

Модельные оценки вклада в глобальные изменения климата в XXI в. естественных и антропогенных эмиссий CO₂ и CH₄ в атмосферу с территории России, Китая, Канады и США

С. Н. Денисов*, А. В. Елисеев*, **, ***,
И. И. Мохов*, **, ****

Получены модельные оценки вклада антропогенных и природных потоков парниковых газов с территории разных стран в глобальные изменения климата в XXI в. при различных сценариях антропогенных воздействий. Сделаны количественные оценки влияния учета изменений региональных климатических условий на интенсивность обмена парниковыми газами между атмосферой и естественными экосистемами на разных временных горизонтах в сопоставлении с антропогенными эмиссиями. Для России, Китая, Канады и США во второй половине XXI в. поглощение CO₂ природными экосистемами уменьшается при всех сценариях антропогенного воздействия с ослаблением соответствующего стабилизирующего климат эффекта. При этом, согласно модельным оценкам, эмиссия метана в атмосферу болотными экосистемами в анализировавшихся регионах в XXI в. значительно увеличивается. Как следствие, суммарный эффект естественных потоков парниковых газов в атмосферу для отдельных регионов может ускорять потепление.

Ключевые слова: углеродный цикл, эмиссия парниковых газов, региональное моделирование, моделирование климата, климатическая модель ИФА РАН.

DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-18-32

1. Введение

Для детального и всестороннего анализа изменений углеродного цикла в климатической системе Земли и их влияния на климат необходим адекватный учет углеродного баланса лесов, водно-болотных и других природных экосистем [1, 16, 18]. Это особенно актуально в связи с Парижским соглашением (2015 г.) Рамочной конвенции ООН об изменении климата, касающимся проблем сокращения выбросов парниковых газов и связанной с этим адаптации на национальном уровне [9, 10].

* Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук; e-mail: denisov@ifaran.ru (Денисов Сергей Николаевич).

**Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

***Казанский (Приволжский) федеральный университет.

****Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Для количественного определения относительного и абсолютного вклада в изменение климата эмиссий в атмосферу различных парниковых газов, а также выбросов из разных регионов, стран или отдельных источников можно использовать разные показатели. Они служат для оценки различных эффектов (например, физических, таких как изменение температуры или уровня моря) на разных временных горизонтах. Климатический эффект выбросов может быть оценен для конкретного момента или проинтегрирован на заданном временном интервале. Наиболее распространенные показатели основаны на оценке радиационного форсинга [8, 34], которая используется для сравнения вклада в изменение средней глобальной приповерхностной температуры атмосферы различных факторов, влияющих на радиационный баланс Земли.

В Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Киотском протоколе и Парижском соглашении для определения относительной роли антропогенных выбросов различных парниковых газов используется 100-летний потенциал глобального потепления (GWP), рассчитываемый как интегральный радиационный форсинг на 100-летнем временном горизонте. В то же время цели климатической политики обычно формулируются как некоторые заданные температурные пороги, превышения которых необходимо избежать, например предел повышения глобальной температуры, равный 2 или 1,5°C, как указано в Специальном докладе МГЭИК о глобальном потеплении на 1,5°C. Такие цели требуют знаний о чувствительности климата к единичному радиационному форсингу и, следовательно, напрямую не совместимы с метрикой, основанной на кумулятивном радиационном воздействии [35]. Наиболее часто из альтернативных метрик используется потенциал глобального изменения температуры (GTP) [33, 34]. Показатель GTP отражает изменения глобальной приповерхностной температуры атмосферы через заданный промежуток времени после импульсного выброса выбранного газа относительно изменений в результате аналогичного выброса диоксида углерода (CO₂) и, таким образом, учитывает реакцию климата наряду с радиационной эффективностью и временем существования газа в атмосфере. Такой подход значительно больше соответствует текущим целям климатических соглашений.

В данной работе представлены оценки антропогенных и естественных потоков диоксида углерода и метана (CH₄) для разных регионов Северного полушария в XXI в. при разных сценариях антропогенного воздействия и их вклада в глобальное потепление.

2. Используемая модель и численные эксперименты

Использована климатическая модель Института физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН) [11—13], относящаяся к классу глобальных климатических моделей промежуточной сложности [17, 21, 26, 40]. Особенностью модели является то, что крупномасштабная динамика атмосферы и океана (с масштабом, превышающим синоптический) описывается явно, в то время как синоптические процессы параметризованы. Последнее позволяет существенно сократить время, необходимое для проведения численных экспериментов. Модель содержит блок углеродного цикла, в том числе цикл метана, учитывающий эмиссии в ат-

мосферу и поглощение диоксида углерода и метана разными природными экосистемами [3, 4], включая болотные [7, 14]. Учитываются эмиссия в атмосферу CO_2 , связанная с природными пожарами и вырубкой лесов [23], и влияние различных сценариев землепользования [22]. Климатические модели с интерактивным блоком углеродного цикла называются моделями земной системы.

Используемая версия климатической модели ИФА РАН имеет пространственное разрешение $4,5^\circ$ по широте и 6° по долготе и шаг интегрирования 5 сут. Природные потоки CO_2 между атмосферой и наземными пулами параметризованы на основе рассчитываемых в модели температуры и влажности с учетом динамики запасов углерода в растительности и почве. Остальные необходимые параметры или заданы постоянными, или изменяются сценарно. Эмиссии метана из влажных экосистем интерактивно рассчитываются в модели и зависят от температуры и содержания углерода в почве. Доли площади модельных ячеек, занятые болотами, задаются по постоянной во времени маске. Другие эмиссии метана естественного происхождения сравнительно малы и задаются постоянными значениями.

Атмосферный блок климатической модели ИФА РАН не предполагает схемы фотохимических превращений компонентов. Глобальные концентрации CO_2 и CH_4 в нем определяются балансовыми уравнениями с шагом по времени 1 год. При этом баланс CO_2 определяется суммарными за год потоками между атмосферой и наземными пулами, антропогенными эмиссиями, а также обменом с океаном в зависимости от средней глобальной температуры его поверхности. Содержание CH_4 в атмосфере определяется суммарными природными и антропогенными эмиссиями и характерным временем существования молекулы метана. Более 90% метана, содержащегося в тропосфере, удаляется в результате химических реакций (главным образом окислением радикалом OH). В работе [5] проведены численные расчеты с климатической моделью ИФА РАН при разных зависимостях времени нахождения метана в атмосфере от температуры. Время существования метана, связанное с OH , параметризовалось на основе коэффициентов чувствительности к температуре воздуха, содержанию CH_4 в атмосфере, эмиссий от пожаров и сценариев антропогенных эмиссий CO , NO_x и летучих органических соединений (VOC) [25]:

$$\tau_{\text{OH}}(t) = \tau_0 \left(1 + \sum_i s_i \frac{F_i(t) - F_{0,i}}{F_{0,i}} \right), \quad (1)$$

где $\tau_0 = 11,2$ года; s_i — коэффициенты чувствительности (см. табл. 1); F_i — значения соответствующих параметров ($F_{0,i}$ — их значения в 2000 г.).

