоянной.

Если  $d\beta/dT_H = 0$ , то из (5.2) следует

$$Q[S(1)(-d\alpha_p/dT_H) - S(0)(-d\alpha_c/dT_H)] > T_{ep}Q^{-1}(B + \beta)(dT_H/dQ)^{-1}, \quad (5.3)$$

а при  $\alpha_c = \text{const}$

$$(-d\alpha_p/dT_H) > T_{ep}(B + \beta)Q^{-2}(dT_H/dQ)^{-1}/S(1), \quad (5.3a)$$

т.е. при превышении параметра чувствительности альbedo в полярных широтах к изменению температуры некоторого критического значения, зависящего от параметра чувствительности температурного режима к изменению солнечной постоянной. В случае и  $d\alpha_p/dT_H = 0$  условие (5.3а) принимает вид

$$T_{ep}(B + \beta)Q^{-2}(dT_H/dQ)^{-1}/S(1) < 0 \quad (5.26)$$

и не выполняется для устойчивых режимов с  $dT_H/dQ > 0$ .

6. При изменениях антропогенного внешнего форсинга — радиационного воздействия парниковых газов ( $CO_2$ ), характеризуемого параметром  $\lambda_c$ , с учетом зависимости от температуры планетарного альbedo и эффективности меридионального переноса тепла

$$dT_{ep}/dT_H = \{Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_e/dT_H] - T_{ep}[(d\beta/dT_H) + B(dT_H/d\lambda_c)^{-1}]\}/(B + \beta). \quad (6.1)$$

С увеличением содержания  $CO_2$  параметр  $\lambda_c$  уменьшается по логарифмическому закону и в (6.1)

$$dT_H/d\lambda_c < 0. \quad (6.2)$$

Согласно (6.1) условие  $dT_{ep}/dT_H < 0$  для проявления Арктического усиления при потеплении в случае  $\alpha_e = \text{const}$  сводится к условию

$$QS(1)d\alpha_p/dT_H - T_{ep}[(d\beta/dT_H) + B(dT_H/d\lambda_c)^{-1}] < 0, \quad (6.3)$$

а в случае и  $d\alpha_p/dT_H = 0$ :

$$(-dT_H/d\lambda_c)^{-1} < (d\beta/dT_H)/B. \quad (6.3a)$$

Если  $d\beta/dT_H = 0$ , то из (6.1) при условии  $dT_{ep}/dT_H < 0$  следует

$$Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_e/dT_H] - T_{ep}B(dT_H/d\lambda_c)^{-1} < 0, \quad (6.4)$$

а при  $\alpha_e = \text{const}$ :

$$-d\alpha_p/dT_H > Q^{-1}T_{ep}B(-dT_H/d\lambda_c)^{-1}/S(1). \quad (6.4a)$$

Согласно (6.4а), Арктическое усиление возможно при превышении (по модулю) параметра чувствительности альbedo в полярных широтах  $|-d\alpha_p/dT_H|$  некоторого критического уровня  $|Q^{-1}T_{ep}B(-dT_H/d\lambda_c)^{-1}/S(1)|$ , зависящего, в том числе, от параметра чувствительности температурного режима к изменениям содержания  $CO_2$  в атмосфере ( $dT_H/d\lambda_c$ ). В случае и  $d\alpha_p/dT_H = 0$  условие (6.4а) для формирования Арктического усиления невыполнимо, так как  $dT_H/d\lambda_c < 0$ .

Существенно, что Арктическое усиление при изменениях параметра  $\lambda_c$ , характеризующего изменения содержания в атмосфере  $CO_2$ , возможно при зависящих от температурного режима других

параметров системы, в частности параметра  $\beta$ , а также альbedo.

7. Изменения естественного внешнего форсинга — потока солнечного излучения — связаны как с изменением солнечной постоянной ( $Q$ ), так и с изменениями функции распределения инсоляции в зависимости от широты  $S(x)$ , в том числе в годовом ходе и при многотысячелетних вариациях параметров орбиты Земли вокруг Солнца — для циклов Миланковича. При изменениях  $S(x)$  с учетом зависимости от температуры планетарного альbedo и эффективности МПТ

$$dT_{ep}/dT_H = Q\{[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_e/dT_H] - T_{ep}(d\beta/dT_H)/(B + \beta) + [(1 - \alpha_e)(dT_H/dS(0))^{-1} - (1 - \alpha_p)(dT_H/dS(1))^{-1}]\}/(B + \beta). \quad (7.1)$$

В этом случае условие Арктического усиления при потеплении сводится к условию

$$[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_e/dT_H] - T_{ep}(d\beta/dT_H)/(B + \beta) + [(1 - \alpha_e)(dT_H/dS(0))^{-1} - (1 - \alpha_p)(dT_H/dS(1))^{-1}] < 0, \quad (7.2)$$

а при  $\alpha_e = \text{const}$

$$[S(1)d\alpha_p/dT_H] - T_{ep}(d\beta/dT_H)/(B + \beta) + [(1 - \alpha_e)(dT_H/dS(0))^{-1} - (1 - \alpha_p)(dT_H/dS(1))^{-1}] < 0. \quad (7.2a)$$

В случае  $\alpha_e = \text{const}$  и  $\alpha_p = \text{const}$  условие (7.2) сводится к следующему:

$$-T_{ep}(d\beta/dT_H)/(B + \beta) + [(1 - \alpha_e)(dT_H/dS(0))^{-1} - (1 - \alpha_p)(dT_H/dS(1))^{-1}] < 0. \quad (7.2b)$$

При  $d\beta/dT_H = 0$  неравенство (7.2b) принимает вид

$$(1 - \alpha_e)(dT_H/dS(0))^{-1} < (1 - \alpha_p)(dT_H/dS(1))^{-1} \quad (7.2b)$$

или

$$(dS(0)/dS(1) < (1 - \alpha_p)/(1 - \alpha_e). \quad (7.2r)$$

Согласно (7.2r), Арктическое усиление возможно при более сильных вариациях функции распределения инсоляции  $S(x)$  в более высоких широтах по сравнению с более низкими при  $\alpha_p > \alpha_e$  (величина  $(1 - \alpha_p)/(1 - \alpha_e)$  меньше 1).

