

СОСТОЯНИЕ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ИХ АССИМИЛЯЦИЯ В ПРИРОДЕ. ОБЗОР

А.Н. Иванкин

Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
aivankin@mgul.ac.ru

Представлен краткий обзор состояния и влияния парниковых газов, прежде всего диоксида углерода CO₂ на возможные климатические изменения. Отмечено, что основными парниковыми газами являются водяной пар, количество которого в общей массе может составлять от 36 до 72 %, а также диоксид углерода, который содержится в воздушной массе в количестве 9...26 %, метан — 4...9 %, озон — 3...7 %. Описаны основные источники формирования повышенной концентрации в атмосферном воздухе диоксида углерода вследствие антропогенного воздействия на окружающую среду промышленного производства и значимых природных факторов, таких как последствия вулканической деятельности. Рассмотрены изменения содержания парниковых газов в атмосфере в историческом аспекте. Показан определенный вклад отдельных экономик в общий объем выбросов парниковых газов на планете и отмечено, что в годовом выражении количество образующегося диоксида углерода вследствие человеческой деятельности может достигать 35...40 млрд т. Приведены данные о стабильном превышении концентрации CO₂ уровня 400 ppm, что является, по-видимому, самым высоким за всю историю наблюдений. Перечислены основные источники образования парниковых газов — промышленность, транспортная сеть и вулканическая деятельность. Дана оценка вклада вулканов в рост количества CO₂ в атмосфере, которое может составлять 60...250 млн т CO₂ в год, а в некоторых случаях достигать 0,5 млрд т. Показано потенциальное влияние наиболее существенных факторов поглощения избыточного содержания CO₂ — мирового океана и лесных массивов на возможность удаления парниковых газов из атмосферы. Рассмотрено предположение о поглощении мировым океаном до 2,6 млрд т CO₂ в год, причем считается, что его поглотительная способность намного выше. Охарактеризована защитная роль лесов и растительного покрова в целом для связывания диоксида углерода. Оценен вклад отдельных государств в необходимый отрицательный баланс углерода, показавший необоснованность претензий к Российской Федерации по данному вопросу. Представлен некоторый прогноз перспектив климатических изменений с позиций географических и экономических факторов.

Ключевые слова: парниковые газы, диоксид углерода, метан, озон, вулканы, объемы выбросов, промышленность, защитная функция океана и лесов

Ссылка для цитирования: Иванкин А.Н. Состояние парниковых газов и их ассимиляция в природе. Обзор // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 6. С. 132–140. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-132-140

Наблюдаемые в последнее время заметные изменения климата на Земле представляют собой фундаментальный фактор существования человеческой цивилизации. Считается, что они связаны с масштабной промышленной деятельностью, приводящей к значительному росту содержания в атмосфере парниковых газов, повышение концентрации которых в атмосферном воздухе влияет на способность атмосферы отражать УФ-излучение солнца. Это в свою очередь ведет к повышению общей средней температуры воздуха, что способствует ускорению таяния полярных и высокогорных ледников и возможному повышению уровня Мирового океана. Кроме того, на этот процесс большое влияние оказывает диоксид углерода, содержащийся в атмосфере Земли [1, 2].

Изменение климата — это наблюдаемые и прогнозируемые долгосрочные трансформации средних климатических показателей, к которым можно отнести такие аномалии, как засухи, силь-

ные штормы и масштабные наводнения. Предполагается, что годовое количество осадков в некоторых регионах в долгосрочной перспективе будет снижаться. Это совместно с колебаниями температуры воздуха и количеством дождей будет заметно отражаться на продолжительности и условиях вегетационного периода растений. Существенное варьирование интервалов осадков является основной причиной усиления засух и наводнений, возрастания интенсивности сильных штормов и ураганов. Последствия таких процессов опасны для дальнейшей жизнедеятельности человека, поэтому предупреждение их последствий становится первоочередной задачей устойчивого развития [3, 4].

Самый обсуждаемый парниковый газ — диоксид углерода CO₂

Значение диоксида углерода в биосфере, прежде всего, заключается в поддержании процесса фотосинтеза растений. Являясь парниковым газом, диоксид углерода, находящийся в воздухе,

влияет на теплообмен между земной поверхностью и окружающим пространством, блокируя излучаемое ею тепло, таким образом участвуя в формировании климата [5].

