

УДК 551.510

ВКЛАД ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЭМИССИЙ CO_2 И CH_4 В АТМОСФЕРУ С ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

С. Н. Денисов¹, А. В. Елисеев^{1,2,3}, академик РАН И. И. Мохов^{1,2,4,*}

Поступило 06.06.2019 г.

Получены оценки вклада антропогенных и естественных эмиссий парниковых газов в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата при различных сценариях антропогенных выбросов в XXI веке. Показано, что учёт изменений климатических условий может сильно влиять на показатели воздействия выбросов различных парниковых газов на климатическую систему, особенно на больших временных горизонтах. При принятии решений следует учитывать, что в зависимости от горизонта планирования может изменяться роль естественных потоков парниковых газов в атмосферу из наземных экосистем. В настоящее время в российских регионах наземные экосистемы, поглощая CO_2 из атмосферы способствуют замедлению роста глобальной температуры, а эмитируя CH_4 в атмосферу ускоряют потепление. При этом общий эффект естественных потоков этих парниковых газов из российских регионов в современных условиях способствует замедлению потепления. Роль этого замедляющего потепление эффекта растёт в первой половине XXI века, а после достижения максимума (зависящего от сценария антропогенных выбросов) уменьшается к концу века при всех рассмотренных сценариях антропогенных воздействий в связи с ростом естественных эмиссий CH_4 и уменьшением поглощения CO_2 наземными экосистемами.

Ключевые слова: углеродный цикл, эмиссии парниковых газов, региональное моделирование, Северная Евразия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652488174-80>

Для детального и всестороннего анализа влияния изменений углеродного цикла в земной климатической системе необходим, в том числе, адекватный учёт углеродного баланса российских бореальных лесов, влажных и других экосистем. Это особенно актуально в связи с Парижским соглашением (2015 г). Рамочной конвенции ООН об изменении климата, касающегося проблем уменьшения выбросов парниковых газов и соответствующей адаптации [1]. В рамочной конвенции ООН об изменении климата, в Киотском протоколе и в Парижском соглашении для определения относительной роли антропогенных выбросов различных газов используется их 100-летний потенциал глобального потепления (Pw). В данной работе для оценки вклада антропогенных и естественных эмиссий с территории России в XXI веке в глобальные изменения климата при различных сценариях антропогенных выбросов вводятся новые характеристики.

Для количественного определения относительного и абсолютного вклада в изменение климата выбросов различных парниковых газов, а также выбросов из различных регионов, стран или отдельных источников, могут использоваться различные показатели. Они служат для оценки различных эффектов (таких как изменение температуры или уровня моря) на разных временных горизонтах. Климатический эффект эмиссий может быть оценен для конкретного момента или проинтегрирован на заданном интервале времени. В наиболее распространенных показателях используется радиационное возмущающее воздействие R [2, 3]. Эта мера применяется для сравнения воздействия на среднюю глобальную температуру поверхности T различных факторов, влияющих на радиационный баланс Земли.

Широко используемым показателем воздействия на климатическую систему является потенциал Pw , характеризующий интегральное воздействие R при импульсном выбросе выбранного газа на определённом временном горизонте (обычно 20, 50 или 100 лет). Этот показатель учитывает радиационную эффективность различных атмосферных компонентов и их время жизни в атмосфере и выражается в безразмерных значениях относительно CO_2 . По-

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет

⁴ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

* E-mail: mokhov@ifaran.ru

тенциал P_w используется при сравнении эффектов эмиссий различных газов (т.н. CO_2 -эквивалент).

В настоящее время также используется потенциал изменения глобальной температуры P_t [2]:

$$P_t_x(\tau) = \frac{P_x^{(a)}(\tau)}{P_{\text{CO}_2}^{(a)}(\tau)}, \quad (1)$$

где $P_x^{(a)}$ – абсолютный потенциал изменения глобальной температуры для радиационно активной атмосферной примеси “ x ”. Показатель P_t отражает изменения в T через выбранный промежуток времени после импульсного выброса выбранного газа по отношению к изменениям в результате аналогичного выброса CO_2 , и таким образом учитывает реакцию климата наряду с радиационной эффективностью и временем жизни газа в атмосфере. Потенциал $P^{(a)}$ представляет собой изменение глобальной температуры на временном горизонте в ответ на импульсный выброс примеси “ x ” в начальный момент времени и обычно записывается в виде свертки R :