С использованием климатической модели ИФА РАН проведены численные расчеты для периода 1850—2100 гг. при разных сценариях антропогенных воздействий с изменением содержания парниковых газов в атмосфере, тропосферных и стратосферных вулканических сульфатных аэрозолей, суммарной солнечной радиации и площади сельскохозяйственных земель. Для периода 1850—2005 гг. эти воздействия задавались в соответствии с протоколом “Historical simulations” международного проекта CMIP5 (<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>). Для периода 2006—2100 гг. антропогенные воздействия задавались в соответствии со сценариями антропогенных воздействий RCP 2.6, 4.5, 6.0 и 8.5 [2, 4].

Таблица 1

Коэффициенты чувствительности для уравнения (1) [24]

i	Параметр	s_i
Химико-климатические эффекты		
1	Глобальная температура	–3,00
2	Эмиссии от пожаров	0,02
3	Содержание CH_4	0,31
Антропогенные эмиссии		
4	NO_x	–0,14
5	CO	0,06
6	VOC	0,04

Кумулятивное влияние антропогенных и природных потоков CO_2 и CH_4 на изменение приповерхностной температуры с 1990 г. оценивалось с помощью кумулятивного температурного потенциала CT на основе GTP, который был модифицирован для учета изменяющихся фоновых условий.

3. Кумулятивный температурный потенциал

Глобальный температурный потенциал газа x — это отношение его абсолютного потенциала к абсолютному потенциалу CO_2 :

$$\text{GTP}_x(H) = \frac{P_x^{(a)}}{P_{\text{CO}_2}^{(a)}}, \quad (2)$$

где абсолютный потенциал изменения глобальной температуры $P^{(a)}$ — это изменение средней глобальной температуры поверхности в момент времени $t = H$ в ответ на импульсный выброс 1 кг газа x в момент времени $t = 0$. Он обычно записывается как свертка радиационного форсинга с ядром климатического отклика R_T :

$$P_x^{(a)}(H) = \int_0^H RF_x(t) R_T(H-t) dt, \quad (3)$$

где RF_x — радиационный форсинг, обусловленный импульсным выбросом газа x ; R_T — смещенный во времени (до рассматриваемого временного горизонта) климатический отклик.

Выражение для расчета $RF_x(t)$ можно записать как произведение радиационной эффективности газа x (A_x) и функции импульсного отклика его концентрации на выброс в момент времени $t = 0$ ($IRF_x(t)$). Следует отметить, что и A_x , и IRF_x , и, следовательно, $P^{(a)}$ определяются для импульсного выброса газа при постоянных фоновых условиях, в то время как необходима оценка воздействия сценариев выбросов при изменяющихся условиях в XXI в.

Для изменяющихся фоновых условий потенциал $P^{(a)}$ может быть переписан как сумма интегралов для каждого года:

$$P_x^{(a)*}(T_0, T_H) = \sum_{k=1}^k \int_{T_0-1}^{T_H-k} RF_{x,k}(t) R_T(T_H - T_0 - t) dt, \quad (4)$$

где T_0 — год выброса; $T_H = T_0 + H$. Величина $RF_{x,k}$ может быть рассчитана в предположении, что все необходимые параметры постоянны для каждого конкретного года k , но могут изменяться от года к году.

Для непрерывных выбросов, начавшихся в момент времени T_0 , суммарный эффект от источника газа x , заданного сценарием эмиссий $E_x(t)$, в момент времени T_H может быть записан как кумулятивный температурный потенциал:

$$CT_x(T_0, T_H) = \int_{T_0}^{T_H} E_x(t) P_x^{(a)*}(t, T_H) dt. \quad (5)$$

На рис. 1а представлены значения абсолютных потенциалов $P^{(a)}$ и $P^{(a)*}$ диоксида углерода для временного интервала с 1990 г. по год T_H (далее обозначается как $[1990; T_H]$), полученные в результате модельных экспериментов с климатической моделью ИФА РАН. Как упоминалось выше, RF для $P^{(a)}$ рассчитывается в предположении, что фоновые условия в момент времени T_0 остаются неизменными на протяжении всего интервала $[T_0; T_H]$, тогда как для $P^{(a)*}$ учитываются изменения RF в результате изменения фоновых условий. Поэтому для временных интервалов, превышающих