Диоксид углерода является компонентом с достаточно низкой концентрацией в современной земной атмосфере. Его концентрация в воздухе составляет 0,03...0,045 %. Наряду с азотом и водяным паром, он составлял основу древней атмосферы Земли. Его доля постоянно снижалась, начиная с момента появления океанов и зарождения жизни. С середины XX в. наблюдениями установлен устойчивый рост количества CO_2 в атмосфере. В период 2015–2020 гг., согласно международным наблюдениям, среднемесячная концентрация CO_2 в атмосфере стабильно превышает 400 ppm (здесь концентрацию в 1 ppm можно считать равной 1 мг/кг или 1 мг/л) [6–8].

Колебания климатических изменений были всегда, однако в XX в. и начале XXI в. они происходят несравненно чаще. При этом средняя приземная температура воздуха возросла примерно на 0,6...0,7 °С. Моделирование климата как нелинейной динамической системы показало, что даже такие незначительные изменения температуры могут послужить причиной некоторых каскадных последствий. В частности, в летний период появилась возможность свободного мореплавания в географическую точку Северного полюса, чего ранее никогда не наблюдалось из-за плотного покрытия полярными льдами. Согласно данным метеонаблюдений, которые получены начиная с 1850 г., 10 наиболее теплых лет были зафиксированы после 1999 г.

В связи с интенсивным использованием ископаемых ресурсов в качестве топлива для промышленности и транспорта происходит быстрое увеличение концентрации диоксида углерода в атмосфере, поскольку сжигание любого органического топлива приводит к окислению ископаемого углерода с образованием CO_2 . Воздействию промышленности на окружающую среду и, как следствие, повышению концентрации диоксида углерода в атмосфере Земли исследователи ведут отсчет с середины XX в. Темп нарастания содержания CO_2 увеличивался и в 2010–2020 гг., причем со скоростью более 2...3 ppm/год, или 0,5...0,7 %. По литературным данным, современный уровень содержания CO_2 в атмосфере является максимальным за последние миллионы лет. Во многом увеличение антропогенных выбросов CO_2 предопределяется ростом обезлесения [9–13].

Лучше всего количество CO_2 в атмосфере может наглядно продемонстрировать годовой график эмиссии (рис. 1) за последнее тысячелетие [10, 14].

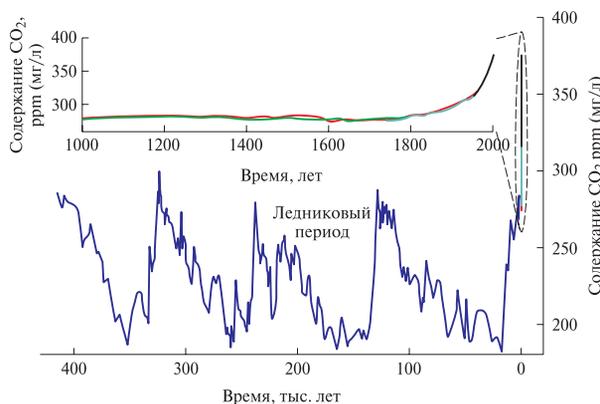


Рис. 1. Изменение содержания CO_2 в атмосфере на протяжении последних 400 тыс. лет (врезка — за последнее тысячелетие)

Fig. 1. Changes in the content of CO_2 in the atmosphere over the past 400 thousand years (fragment — over the last millennium)

Промышленность как основной эмитент диоксида углерода

Анализ литературных данных показывает, что рост эмиссии CO_2 в значительной степени обусловлен прежде всего производственной деятельностью человека. Из 7,5 млрд чел. населения Земли более 1 млрд занято в промышленности.

Существуют три основные группы промышленности:

- *старые отрасли*: угольная, металлургическая, железорудная, текстильная, судостроение, в основном в развивающихся странах;
- *новые отрасли*: производство пластмасс, химического волокна и алюминия, автомобилестроение, в основном сосредоточенные в развитых странах, которые быстро наращивают темпы производства автомобилей, химических продуктов и пластмасс;
- *новейшие отрасли*: электроника, микробиология, аэрокосмическая промышленность, вычислительная техника, робототехника и роботостроение.