$$P_x^{(a)}(\tau) = \int_0^\tau R_x(t) \cdot r(\tau - t) dt, \quad (2)$$

где r – функция климатического отклика. Функции R_x и r обычно аппроксимируются в виде суммы экспонент от времени, их расчёт подробно описан в отчетах Межправительственной группы по изменениям климата (МГЭИК) [4]. Вычисление $P^{(a)}$ осуществляется для импульсной эмиссии примеси в равновесных условиях, поэтому коэффициенты в R_x , зависящие от фоновых условий, считаются постоянными. Различие в значениях радиационной эффективности различных газов в четвёртом и пятом отчётах МГЭИК частично связано с пересчётом этих коэффициентов для изменившихся условий. В [5, 6] показано, что сокращение 100-летнего абсолютного P_w для углекислого газа в XXI веке может достигать 23%, а 100-летний P_w метана может меняться в пределах от -10% до $+20\%$ по сравнению с текущими значениями при различных сценариях антропогенного воздействия.

В целом, потенциал P_w для краткосрочных факторов воздействия на климат выше, чем их P_t вследствие того, что P_w отражает интегральный эффект выброса на временном интервале, а в P_t рассматривается изменение температуры в конце этого интервала. Следовательно, выбор показателя может значительно влиять на относительную важность краткосрочных факторов воздействия на климат и хорошо перемешанные парниковые газы,

также как и выбор временного горизонта. Анализ воздействия импульсных выбросов показывает, что вклад краткосрочных факторов воздействия на климат, таких как CH_4 , чёрный углерод и диоксид серы, может быть сравним с вкладом CO_2 на коротких временных горизонтах (того же или противоположного знака). На более длительных временных горизонтах доминируют выбросы CO_2 .

Следует отметить, что P_t определяется для импульсного выброса газа при постоянных фоновых условиях, в то время как планируются сценарии эмиссий в изменяющихся условиях. Для учёта изменяющихся фоновых условий предлагается использовать модифицированный $P^{(a)}$:

$$P_x^{(a)*}[T_0; T_H] = \sum_{k=T_0}^{T_H-1} \int_k^{k+1} R_{x,k}(t) \cdot r(T_H - T_0 - t) dt, \quad (3)$$

где T_0 – год импульсного выброса примеси « x », а $T_H = T_0 + \tau$. Для расчёта коэффициентов $R_{x,k}$ используются среднегодовые фоновые величины для года k .

Наряду с эффектом импульсного выброса целесообразно оценивать интегральный эффект транзитивных сценариев выбросов. Для этого предлагается использовать абсолютный кумулятивный температурный потенциал Kt :

$$Kt_{Ex}^{(a)}[T_0; T_H] = \sum_x \sum_{t=T_0}^{T_H-1} Ex(t) \cdot P_x^{(a)*}[t; T_H], \quad (4)$$

где Ex – выбранный сценарий эмиссии углекислого газа или метана (как из антропогенных, так и из естественных источников). Величина $Kt^{(a)}$ – это изменение T в момент T_H , вызванное эмиссиями примеси “ x ” по сценарию Ex в течение периода $[T_0; T_H]$.

Фоновые климатические условия и естественные эмиссии метана и углекислого газа определялись по расчётам с климатической моделью Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [7–10] для 1765–2100 гг. при задании сценариев антропогенных и естественных воздействий на земную климатическую систему. Учитывались изменения содержания парниковых газов в атмосфере, тропосферных и стратосферных вулканических сульфатных аэрозолей, изменения солнечной постоянной и изменения сельскохозяйственных площадей в соответствии с условиями “Historical simulations” международного проекта сравнения климатических моделей CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, <https://cmip.llnl.gov/cmip5/>) для XVIII–XX веков. Для XXI века антро-

погенные воздействия учитывались согласно сценариям семейства RCP 2.6, 4.5, 6.0 и 8.5 (Representative Concentration Pathways, <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>). В соответствии со стандартными условиями проекта CMIP5 для углекислого газа использовались сценарии RCP для концентрации в атмосфере. В связи с большим влиянием обратной связи между климатом и метановым циклом на содержание CH_4 в атмосфере [9] для метана при этом использовались сценарии его антропогенных эмиссий.