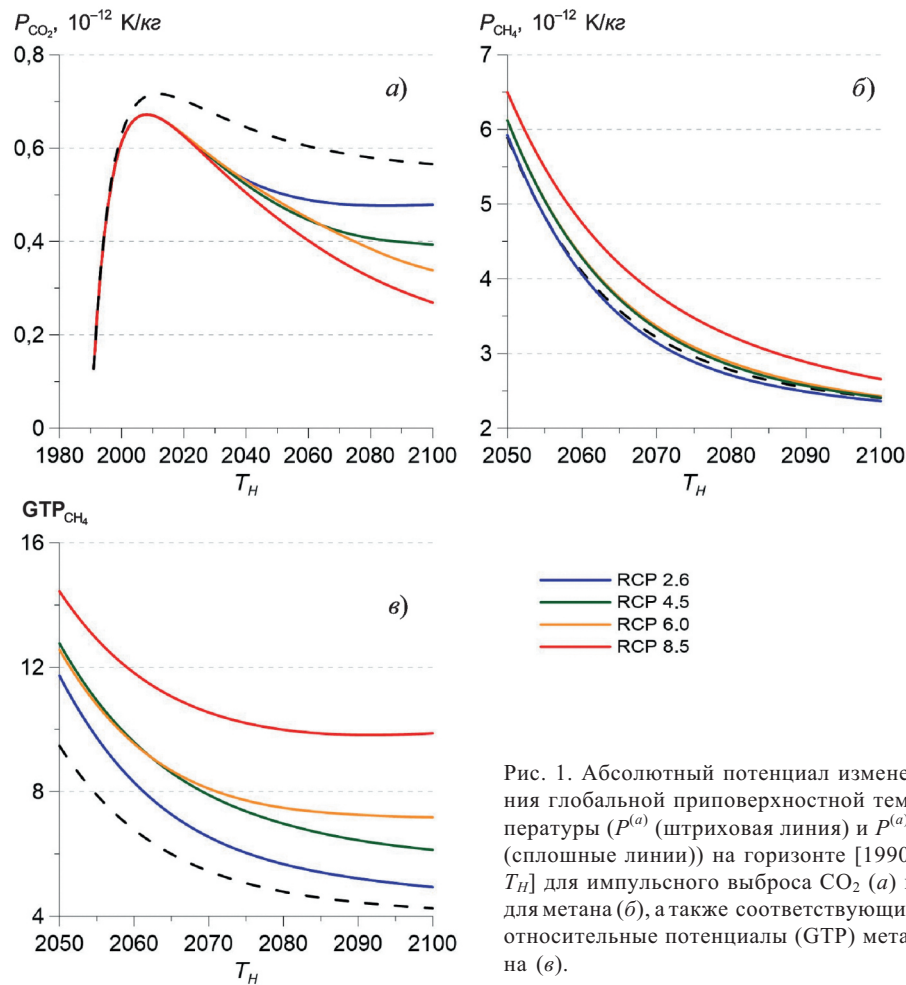


Рис. 1. Абсолютный потенциал изменения глобальной приповерхностной температуры ($P^{(a)}$ (штриховая линия) и $P^{(a)*}$ (сплошные линии)) на горизонте $[1990; T_H]$ для импульсного выброса CO₂ (а) и для метана (б), а также соответствующие относительные потенциалы (GTP) метана (в).

10—15 лет, $P^{(a)*}$ и $P^{(a)}$ могут значительно различаться. Для наиболее агрессивного антропогенного сценария RCP 8.5 (с наиболее сильным изменением фоновых условий) $P^{(a)}$ более чем в 2 раза больше, чем $P^{(a)*}$ для диоксида углерода, выброшенного в 1990 г., на 100-летнем временном горизонте.

Потенциалы $P^{(a)}$ и $P^{(a)*}$ для метана, рассчитанные на интервале [1990; T_H] (рис. 1б), различаются значительно меньше для всех рассмотренных сценариев. Для RCP 8.5 максимальное расхождение достигает 20% при временном горизонте около 80 лет, для других сценариев оно не превышает 6%. Тем не менее если вместо $P^{(a)}$ при расчете относительного потенциала изменения глобальной температуры (GTP) метана использовать $P^{(a)*}$ (рис. 1в), то его значения для больших временных интервалов могут быть в 2—2,5 раза больше. Так, GTP эмитированного в 1990 г. метана на 100-летнем временном интервале, рассчитанный с использованием $P^{(a)}$, равен 4,1 (что соответствует Пятому оценочному докладу МГЭИК), а с учетом изменений фоновых условий он может составлять 5—10 в зависимости от сценария антропогенного воздействия (рис. 1в).

На рис. 2а показаны значения абсолютных потенциалов $P^{(a)}$ и $P^{(a)*}$ для CO_2 на 20-летнем интервале. Абсолютный потенциал CO_2 при всех сценариях, кроме RCP 2.6, снижается на протяжении XXI в., а при наиболее агрессивном сценарии RCP 8.5 его значение уменьшается более чем вдвое. Это связано с увеличением концентрации диоксида углерода в атмосфере. При сценарии RCP 2.6 во второй половине XXI в. концентрация CO_2 в атмосфере начинает уменьшаться, поэтому снижение потенциала переходит в его рост. Хотя рассматривается относительно короткий 20-летний период после выброса, учет изменений в фоновых условиях влияет на изменение потенциала на величину до 15%.

Значения $P^{(a)}$ и $P^{(a)*}$ для выбросов метана на 20-летнем интервале изменяются похожим образом (рис. 2б). В этом случае медленное уменьшение потенциалов сменяется ростом уже в первой половине XXI в. для сценария RCP 2.6 и во второй половине века для RCP 4.5 и 6.0. Учет изменения фоновых условий за 20-летний период вносит меньший вклад в потенциал метана, не превышающий 3%.

Более быстрое уменьшение абсолютных потенциалов $P^{(a)}$ и $P^{(a)*}$ диоксида углерода приводит к увеличению значения относительного потенциала GTP метана на 20-летнем интервале в XXI в. Без учета изменения фоновых условий он возрастает с 70 до 92—108, а с их учетом — с 73 до 91—119. В целом можно сказать, что значения рассматриваемых потенциалов оказываются смещены во времени примерно на половину анализируемого временного интервала (7—13 лет в зависимости от потенциала и сценария антропогенного воздействия), если пренебречь изменяющимися фоновыми условиями.

4. Результаты

4.1. Естественные и антропогенные потоки CO_2 и CH_4

Антропогенные выбросы для России рассчитывались с использованием сценариев семейства RCP для региона REF (страны Восточной Европы и бывшего СССР, <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>) с соответствующими