Каждая из этих групп промышленности затрачивает огромное количество энергии на свои производства и прямо или косвенно способствует образованию значительного количества диоксида углерода.

По экспертным оценкам, в XXI в. человечество также активно способствует дополнительному образованию более 35...40 млрд т CO_2 в год, что составляет три четверти всех выбросов парниковых газов (по-видимому, без учета паров воды, содержание которых в земной атмосфере достигает 4 %) [15, 16].

Такое количество CO_2 , вероятно, более чем в 100 раз превосходит уровень образования CO_2 вулканического происхождения.

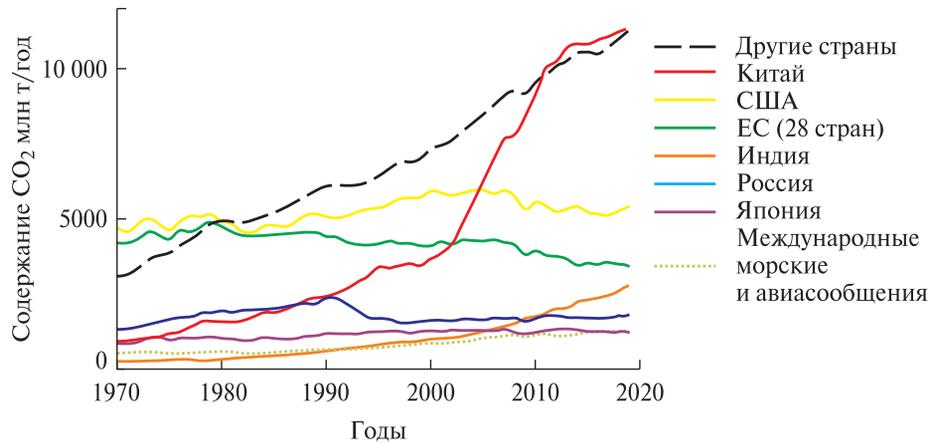


Рис. 2. Региональная эмиссия диоксида углерода за последние 50 лет
Fig. 2. Regional carbon dioxide emissions over the past 50 years

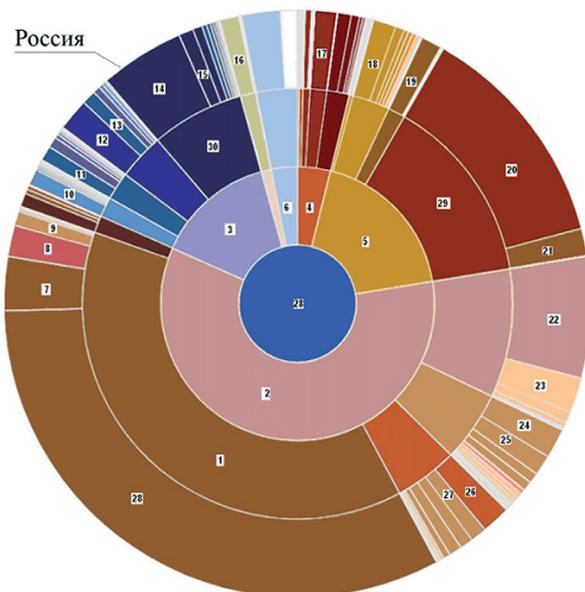


Рис. 3. Вклад отдельных регионов и стран в общий избыточный баланс CO₂: 1 — Восточная Азия; 2 — Азия; 3 — Европа; 4 — Африка; 5 — Америка; 6 — остальное; 7 — Япония; 8 — Южная Корея; 9 — Тайвань; 10 — Великобритания; 11 — Италия; 12 — Германия; 13 — Франция; 14 — Россия; 15 — Польша; 16 — Австралия; 17 — ЮАР; 18 — Бразилия; 19 — Мексика; 20 — США; 21 — Канада; 22 — Индия; 23 — Иран; 24 — Саудовская Аравия; 25 — Турция; 26 — Индонезия; 27 — Вьетнам; 28 — весь мир; 29 — Северная Америка; 30 — Восточная Европа