В отличие от версии климатической модели [9], время жизни метана в атмосфере параметризовалось в соответствии с [11]. При этом учитывались интерактивно рассчитываемые изменения температуры, влажности воздуха и концентрации метана в атмосфере и заданные по сценариям RCP антропогенные эмиссии оксидов азота, угарного газа и летучих органических соединений.

На рис. 1 представлены антропогенные и естественные эмиссии CO_2 и CH_4 с территории России в XXI веке. Антропогенные эмиссии рассчитывались по данным сценариев RCP для региона REF (страны Восточной Европы и бывшего СССР, <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>), с нормировкой на значения соответствующих эмиссий с территории России в момент перехода от сценария “Historical simulations” к сценариям RCP (2000 г. для метана и 2005 г. для углекислого газа). Естественные эмиссии интерактивно рассчитывались КМ ИФА РАН. Нужно отметить, что по данным (<https://databank.worldbank.org/data/source/world-development-indicators>) реальные антропогенные эмиссии CH_4 с территории России близки к наиболее агрессивному антропогенному сценарию RCP 8.5.

Естественные эмиссии метана с территории России увеличиваются по расчетам к концу XXI века на 50–300% в зависимости от сценария антропо-

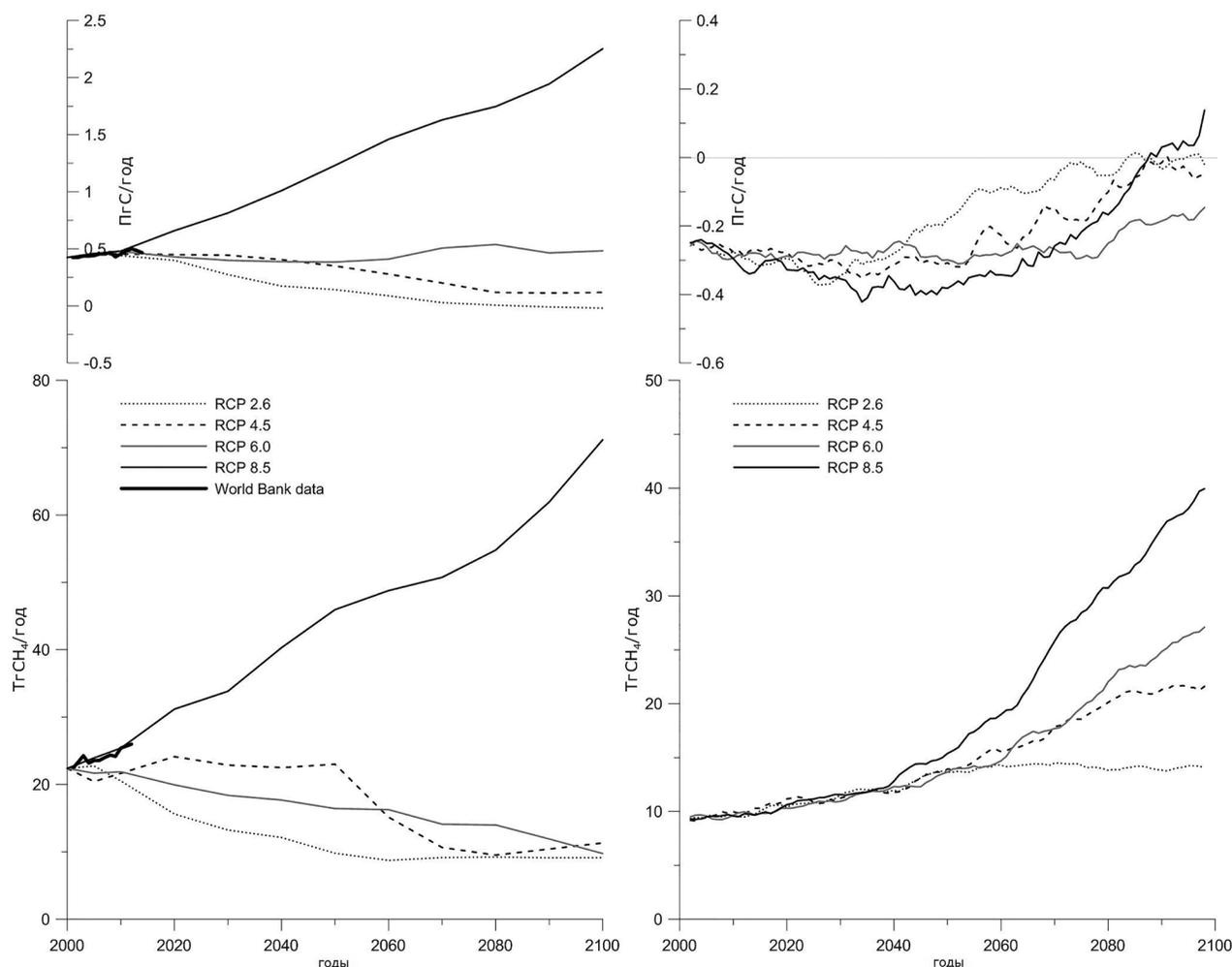


Рис. 1. Антропогенные (слева) и естественные (справа) потоки CO_2 [PgC/год] (сверху) и CH_4 [TgCH₄/год] (снизу) при различных сценариях антропогенного воздействия. Для естественных эмиссий использовалось 5-летнее скользящее среднее.

погенных воздействий. При всех сценариях кроме RCP 8.5 во второй половине XXI века они начинают превышать соответствующие антропогенные эмиссии. Поглощение CO₂ наземными экосистемами при всех сценариях растёт и достигает максимума к середине XXI века, а далее сокращается к концу века до малых значений при сценариях RCP 2.6, 4.5 и 8.5. По расчётам при сценарии RCP 6.0 в течение всего XXI века поток углекислого газа из атмосферы в наземные экосистемы сохраняется в пределах 0,2–0,4 ПгС/год.