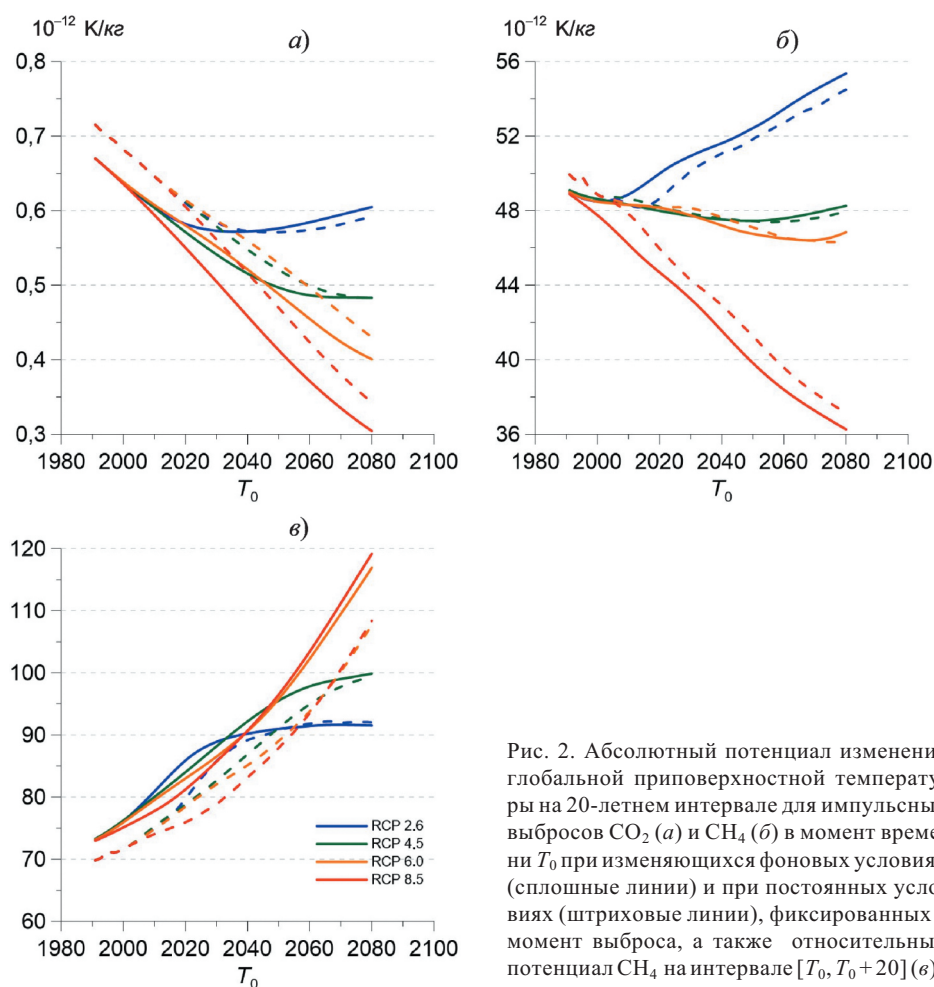


Рис. 2. Абсолютный потенциал изменения глобальной приповерхностной температуры на 20-летнем интервале для импульсных выбросов CO₂ (а) и CH₄ (б) в момент времени T_0 при изменяющихся фоновых условиях (сплошные линии) и при постоянных условиях (штриховые линии), фиксированных в момент выброса, а также относительный потенциал CH₄ на интервале $[T_0, T_0 + 20]$ (в).

щим масштабированием выбросов с территории России в момент перехода от сценария “Historical simulations” к сценариям RCP (2000 г. для метана и 2005 г. для диоксида углерода). Антропогенные выбросы с территории Китая и Северной Америки рассчитывались аналогично в соответствии со сценариями RCP для регионов ASIA и OECD соответственно. Следует отметить, что, по имеющимся данным (<https://databank.worldbank.org/data/source/world-development-indicators>), антропогенные выбросы CH₄ с территории России в начале XXI в. близки к наиболее агрессивному антропогенному сценарию RCP 8.5.

Полученные оценки современных природных потоков CO₂ для России (рис. 3б) находятся в хорошем согласии с оценками [20] для процессных моделей (см. табл. 2) и оценками работы [39]. Поглощение CO₂ наземными экосистемами при всех использовавшихся сценариях увеличивается в начале XXI в. Далее при всех рассмотренных сценариях достигается максимум поглощения, который составляет около 0,4—0,6 Пг C/год , после чего оно начинает уменьшаться; причем чем агрессивнее сценарий антропогенных воздействий, тем позже это происходит.

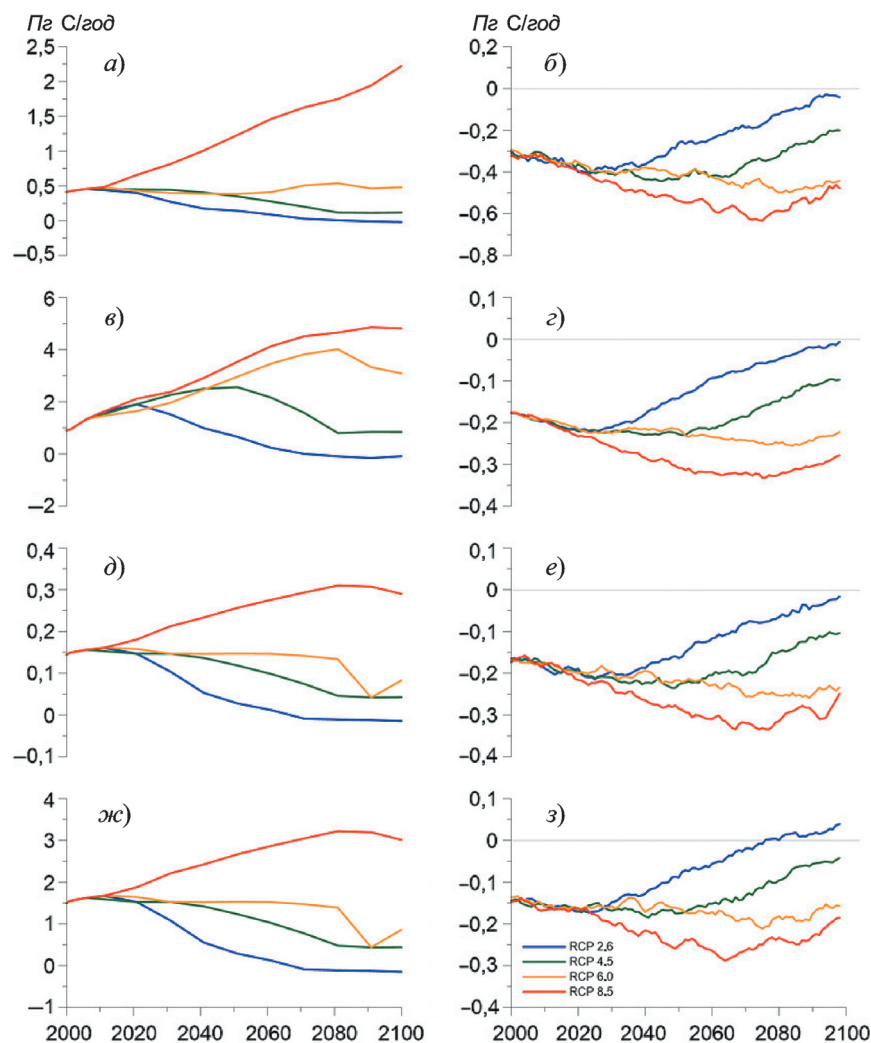


Рис. 3. Антропогенные (а, в, д, ж) и естественные (б, г, е, з) потоки CO₂ с территории России (а, б), Китая (в, г), Канады (д, е) и США (ж, з).