Fig. 3. The contribution of particular regions and countries to the overall harmful carbon balance: 1 — East Asia; 2 — Asia; 3 — Europe; 4 — Africa; 5 — America; 6 — Other; 7 — Japan; 8 — South Korea; 9 — Taiwan; 10 — Great Britain; 11 — Italy; 12 — Germany; 13 — France; 14 — Russia; 15 — Poland; 16 — Australia; 17 — South Africa; 18 — Brazil; 19 — Mexico; 20 — USA; 21 — Canada; 22 — India; 23 — Iran; 24 — Saudi Arabia; 25 — Turkey; 26 — Indonesia; 27 — Vietnam; 28 — World; 29 — North America; 30 — Eastern Europe

В соответствии с глобальной базой данных выбросов атмосферных исследований (EDGAR — Emissions Database for Global Atmospheric Research) можно оценить вклад отдельных регионов (рис. 2) в эмиссию CO₂ на планете [17, 18].

На рис. 3 представлен сопоставительный уровень эмиссии CO₂ по странам с наибольшим вкладом [19]. Из диаграммы видно, что источники выбросов CO₂ по суммарным объемам в России сопоставимы с Англией, Францией, Италией и Германией или в сумме с Японией и Южной Кореей. Они практически в 3 раза меньше выбросов в США, меньше чем в Индии и в 7 раз меньше, чем в Китае.

Общая доля выбросов CO₂ с территории Российской Федерации не превышает 5 % общемировых промышленных выбросов, поэтому введение против России какого-то специального экологического налога в пользу Европы является совершенно не обоснованным.

Вулканическая деятельность как источник образования CO₂

Определенной оценки заслуживает другой глобальный источник диоксида углерода в атмосфере — действующие вулканы.

В настоящее время количество действующих вулканов равняется 160. Наиболее значимые из них, которые наиболее часто подвергаются извержениям, следующие: подводный вулкан Таму близ Японии, Фудзияма в Японии, гавайский великан Мауна-Лоа, Килауэа на Гавайях, подводный гавайский вулкан Халеакала, Апо на о. Минданао (Филиппины), Руапеху в Новой Зеландии, Пэктусан в Корее, Кумбре-Вьеха на о. Пальма (Канарский архипелаг, Испания), Тейде в Испании, Сюртсей в Исландии, Стромболи к северу от Сицилии, Везувий в Италии, Вулкан Менделеева на о. Кунашир, Алаид и Тятя на Курилах, Чикучачки и Эбеко на северных Курилах,

на о. Парамушир, Вулкан Баранского на о. Итуруп, Ключевская сопка, Кроноцкая сопка, Шивелуч, Ичинская сопка на Камчатке, Корьякская сопка и Авачинская сопка близ Петропавловска-Камчатского, Охос-дель-Саладо в Чилийских и Аргентинских Андах, Сан-Педро и Льяйма в Чили, Котопахи и Сангай в Эквадоре, Мисти в Перу, Орисаба и Попокатепетль в Мексике, Толима в Колумбии, Рейнир, Йеллоустоунская кальдера, Катмай и Лассен Пик в США, Тахумулько в Гватемале, Килиманджаро в Танзании, Камерун в одноименной стране, Эрджияс в Турции, Керинчи на индонезийском острове Суматра, Семеру на о. Ява, Кракатау в Зондском проливе, между островами Ява и Суматра, Агунг на о. Бали, Эребус в Антарктиде, Гекла на юге Исландии, Монтань-Пеле на Малых Антильских островах, Этна на восточном побережье о. Сицилия.

Подводные вулканы выделяют от 60 до 120 млн т CO_2 в год, большая часть выделившегося CO_2 поглощается водой. Субаэральные вулканы выделяют более 250 млн т CO_2 в год [20]. По некоторым оценкам, в результате ежегодной деятельности вулканов возможно образование до 0,5 млрд т диоксида углерода. Вулканическая деятельность обеспечивает его выбросы на меньших уровнях, чем промышленность и транспорт в целом, однако в случае активизации по каким-либо причинам большого числа вулканов одновременно выбросы могут стать «апокалиптическими».