На рис. 2 приведены абсолютные потенциалы $P^{(a)}$ и $P^{(a)*}$ углекислого газа для интервала [1990; T_H]. Как было показано выше, они различаются тем, что R для $P^{(a)}$ рассчитывается в предположении

сохранения фоновых условий в момент T_0 на всём интервале [T_0 ; T_H], в то время как для $P^{(a)*}$ учитывается изменение R при изменении фоновых условий. Поэтому для временных интервалов больше 10–15 лет $P^{(a)*}$ и $P^{(a)}$ могут существенно различаться. Для наиболее агрессивного антропогенного сценария RCP 8.5 (с наиболее сильным изменением фоновых условий) $P^{(a)}$ углекислого газа на временном горизонте 100 лет более чем вдвое превышает $P^{(a)*}$ для интервала [1990; 2090].

Рассчитанные для интервала [1990; T_H] потенциалы $P^{(a)}$ и $P^{(a)*}$ для метана при всех сценариях различаются значительно слабее. Для RCP 8.5 максимальные отличия достигают 20% для горизонта около 80 лет, для остальных сценариев они не превышают 6%. Тем не менее, если при расчёте относительного потенциала Pt метана использовать $P^{(a)*}$ вместо $P^{(a)}$, его значения для больших периодов могут быть в 2–2,5 раза выше.

В таблице 1 представлены рассчитанные значения потенциала Kt для антропогенных и естественных эмиссий парниковых газов с территории России при T_H соответствующем 2030, 2050, 2075 и 2100 гг. Наземные экосистемы российских регионов в начале XXI века по расчётам способствуют стабилизации T , однако с середины XXI века за счёт роста естественных эмиссий метана и сокращения поглощения CO₂ стабилизация начинает ослабевать. Для сценария RCP 6.0 вклад естественных эмиссий в стабилизацию T , накопленный с 1990 г., оказывается полностью скомпенсирован к концу 21 века. Для сценария RCP 8.5 вклад естественных эмиссий с территории российских регионов в изменения T в последнем десятилетии 21 века уже становится положительным.