Естественные выбросы метана с территории России (рис. 4б), по модельным оценкам, увеличиваются к концу XXI в. на 10—200% в зависимости от сценария антропогенных воздействий. При всех сценариях, кроме RCP 8.5, во второй половине XXI в. их величина достигает значений антропогенных выбросов метана с территории России (рис. 4а).

Полученные оценки современных природных потоков CO₂ для Китая в целом согласуются с оценками [29, 37]. Поток CO₂ из наземных экосистем Китая в атмосферу изменяется в XXI в. аналогично потокам с территории России (и всех других рассмотренных регионов) (рис. 3). Максимум поглощения в XXI в. составляет 0,2—0,35 Пг C/год. Следует отметить, что для Китая значения естественных потоков парниковых газов в целом по

Таблица 2

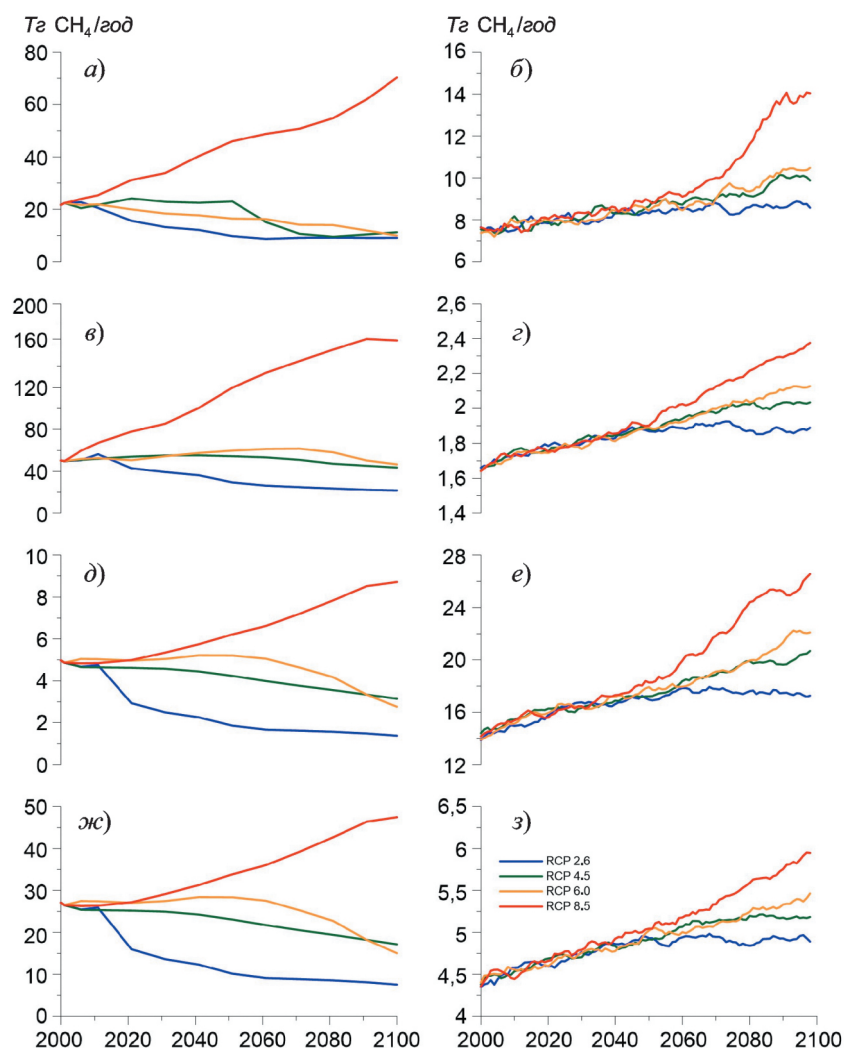
Природные потоки CO₂ в начале XXI в.

Данные	Потоки CO ₂ , Пг С/год			
	Россия	Канада	США	Китай
Модель ИФА РАН*	–0,31	–0,17	–0,14	–0,18
[36]		–0,15	–0,34	
[24]**		–0,24/–0,12/–0,04	–0,69/–0,36/–0,3	
[39]***	–0,32	–0,32		
[29]**				–0,35/–0,17/–0,18
[28]			–0,3...–0,58	
[20]****	–0,65/–0,56/–0,76/–0,2			
[37]				–0,26
[38]			–0,64	
Примечание. *Данная работа, среднее за 1995—2005 гг.; **инверсные модели/процессные модели/инвентаризационные оценки; ***только арктическая тундра, 1990—2100 гг.; оценка –0,32 — суммарная для России и Канады (т. е. для всей арктической тундры); ****инверсные модели/метод вихревых пульсаций/инвентаризационные оценки/процессные модели.				

расчетам составляют 5—20% соответствующих антропогенных выбросов, поэтому вклад Китая в глобальное изменение температуры определяется антропогенным воздействием.

Природные эмиссии метана с территории Китая (рис. 4з), по расчетам, в XXI в. будут увеличиваться медленнее, чем в России. Только при самом агрессивном антропогенном сценарии увеличение превышает 50% к концу столетия.

Поглощение CO₂ наземными экосистемами Северной Америки составляет около 0,3 Пг С/год в начале XXI в., увеличивается в течение столетия до значений 0,4—0,6 Пг С/год в зависимости от антропогенного сценария, а затем начинает снижаться (рис. 3д—з). Полученные оценки современных естественных потоков CO₂ хорошо согласуются с данными [24, 36] для территории Канады. В то же время поглощение CO₂ наземными экосистемами США несколько недооценено как по сравнению с теми же данными, так и с данными работ [28, 38]. Естественные выбросы метана с территории Северной Америки, согласно расчетам, в XXI в. примерно в 2 раза превышают выбросы с территории России, но увеличиваются несколько медленнее (на 20—100% в зависимости от сценария). Тем не менее они начинают превышать соответствующие антропогенные выбросы по всем сценариям, кроме RCP 8.5, во второй половине XXI в. Следует отметить, что основным источником антропогенных выбросов парниковых газов Северной Америки является территория США, при этом вклад наземных экосистем США и Канады в поглощение CO₂ близок друг к другу, а основным источником природных эмиссий CH₄ является территория Канады (рис. 4д—з).

Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для потоков CH_4 .

4.2. Кумулятивный температурный потенциал и его изменения

На рис. 5 представлены результаты расчетов кумулятивного потенциала CT на интервале $[1990; T_H]$ отдельно для выбросов диоксида углерода и метана в России, Китае, Канаде и США с горизонтом T_H , соответствующим 2030, 2060 и 2090 гг. Нужно отметить, что антропогенный кумулятивный потенциал (табл. 3) уменьшается во второй половине XXI в. при сценарии RCP 2.6 (антропогенный потенциал России также уменьшается при RCP 4.5) и увеличивается при сценариях более интенсивного антропогенного воздействия. Снижение антропогенного потенциала России происходит в основном из-за уменьшения антропогенных выбросов метана, в то время как для других регионов вклад снижения выбросов метана и CO_2

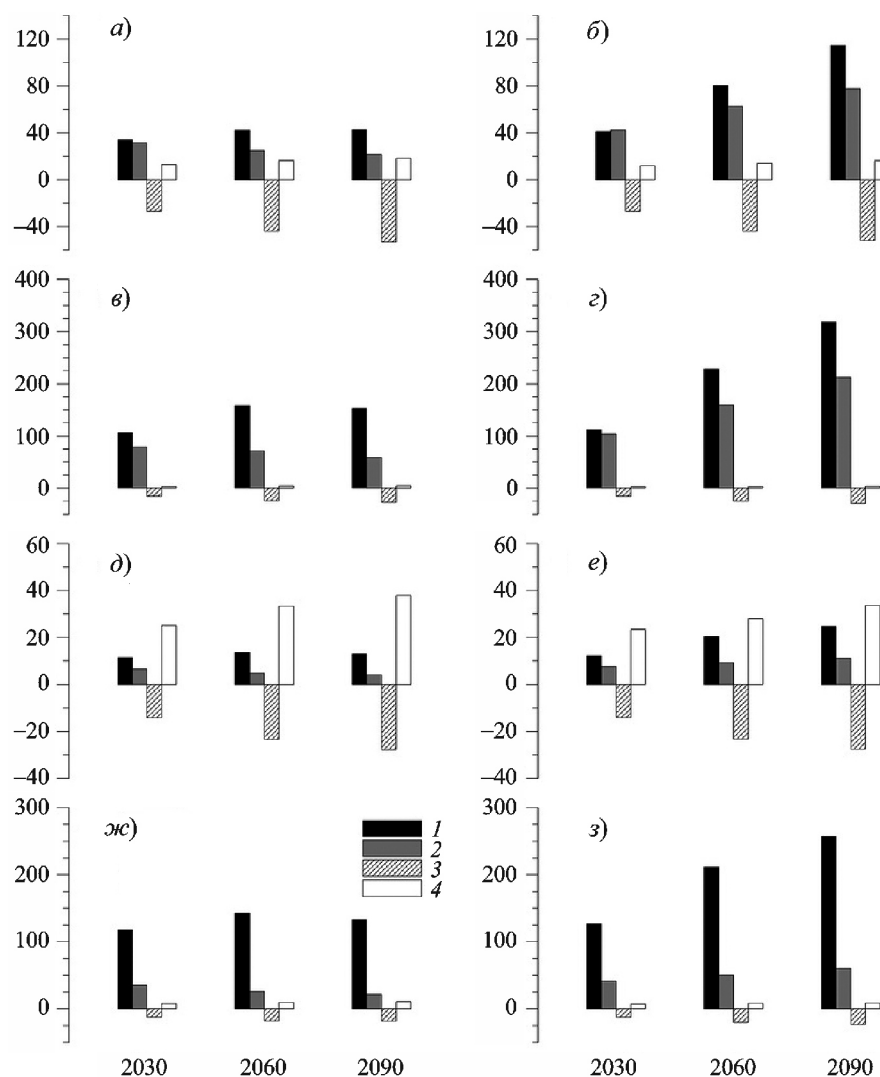


Рис. 5. Кумулятивный потенциал (мК) антропогенных (1, 2) и природных (3, 4) потоков CO_2 (1, 3) и CH_4 (2, 4) для временных интервалов [1990; 2030], [1990; 2060] и [1990; 2090] с территории России (а, б), Китая (в, з), Канады (д, е) и США (ж, з) для сценариев RCP 2.6 (а, в, д, ж) и RCP 8.5 (б, з, е, з).

сопоставим. Для антропогенных выбросов CO_2 с территории Китая можно четко проследить эффект учета изменения фоновых условий: хотя на протяжении всего XXI в. по сценарию RCP 8.5 выбросы CO_2 больше, чем по RCP 6.0 (рисунок не приведен), из-за более высокой глобальной концентрации CO_2 в атмосфере (и, соответственно, из-за более низкого форсинга) их общее воздействие на климат к концу века слабее. Таким образом, согласно оценкам, полученным при рассмотренных сценариях, только сценарий RCP 2.6 приводит к стабилизации антропогенного воздействия на глобальную атмосферную температуру в XXI в. В то же время стабилизи-

Таблица 3

**Антропогенный и природный кумулятивный потенциал (мК)
на интервале [1990, T_H]**

Страна	T_H	RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
		E_a	E_n	CT	E_a	E_n	CT	E_a	E_n	CT	E_a	E_n	CT
Россия	2030	65	-14	51	73	-14	59	70	-14	56	83	-15	68
	2050	68	-24	44	88	-25	63	81	-24	57	123	-26	97
	2075	65	-32	33	87	-35	52	87	-33	54	169	-35	134
	2100	64	-35	29	80	-41	39	91	-38	53	208	-34	174
Китай	2030	185	-13	172	192	-13	179	185	-13	172	215	-13	202
	2050	226	-19	207	283	-19	264	276	-19	257	329	-20	309
	2075	222	-22	200	356	-25	331	395	-24	371	466	-25	441
	2100	205	-23	182	373	-28	345	472	-27	445	565	-26	539
Канада	2030	18	11	29	19	11	30	20	11	31	20	9	29
	2050	19	10	29	23	9	32	25	9	34	27	6	33
	2075	18	10	28	25	6	31	29	7	36	33	4	37
	2100	16	11	27	26	7	33	27	8	35	37	8	45
США	2030	153	-5	148	160	-5	155	167	-5	162	168	-6	162
	2050	170	-8	162	203	-9	192	218	-9	209	235	-10	225
	2075	162	-9	153	225	-12	213	250	-12	238	293	-14	279
	2100	150	-7	143	230	-13	217	244	-14	230	330	-15	315

Примечание. E_a — антропогенная эмиссия; E_n — природная эмиссия.