В открытой печати встречаются сведения, указывающие на то, что оценка количества ежегодных выбросов диоксида углерода в результате человеческой деятельности в 10...35 млрд т CO_2 составляет не более 5 ppm против 98 ppm/год от природных явлений, что указывает возможно на недооценку роли вулканической деятельности в существенном росте концентрации CO_2 в атмосфере.

Защитная функция Мирового океана

В связи с опасностью значительных антропогенных выбросов CO_2 , требуется оценка возможности его естественного поглощения силами природы.

Важным фактором связывания CO_2 являются моря и океаны. Мировой океан выступает в роли некоего биологического насоса, который ассимилирует диоксид углерода в воде морей и океанов вследствие его растворимости и наличия океанической микробиоты, которая использует CO_2 в процессе фотосинтеза с образованием связанной органической биомассы. Растворимость CO_2 в воде в зависимости от температуры и солености составляет до 2–3 г/л.

Океан действует как мощный абсорбер углерода, поглощая CO_2 через организмы, которые используют его для фотосинтеза. Фитопланктон, населяющий моря, участвует в этом процессе, потребляя солнечный свет и углерод для производства пищи и энергии.

Возрастание концентрации CO_2 приводит также к появлению новых видов микроорганизмов. В частности, в пробах воды по океанам мира, взятых на глубинах от 0 до 4000 м и проанализированных за достаточно длительный период — 10 лет (с 2010 по 2020 гг.) выявлено около 200 000 новых видов вирусов, что примерно в 12 раз больше, чем в исследованиях предыдущих десятилетий. Почти половина этих вирусов обнаружена исключительно в холодных водах Арктики [21–23].

Почти все вирусы оказались бактериофагами, которые атакуют бактерии, являясь относительно безопасными для человека.

Микроскопические организмы в процессе жизнедеятельности либо умирают, либо поглощаются зоопланктоном, а затем переносят связанный углерод глубже в океан. Там он может быть захоронен в осадочных породах или съеден более крупными морскими существами, жизненный цикл которых также заканчивается на дне океана.

Многие исследователи пытались с различной степенью достоверности оценить количество CO_2 , поглощаемое водами Мирового океана. За 13 лет — с 1994 по 2007 г. — океаном из атмосферы было «изъято» 35 млрд т CO_2 , что, по оценке, составляет третью часть общего объема таких выбросов, т. е. можно считать, что примерно по 2,6 млрд т CO_2 в год. По-видимому, в зависимости от температуры воды в Мировом океане — от +1 до +35 °С — 1 км² его поверхности при общей площади около 360 млн км² может поглотить за год до 7 т/км² CO_2 , который растворяется в водной среде и со временем оказывается на дне в составе осадочных пород [24–28].

В целом, принято считать, что океаны в настоящее время реально поглощают около 1/3 диоксида углерода, выделяемого в результате деятельности человека [29, 30]. Однако другие оценки, проведенные из расчета массы мирового океана $1,34 \cdot 10^{21}$ кг (или примерно $1,3 \cdot 10^{21}$ л) и потенциальной средней растворимости CO_2 на уровне 1 г/л, показывают, что такая масса воды только за счет физической растворимости CO_2 в воде может поглотить значительно больший объем обозначенных выше вредных выбросов CO_2 в 40 млрд т/год. Возможно, процесс растворения CO_2 реально ограничен, поскольку его растворение, по-видимому, значимо происходит в основном в приповерхностных слоях гидросферы, куда проникает солнечный свет.

Защитная роль лесов и растений в поглощении диоксида углерода

Лес является важнейшим возобновляемым фактором поглощения диоксида углерода. Считается, что 2,5 га лесов поглощает 1 т CO₂, а также, что в среднем 1 га лесов ежегодно выделяет 4 т кислорода и потребляет 5 т CO₂ [31]. Кроме того, 1 га лиственного леса за год задерживает до 100 т пыли, хвойного — до 40 т. Запыление атмосферы локально оказывает существенное влияние на возможный региональный рост температуры воздуха.