8. При одновременных изменениях естественного и антропогенного форсинга, в частности при изменениях  $Q$  и  $\lambda_c$ ,

$$dT_{ep}/dT_H = Q\{[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_e/dT_H] - T_{ep}[(d\beta/dT_H) + B(dT_H/d\lambda_c)^{-1}]/(B + \beta) + Q^{-1}(dT_H/dQ)^{-1}[S(0)(1 - \alpha_e) - S(1)(1 - \alpha_p)]\}/(B + \beta) \quad (8.1)$$

и условия проявления Арктического усиления усложняются. При одновременном учете изменения разных естественных и антропогенных факторов эффект Арктического усиления может существенно увеличиваться или ослабляться. В [19], например, с использованием энергобалансовой модели климата получены аналитические условия, свидетельствующие о необходимости исследования устойчивости ЗКС при одновременном изменении разных факторов в соответствии с реальными процессами.

Соответствующие формулировки для Арктического усиления при использовании условий  $dT_{x1x2}/dT_H < 0$  и  $dT_{xp}/dT_H < 0$  аналогичны полученным при использовании условия  $dT_{ep}/dT_H < 0$ .

Полученные аналитические выражения позволяют качественно оценить роль различных климатических процессов в формировании Арктического (полярного) усиления. Предложенный подход имеет также методологическое значение. Подобные аналитические условия, которые можно детализировать с учетом новых эффектов, в том числе различных эффектов, связанных с влиянием облачности и радиационно-активных атмосферных примесей (включая разные виды аэрозоля), полезны для оценки вклада разных естественных и антропогенных факторов, особенностей климатической изменчивости и климатических обратных связей в формирование Арктического усиления.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (№ 19-17-00240). Особенности климатических обратных связей в высоких широтах оценивались в соответствии с соглашением № 075-15-2021-577 Министерства науки и высшего образования РФ с ИФА им. А.М. Обухова РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. et al. (eds.)]. Cambridge Univ. Press. 2021.
- Будыко М.И. Изменения климата. Л.: Гидрометеоздат. 1974. 280 с.
- Manabe S., Stouffer R.J. Sensitivity of a Global Climate Model to an Increase of CO<sub>2</sub> concentration in the Atmosphere // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 5529–5554.
- Мохов И.И. Диагностика структуры климатической системы. СПб: Гидрометеоздат. 1993. 271 с.
- Chapman W.L., Walsh J.E. Recent Variations of Sea Ice and Air Temperature in High Latitudes // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1993. V. 74. P. 33–47.
- Alexeev V.A., Langen P.L., Bates J.R. Polar Amplification of Surface Warming on an Aquaplanet in ‘Ghost Forcing’ Experiments without Sea Ice Feedbacks // Clim. Dyn. 2005. V. 24. P. 655–666.
- Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of Polar Amplification in Long-term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming // J. Clim. 2010. V. 23. P. 3888–3906.
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and Impacts of Arctic Amplification: A Research Synthesis // Glob. Planet. Change. 2011. V. 77. P. 85–96.
- Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления // Лед и снег. 2014. № 2 (126). С. 53–68.
- Pithan F., Mauritsen T. Arctic Amplification Dominated by Temperature Feedbacks in Contemporary Climate Models // Nature Geoscience. 2014. V. 7. P. 181–184.
- Dai H. Roles of Surface Albedo, Surface Temperature and Carbon Dioxide in the Seasonal Variation of Arctic Amplification // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. e2020GL090301. <https://doi.org/10.1029/2020GL090301>
- Previdi M., Smith K.L., Polvani L.M. Arctic Amplification of Climate Change: A Review of Underlying Mechanisms // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. P. 093003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>
- Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14.
- Васюта Ю.Б., Мохов И.И., Петухов В.К. Чувствительность малопараметрических моделей климата к изменению характеристик меридионального переноса тепла // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 2. С. 115–125.
- Мохов И.И., Петухов В.К. Параметризация уходящей длинноволновой радиации для климатических моделей. М.: ИФА АН СССР. 1978. 34 с.
- Грачева И.М., Мохов И.И., Петухов В.К. Моделирование влияния трехслойной облачности на уходящую тепловую радиацию // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 4. С. 242–249.
- Koll D.D.B., Cronin T.W. Earth’s Outgoing Longwave Radiation Linear due to H<sub>2</sub>O Greenhouse Effect // PNAS. 2018. V. 115 (41). P. 10293–10298.
- Мохов И.И., Акперов М.Г. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 467–475.
- Мохов И.И. Реакция простой энергобалансовой модели климата на изменение ее параметров // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1979. Т. 15. № 4. С. 375–383.

## ANALYTICAL CONDITIONS FOR THE ARCTIC AMPLIFICATION FORMATION IN THE EARTH'S CLIMATE SYSTEM

Academician of the RAS **I. I. Mokhov**<sup>a,b,c,#</sup>

<sup>a</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Moscow Institute for Physics and Technology, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: mokhov@ifaran.ru*

Analytical conditions are obtained for estimating the contribution of various internal and external factors to the formation of the Arctic (polar) amplification under warming for the Earth's climate system – with stronger changes in surface temperature at high latitudes compared to lower latitudes.

*Keywords:* Arctic amplification, analytical conditions, climate change, energy balance, natural and anthropogenic factors, climate feedbacks