На рис. 3 представлены значения абсолютного потенциала $Kt^{(a)}$ на интервале [1990; T_H] отдельно для эмиссий углекислого газа и метана с территории

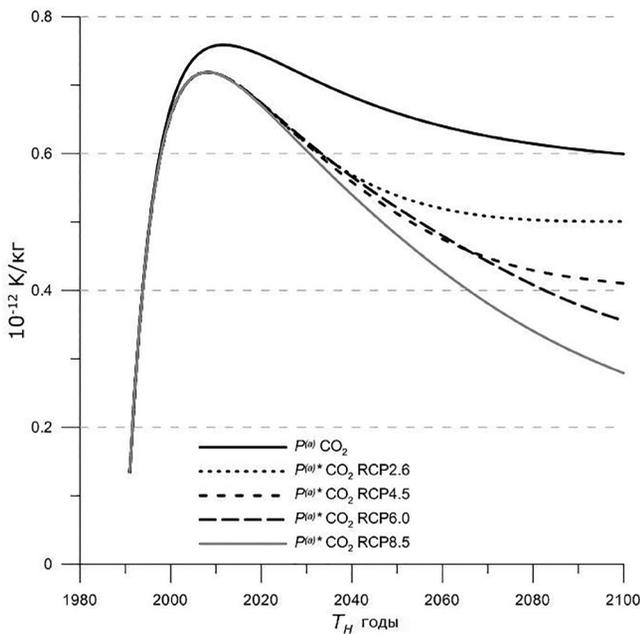


Рис. 2. Абсолютный потенциал изменения глобальной температуры $P^{(a)}$ углекислого газа и его модификация $P^{(a)*}$ рассчитанные для интервала [1990; T_H] при различных сценариях антропогенных воздействий.

Таблица 1. Абсолютный кумулятивный температурный потенциал $Kt^{(a)}$ [1990; T_H] [мК] антропогенных и естественных эмиссий CO₂ и CH₄ при различных сценариях антропогенного воздействия

Сценарий	RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
	антропогенные	естественные	всего									
$T_H = 2030$	67	-5	62	76	-5	71	72	-5	67	86	-7	79
$T_H = 2050$	70	-11	59	92	-12	80	84	-10	74	127	-14	113
$T_H = 2075$	67	-10	57	91	-13	78	90	-11	79	173	-10	163
$T_H = 2100$	65	-7	58	85	-6	79	94	0	94	211	12	223