За вегетационный период 1 га лиственного леса может испарять в атмосферу в среднем 2500...3000, а буковый лес — до 5000 т воды, т. е. возможность эмиссии водяного пара растительностью не может расцениваться как благоприятный фактор.

Площади лесов покрывают почти 1/3 поверхности суши т. е. около 4 млрд га. В литературе встречаются данные, указывающие на возможность ежегодного поглощения 20-летним сосняком, произрастающим на площади 1 га, до 9 т CO₂, а 60-летним сосняком — до 14 т; спелая дубрава площадью 1 га может поглотить до 18 т CO₂. Если принять, что за один солнечный день лес, произрастающий на площади 1 га, поглощает из воздуха до 280 кг CO₂, то получается, что в год (200 солнечных дней) из воздуха все леса планеты могут поглотить практически весь антропогенный объем CO₂. Однако этого не происходит, поскольку его концентрация в атмосфере в последние годы неуклонно возрастает.

Попытки точного расчета поглощения CO₂ лесами и растительным миром в целом, по-видимому, не могут быть достаточно корректными. Невозможно оценить поглощение CO₂ единственным деревом, принимая во внимание, что деревом можно считать растение выше 5 м.

Общепризнано отрицательное влияние роста CO₂ на климат Земли [32, 33]. Однако для растений в целом существующий и постоянно возрастающий уровень содержания CO₂ в воздухе не является оптимальным, поскольку эмпирические наблюдения об уровнях CO₂ в коммерческих теплицах указывают на высокую урожайность при его содержании CO₂ от 1000 до 1200 ppm [34].

При оценке влияния защитной функции лесов следует также учитывать, что сам факт существования растительного покрова сказывается на отражательной способности земной поверхности. Коэффициент отражения солнечного света широколиственным лесом заметно ниже, чем степью или тундрой. Есть оценки, по которым отражающая способность леса может быть на уровне 7 %, а тундры — более 20 %. Снижение

отражающей способности растительного покрова приводит к дополнительному поглощению солнечной энергии и нежелательному перегреву окружающей среды.

Все парниковые газы

В последнее время огромное внимание ученых и политиков всех стран обращено на влияние самого обсуждаемого парникового газа — диоксида углерода. Однако он является не единственным газообразным веществом, способным оказывать парниковый эффект, который выражается в постепенном глобальном повышении температуры окружающей среды.

Парниковые газы накапливаются в биосфере следующим образом: газовый поток поглощается из атмосферы в океан (океанический поток) $1,7 \pm 0,5$ Гт С/год (27 %), поток из атмосферы на сушу (континентальный поток) $1,4 \pm 0,7$ Гт С/год (23 %), а остаток задерживается в атмосфере (атмосферное накопление) $3,2 \pm 0,1$ Гт С/год [35], т. е. реально половина парниковых газов оказывается в свободном состоянии в атмосфере, что и сказывается на климате.

Строго говоря, многие газообразные вещества могут проявлять парниковый эффект. К ним можно отнести также аммиак, диоксид серы, оксиды азота, сероводород, метан и другие летучие органические соединения углерода. Их количество мало, и оно фактически не оказывает существенного влияния на отражающие свойства атмосферы. Наиболее значимыми парниковыми газами являются водяной пар, диоксид углерода, метан и озон.

Водяной пар обычно не рассматривают как проблему парниковых газов, поскольку человек практически никак не может повлиять на влагосодержание атмосферы в глобальном масштабе.

То же самое относится к проблеме озона, за исключением так называемых озоновых дыр, которые могут активно образовываться в верхних слоях атмосферы под воздействием некоторых антропогенных веществ. Озон O₃ представляет собой продукт доокисления кислорода во время грозных разрядов или в ионосфере. Некоторые вещества, поступаая в ионосферу, способствуют усилению ее прозрачности до опасных для живых систем жесткого ультрафиолетового излучения и космической радиации, вызывающих интенсивное образование озона. В связи с этим была проведена большая работа по запрещению использования в мировой практике, в частности в холодильной технике, высоколетучих фторсодержащих соединений — фреонов, которые, как было установлено, и способствуют образованию значительного количества озона [36, 37] (таблица).