рующий вклад естественных потоков парниковых газов из наземных экосистем в XXI в. увеличивается для России, Китая и США при всех рассмотренных сценариях и мало изменяется для Канады.

Для России природные потоки парниковых газов вносят значительный вклад в суммарные изменения глобальной приповерхностной температуры. При этом их стабилизирующее влияние на климат превышает суммарное стабилизирующее природное воздействие других регионов. Для Китая и США природные выбросы незначительны по сравнению с антропогенными. Для США антропогенные выбросы CO_2 , по расчетам, являются доминирующим фактором влияния на климат, по сравнению с которым воздействие других потоков парниковых газов незначительно. Для Канады основными факторами воздействия на климат, согласно оценкам, являются природные потоки CH_4 и CO_2 , которые сопоставимы по величине, но противоположны по направлению, а антропогенные потоки парниковых газов менее значимы.

В целом суммарный вклад антропогенных и природных потоков CO_2 и CH_4 в изменения глобальной приповерхностной температуры с 1990 г. до конца XXI в. в зависимости от сценария антропогенных воздействий составляет 0,03—0,17 К для России, 0,18—0,54 К для Китая, 0,03—0,04 К для Канады и 0,14—0,32 К для США. При этом для России суммарный климатический эффект рассмотренных потоков парниковых газов к концу XXI в. прекращает расти при всех сценариях, кроме RCP 8.5, для Китая — только при сценарии RCP 2.6, для стран Северной Америки — при RCP 2.6 и 6.0.

5. Заключение

Согласно полученным результатам, учет в модели изменений климатических условий сильно влияет на соотношение природных источников и стоков парниковых газов и на их воздействие на климатическую систему, особенно на больших временных горизонтах при наиболее агрессивных сценариях антропогенных воздействий. Получены количественные модельные оценки вклада антропогенных и природных потоков парниковых газов с территории России, Китая, Канады и США в глобальные изменения климата в XXI в. при разных сценариях антропогенных воздействий. Для регионов Евразии и Северной Америки по модельным расчетам отмечено уменьшение поглощения CO_2 природными экосистемами во второй половине XXI в. с ослаблением соответствующего стабилизирующего климат эффекта при анализировавшихся сценариях антропогенных воздействий. При этом, согласно модельным оценкам, эмиссия метана в атмосферу болотными экосистемами в XXI в. значительно увеличивается.

Следует отметить, что в оценках авторов не учтены некоторые процессы: высвобождение метана и диоксида азота в результате природных пожаров [30]; высвобождение CO_2 и CH_4 при оттаивании вечной мерзлоты в результате потепления климата [32]; высвобождение CH_4 и N_2O из внутренних водоемов [15, 19]; высвобождение N_2O из наземных экосистем [36]. Согласно оценкам, вследствие природных пожаров в атмосферу, наряду с аэрозольными частицами, диоксидом углерода и угарным газом, глобально выбрасывается $15 \pm 3 \text{ Tg}$ метана и $0,9 \pm 3 \text{ Tg}$ диоксида азота в год, при этом вклад российских регионов составляет $\sim 10\%$ [6]. Эти значения сравнительно малы (см. рис. 3), однако при их учете отдельные регионы могут стать источником парниковых газов, перестав быть их стоком. Велика неопределенность оценок высвобождения парниковых газов из внутренних водоемов [19], что может быть существенно при определении того, в какой степени конкретные регионы являются стоком или источником парниковых газов.

Полученные количественные оценки можно уточнить учетом эффекта высвобождения CO_2 и CH_4 из почвы в атмосферу при оттаивании мерзлотных почв субполярных широт, из которых “старый” (образовавшийся в последние межледниковья, не разложившийся из-за холодных условий) углеродный субстрат при сценарии RCP 8.5 в XXI в. может высвобождать до 174 Pg C в виде CO_2 и CH_4 согласно данным работы [32] и до 240 Pg C в виде диоксида углерода и 5300 Tg в виде метана согласно данным [16]. Кроме того, образование термокарстовых озер во время оттаивания вечной мерзлоты в наземных регионах способствует развитию озерных таликов, что также вносит вклад в выброс этих парниковых газов в атмосферу — по имеющимся оценкам, в XXI в. по сценариям RCP это может привести к выбросу в атмосферу до 50 Tg CH_4 с наибольшим вкладом в первой половине века [31]. Следует также иметь в виду, что реакция характеристик наземного углеродного и метанового циклов на климатические изменения зависит от взаимодействия с азотным циклом [27, 32].

При принятии стратегических решений в связи с изменениями климата следует учитывать, что роль естественных потоков парниковых газов в атмосферу из наземных экосистем изменяется в зависимости от временного горизонта планирования. Согласно полученным модельным результатам, при изменении климата меняются оценки вклада разных парниковых газов

в изменения температуры и их соотношение. Например, при сценарии RCP 2.6 в климатических условиях второй половины XXI в. ($T_0 > 2050$) естественные потоки парниковых газов в рассматриваемых регионах суммарно будут ускорять потепление климата.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00240). Особенности природных потоков парниковых газов для разных временных горизонтов оценивались в рамках проекта № 21-17-00012 Российского научного фонда.