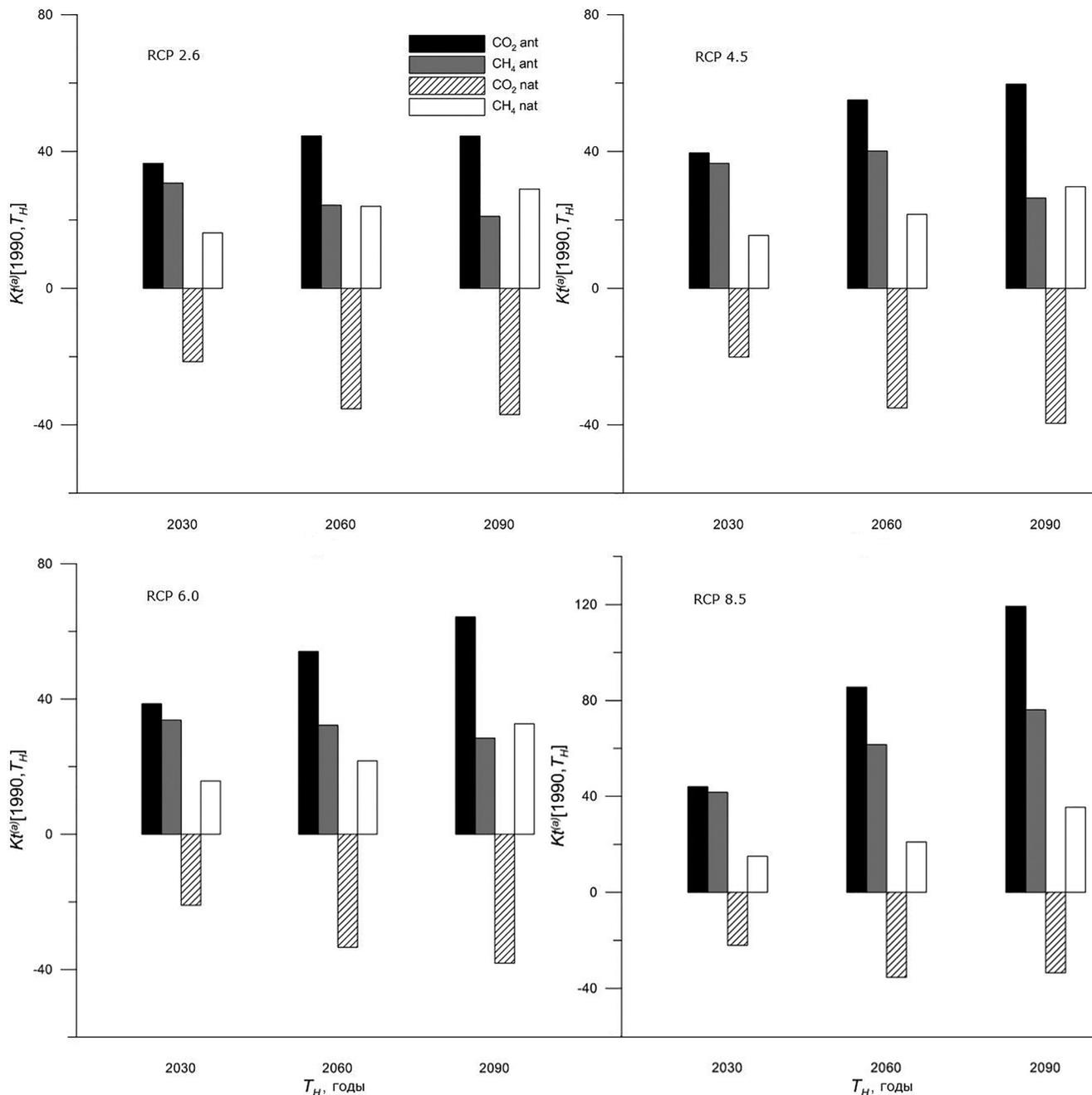


Рис. 3. Абсолютный потенциал $Kt^{(a)}$ [MK] антропогенных и естественных эмиссий CO_2 и CH_4 с территории России для интервалов [1990; 2030], [1990, 2060] и [1990; 2090].

России при T_H соответствующем 2030, 2060 и 2090 гг. Отмечается уменьшение антропогенного потенциала $Kt^{(a)}$ во второй половине XXI века при сценариях RCP 2.6 и 4.5, и его рост при сценариях более интенсивных антропогенных воздействий (RCP 6.0 и 8.5). Происходит это уменьшение главным образом в результате сокращения антропогенной эмиссии метана. При сценарии RCP 6.0 потенциал $Kt^{(a)}$ антропогенных эмиссий CO_2 растёт быстрее, чем

снижается потенциал антропогенных эмиссий метана.

Количественные оценки данной работы могут быть уточнены за счёт учёта выделения CO_2 и CH_4 из почвы в атмосферу при таянии многолетне-мёрзлых грунтов субполярных широт, при котором из “старого” (сформировавшегося в прошлые межледниковья, не разложившегося ввиду холодных условий и не учитываемого блоками углеродного и

метанового цикла КМ ИФА РАН) углеродного субстрата при сценарии RCP 8.5 в XXI веке может выделиться до 174 Пг углерода в виде углекислого газа и метана [12, 13]. Кроме того, развитие термокарстовых озёр (также не учитываемых в данной работе) при таянии многолетнемерзлых регионов суши способствует развитию подозёрных таликов, что также способствует выделению этих парниковых газов в атмосферу – по имеющимся оценкам в XXI веке при сценариях RCP это может привести к выделению до 50 ТгСН₄ в атмосферу с наибольшим вкладом первой половины столетия [14]. Также надо иметь в виду, что траектория отклика характеристик наземного углеродного и метанового циклов на климатические изменения существенно зависит от взаимодействия с азотным циклом [4, 12].

Кроме того, поглощение СО₂ при потеплении российской частью Арктики может возрасти в связи с таянием морского льда [4]. В то же время, существенное увеличение выделения метана с арктического шельфа в атмосферу по сравнению с современным значением ≤ 9 ТгСН₄ [13] маловероятно ввиду характерного времени отклика термофизических процессов шельфа на внешнее воздействие, достигающего 15 тыс. лет [15].

Согласно полученным результатам, учёт изменений климатических условий может сильно влиять на показатели воздействия выбросов различных парниковых газов на климатическую систему, особенно на больших временных горизонтах. Чем интенсивнее антропогенное воздействие на климат, тем меньше оказывается 100-летний потенциал современных эмиссий СО₂. При этом возрастает относительная роль современных эмиссий метана.