Парниковые газы
Greenhouse gases

Компонент	Формула	Концентрация в атмосфере, ppm	Массовая доля, %
Водяной пар	H ₂ O	10...50 000	36...72
Диоксид углерода	CO ₂	~ 400	9...26
Метан	CH ₄	~ 1,8	4...9
Озон	O ₃	2...8	3...7

Из приведенных в таблице данных видно, что метан, так же, как и озон, в определенных условиях может выступать в качестве парникового газа при достижении сопоставимых концентраций. Однако любой их уровень содержания перекрывается количеством водяного пара.

Метан в атмосфере находится в достаточно низких концентрациях, на уровне 1,7 ppm, однако его содержание в атмосфере ежегодно возрастает в среднем на 1 % вследствие дисбаланса между добычей и естественным окислением [38, 39], т. е. антропогенная деятельность по газодобыче постепенно сказывается на увеличении концентрации метана в атмосфере.

Метан по теплотворной способности в 3...10 раз превосходит CO₂, что делает его более опасным газом, а поскольку в северных морях в придонных областях существует большое количество метана и родственных алканов в виде твердых ледяных образований, глобальное повышение температуры воздуха может дополнительно ухудшить ситуацию с избыточным поступлением парниковых газов в атмосферу.

Выводы

Краткое рассмотрение ситуации с проявлением парниковых газов показывает, что человечество, реализуя свои транспортно-промышленные потребности, фактически мало может влиять на последствия от этой деятельности. Единственно реальной возможностью, по-видимому, является быстрый переход на энергетически эффективные технологии с практически минимальным использованием ископаемого топлива, что представляется мало реализуемым в ближайшей перспективе. Запланированные в промышленно развитых странах мероприятия по достижению углеродной нейтральности к 2050–2060 гг., возможно, позволят впервые в истории человечества оказать положительное глобальное воздействие на природную среду.

Список литературы

- [1] Li Y.L., Sun W.D., Zhao Y.F. A supercritical carbon dioxide layer in the Hadean atmosphere for the origin of life? // *Science Bulletin*, 2021, v. 66, no. 12, pp. 1157–1159. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.02.028>
- [2] Bornemann H.J., Seidel A. A get-away special experiment to measure the carbon dioxide content of the earth's atmosphere // *Acta Astronautica*, 1987, v. 15, no. 11, pp. 871–878. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(87\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0094-5765(87)90043-9)
- [3] Singha D., Zhu Y., Liu S., Srivastava P.K., Dharpure J.K. Exploring the links between variations in snow cover area and climatic variables in a Himalayan catchment using earth observations and CMIP6 climate change scenarios // *J. of Hydrology*, 2022, v. 608, no. 5, p. 127648. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127648>
- [4] Scotese C.R., Song H., Mills B.J.W., van der Meer D.G. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years // *Earth-Science Reviews*, 2021, v. 215, no. 4, p. 103503. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103503>
- [5] Petty G.W. *A First Course in Atmospheric Radiation*. Columbia: Sundog Publishing, 2004, pp. 229–251.
- [6] Liu Z., Pagani M., Zinniker D., DeConto R., Huber M., Brinkhuis H., Shah S.R., Leckie R.M., Pearson A. Global cooling during the Eocene-Oligocene climate transition // *Science*, 2009, v. 323, pp. 1187–1190. DOI: 10.1126/science.1166368
- [7] Conte M., Sicre M.A., Ruhlmann C. Global temperature calibration of the alkenone unsaturation index (UK 37) in surface waters and comparison with surface sediments // *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2006, v. 7, Q02005. DOI: 10.1029/2005GC001054
- [8] Palike H., Norris R.D., Herrle J.O., Wilson P.A., Coxall H.K., Lear C.H., Shackleton N.J., Tripati A., Wade B.S. The heartbeat of the Oligocene climate system // *Science*, 2006, v. 314, pp. 1894–1898. DOI: 10.1126/science.1133822
- [9] Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*, 1999, v. 399, no. 6, pp. 429–436. DOI: 10.1038/20859
- [10] Luthi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Stocker T.F. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present // *Nature*, 2008, v. 453, pp. 379–382. DOI: 10.1038/nature06949
- [11] Siegenthaler U., Stocker T.F., Monnin E., Schwander J., Stauffer B., Raynaud D., Barnola J.M. Stable carbon cycle–climate relationship during the Late Pleistocene // *Science*, 2005, v. 310, pp. 1313–1317. DOI: 10.1126/science.1120130
- [12] van der Burgh J., Visscher H., Dilcher D.L., Kurschner W.M. Paleatmospheric signatures in Neogene fossil leaves // *Science*, 1993, v. 260, pp. 1788–1790. DOI: 10.1126/science.260.5115.1788
- [13] Kurschner W.M., Kvacek Z., Dilcher D.L. The impact of Miocene atmospheric carbon dioxide fluctuations on climate and evolution of terrestrial ecosystems // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2008, v. 105, pp. 449–453. DOI: 10.1073/pnas.0708588105
- [14] Plancq J., Grossi V., Henderiks J., Simon L., Mattioli E. Alkenone producers during Late Oligocene–Early Miocene revisited // *Paleoceanography*, 2012, v. 27, PA1202. DOI: 10.1029/2011PA002164
- [15] Kim S., Choi K., Chung J. Reduction in carbon dioxide and production of methane by biological reaction in the electronics industry // *International J. of Hydrogen Energy*, 2013, v. 38, no. 8, pp. 3488–3496. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.007>
- [16] Adesina A. Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions // *Environmental Challenges*, 2020, v. 1, no. 12, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>