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М., Росгидромет, 2014, 1008 с.
2. Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI в. — Доклады АН, 2019, т. 488, № 1, с. 74—80.
3. Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И. Изменения климата в глобальной модели ИФА РАН с учетом взаимодействия с метановым циклом при антропогенных сценариях семейства RCP. — Метеорология и гидрология, 2013, № 11, с. 30—42.
4. Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И., Аржанов М. М. Модельные оценки глобальных и региональных эмиссий метана влажными экосистемами. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, т. 51, № 5, с. 543—549.
5. Дзюба А. В., Елисеев А. В., Мохов И. И. Оценка изменений скорости стока метана из атмосферы при потеплении климата. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, т. 48, № 3, с. 372—382.
6. Елисеев А. В., Васильева А. В. Природные пожары: данные наблюдений и моделирование. — Фундаментальная и прикладная климатология, 2020, т. 3, с. 73—119.
7. Елисеев А. В., Мохов И. И., Аржанов М. М. и др. Учет взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2008, т. 44, № 2, с. 147—162.
8. Кароль И. Л., Киселев А. А., Фролькис В. А. Индексы факторов, формирующих разномасштабные изменения климата. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2011, т. 47, № 4, с. 451—466.
9. Мохов И. И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. — Вестник РАН, 2022, т. 92, № 1, с. 3—14.
10. Мохов И. И. Российские климатические исследования в 2015—2018 гг. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2020, т. 56, № 4, с. 1—21.
11. Мохов И. И., Демченко П. Ф., Елисеев А. В. и др. Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX—XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2002, т. 38, № 5, с. 629—642.
12. Мохов И. И., Елисеев А. В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX—XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP. — Доклады АН, 2012, т. 443, № 6, с. 732—736.
13. Мохов И. И., Елисеев А. В., Демченко П. Ф. и др. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН. — Доклады АН, 2005, т. 402, № 2, с. 243—247.
14. Мохов И. И., Елисеев А. В., Денисов С. Н. Модельная диагностика изменений эмиссии метана болотными экосистемами во второй половине XX века с использованием данных реанализа. — Доклады АН, 2007, т. 417, № 2, с. 258—262.
15. Степаненко В. М., Мачульская Е. Е., Глаголев М. В., Лыкосов В. Н. Моделирование эмиссии метана из озер зоны вечной мерзлоты. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2011, т. 47, № 2, с. 275—288.
16. Canadell J. G., Monteiro P. M. S., Costa M. H., et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. /In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.). — Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2021, pp. 673—816.
17. Claussen M., Mysak L. A., Weaver A. J., et al. Earth system models of intermediate complexity: Closing the gap in the spectrum of climate system models. — Climate Dynamics, 2002, vol. 18, pp. 579—586.
18. 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, New York, Cambridge University Press, 2013, 1535 p.

19. Deemer B. R., Harrison J. A., Li S., et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. — *BioScience*, 2016, vol. 66, No. 11, pp. 949—964.
20. Dolman A. J., Shvidenko A., Schepaschenko D., et al. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods. — *Biogeosci.*, 2012, vol. 9, pp. 5323—5340.
21. Eby M., Weaver A. J., Alexander K., et al. Historical and idealized climate model experiments: An EMIC intercomparison. — *Climate Past*, 2013, vol. 9, No. 3, pp. 1111—1140.
22. Eliseev A. V. and Mokhov I. I. Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios. — *Adv. Atmos. Sci.*, 2011, vol. 28, No. 5, pp. 1215—1232.
23. Eliseev A. V., Mokhov I. I., and Chernokulsky A. V. An ensemble approach to simulate CO₂ emissions from natural fires. — *Biogeosci.*, 2014, vol. 11, No. 12, pp. 3205—3223.
24. Hayes D. J., Turner D. P., Stinson G., et al. Reconciling estimates of the contemporary North American carbon balance among terrestrial biosphere models, atmospheric inversions, and a new approach for estimating net ecosystem exchange from inventory-based data. — *Glob. Change Biol.*, 2012, vol. 18, No. 4, pp. 1282—1299.
25. Holmes C. D., Prather M. J., Sovde O. A., and Myhre G. Future methane, hydroxyl, and their uncertainties: Key climate and emission parameters for future predictions. — *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, vol. 13, pp. 285—302.
26. MacDougall A. H., Frolicher T. L., Jones C. D., et al. Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the zero emissions commitment from CO₂. — *Biogeosci.*, 2020, vol. 17, No. 11, pp. 2987—3016.
27. Myhre G., Shindell D., Breon F.-M., et al. Anthropogenic and natural radiative forcing. /In: *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. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. Midgley (eds.). — Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013.
28. Pacala S. W., Hurtt G. C., Baker D., et al. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. — *Science*, 2001, vol. 292, No. 5525, pp. 2316—2320.
29. Piao S., Fang J., Ciais P., et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. — *Nature*, 2009, vol. 458, pp. 1009—1013.
30. Saunio M., Stavert A. R., Poulter B., et al. The global methane budget 2000—2017. — *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, vol. 12, No. 3, pp. 1561—1623.
31. Schneider von Deimling T., Grosse G., Strauss J., et al. Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. — *Biogeosci.*, 2015, vol. 12, No. 11, pp. 3469—3488.
32. Schuur E. A. G., McGuire A. D., Schadel C., et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. — *Nature*, 2015, vol. 520, No. 7546, pp. 171—179.
33. Shine K. P., Berntsen T. K., Fuglestad J. S., et al. Comparing the climate effect of emissions of short- and long-lived climate agents. — *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 2007, vol. 365, pp. 1903—1914.
34. Shine K. P., Fuglestad J. S., Hailemariam K., and Stuber N. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. — *Climate Change*, 2005, vol. 68, No. 3, pp. 281—302.
35. Smith S. M., Lowe J. A., Bowerman N. H. A., et al. Equivalence of greenhouse-gas emissions for peak temperature limits. — *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2, pp. 535—538.
36. Tian H., Chen G., Lu C., et al. Global methane and nitrous oxide emissions from terrestrial ecosystems due to multiple environmental changes. — *Ecosyst. Health Sustain*, 2015, vol. 1, pp. 1—20.
37. Tian H., Xu X., Lu C., et al. Net exchanges of CO₂, CH₄, and N₂O between China's terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming. — *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2011, vol. 116, G02011.
38. Xiao J., Zhuang Q., Law B. E., et al. Assessing net ecosystem carbon exchange of US terrestrial ecosystems by integrating eddy covariance flux measurements and satellite observations. — *Agr. Forest Meteorol.*, 2011, vol. 151, No. 1, pp. 60—69.
39. Zhang W., Jansson C., Miller P. A., et al. Biogeophysical feedbacks enhance the Arctic terrestrial carbon sink in regional Earth system dynamics. — *Biogeosci.*, 2014, vol. 11, pp. 5503—5519.
40. Zickfeld K., Eby M., Weaver A. J., et al. Long-term climate change commitment and reversibility: An EMIC intercomparison. — *J. Climate*, 2013, vol. 26, No. 16, pp. 5782—5809.