При принятии решений следует учитывать, что в зависимости от горизонта планирования может изменяться роль естественных потоков парниковых газов в атмосферу из наземных экосистем. В современных условиях на коротких временных интервалах естественные потоки парниковых газов в атмосферу в российских регионах в целом способствуют замедлению потепления. Это связано с тем, что эффект замедления роста температуры из-за поглощения наземными экосистемами СО₂ из атмосферы сильнее эффекта ускорения потепления из-за эмиссии в атмосферу СН₄. Способствующий замедлению глобального потепления эффект наземных экосистем в российских регионах растёт в первой половине XXI века, а после достижения максимума (зависящего от сценария антропогенных выбросов) уменьшается к концу века при всех рассмотренных сценариях антропогенных воздействий

в связи с ростом естественных эмиссий СН₄ и уменьшения поглощения СО₂ наземными экосистемами. Согласно полученным результатам при рассмотренных сценариях антропогенных эмиссий в климатических условиях второй половины XXI века ($T_0 > 2050$ г.) естественные эмиссии из российских регионов будут ускорять потепление климата и на коротких временных горизонтах.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 17–05–01097, 17–29–05098, 19–05–00409), работа над блоком естественных эмиссий метана проводилась в рамках проекта 17–77–10152 РНФ, сравнение антропогенных и связанных с естественными экосистемами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохов И.И. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 624–640.
2. Shine K.P., Fuglestedt J.S., Hailemariam K., Stuber N. // *Clim. Change*. 2005. V. 68. I. 3. P. 281–302.
3. Кароль И.Л., Киселёв А.А., Фролькис В.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 4. С. 451–466.
4. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.) // Cambridge/NY: Cambridge University Press. 2013. 1535 p.
5. Joos F., Roth R., Fuglestedt J.S. et al. // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. 2793–2825.
6. Reisinger A., Meinshausen M., Manning M. // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6. 024020.
7. Eliseev A.V., Mokhov I.I. // *Adv. Atmos. Sci.* 2011. V. 28. № 5. P. 1215–1232.
8. Мохов И.И., Елисеев А.В. // ДАН. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
9. Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И., Аржанов М.М. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 543–549.
10. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. // ДАН. 2011. Т. 441. № 5. С. 685–688.
11. Holmes C.D., Prather M.J., Svde O.A., Myhre G. // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 285–302.
12. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schadel C., et al. // *Nature*. 2015. V. 520. № 7546. P. 171–179.
13. Елисеев А.В. // *Фундаментал. и прикл. климатол.* 2018. Т. 1. С. 52–70.
14. Schneider von Deimling T., Grosse G., Strauss J. et al. // *Biogeosciences*. 2015. V. 12. № 11. P. 3469–3488.
15. Malakhova V.V., Eliseev A.V. // *Glob. Planet. Change*. 2017. V. 157. P. 18–25.

CONTRIBUTION OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC EMISSIONS OF CO₂ AND CH₄ TO THE ATMOSPHERE FROM THE TERRITORY OF RUSSIA TO GLOBAL CLIMATE CHANGE IN THE 21st CENTURY

S. N. Denisov¹, A. V. Eliseev^{1,2,3}, Academician of the RAS I. I. Mokhov^{1,2,4}

¹ *A.M. Obukhov Institute of atmospheric physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

³ *Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation*

⁴ *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation*

Received June 06, 2019

Obtained the estimates of the contribution of anthropogenic and natural GHG emissions into the atmosphere from the territory of Russia to global climate change under various scenarios of anthropogenic impact in the 21st century. Accounting for changes in climatic conditions can strongly influence the indicators of the impact of various greenhouse gas emissions on the climate system, especially at large time horizons. Moreover, depending on the planning horizon, the role of the natural fluxes of greenhouse gases into the atmosphere from terrestrial ecosystems may change. Currently, terrestrial ecosystems in the Russian regions affect global temperature in both directions: absorbing CO₂ from the atmosphere contributes to slowing its growth, and emitting CH₄ into the atmosphere accelerates warming. The net effect of the natural fluxes of these greenhouse gases from the Russian regions in modern conditions helps to slow down warming. This net effect is increasing in the first half of the 21st century, and after reaching a maximum (depending on the anthropogenic emission scenario) decreases by the end of the century under all the considered anthropogenic impact scenarios due to an increase in natural CH₄ emissions and a decrease in CO₂ absorption by terrestrial ecosystems.

Keywords: carbon cycle, GHG emissions, regional modeling, Northern Eurasia.