- [17] EDGAR — Emissions database for Global Atmospheric Research. Published in: Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J.G.J., Vignati, E., Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries, 2019 Report, EUR 29849 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. DOI: 10.2760/687800, JRC117610
- [18] Bijl P.K., Houben A.J.P., Schouten S., Bohaty S., Sluijs A., Reichert G.J., Damste J.S.S., Brinkhuis H. Transient Middle Eocene atmospheric CO₂ and temperature variations // *Science*, 2010, v. 330, pp. 819–821. DOI: 10.1126/science.1193654
- [19] Pagani M., Huber M., Liu Z.H., Bohaty S., Henderiks J., Sijp W., Krishnan S., DeConto R. The role of carbon dioxide during the onset of Antarctic glaciation // *Science*, 2011, v. 334, pp. 1261–1264. DOI: 10.1126/science.1203909
- [20] Saroni A., Sciarra A., Grassa F., Eich A., Weberd M. Shallow submarine mud volcano in the northern Tyrrhenian sea, Italy // *Applied Geochemistry*, 2020, v. 122, no. 11. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104722>
- [21] Wolf-Gladrow D., Riebesell U. Diffusion and reactions in the vicinity of plankton: a refined model for inorganic carbon transport // *Marine Chemistry*, 1997, v. 59, pp. 17–34. DOI: 10.1016/S0304-4203(97)00069-8
- [22] Lunt D.J., Foster G.L., Haywood A.M., Stone E.J. Late Pliocene Greenland glaciation controlled by a decline in atmospheric CO₂ levels // *Nature*, 2008, v. 454, pp. 1102–1105. DOI: 10.1038/nature07223
- [23] Ruddiman W.F. A paleoclimatic enigma? // *Science*, 2010, v. 328, pp. 838–839. DOI: 10.1126/science.1188292
- [24] Kaneko H., Blanc-Mathieu R., Endo H. Eukaryotic virus composition can predict the efficiency of carbon export in the global ocean // *Science*, 2021, v. 24, no. 1, p. 102002.
- [25] Burkhardt S., Riebesell U., Zondervan I. Effects of growth rate CO₂ concentration and cell size on the stable carbon isotope fractionation in marine phytoplankton // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, v. 63, pp. 3729–3741. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00217-3
- [26] Raven J.A., Johnston A.M. Mechanisms of inorganic-carbon acquisition in marine phytoplankton and their implications for the use of other resources // *Limnology and Oceanography*, 1991, v. 36, pp. 1701–1714. DOI: 10.4319/lo.1991.36.8.1701
- [27] Raven J.A., Johnston A.M., Turpin D.H. Influence of changes in CO₂ concentration and temperature on marine phytoplankton 13C/12C ratios: an analysis of possible mechanisms // *Global Planet*, 1993, v. 8, no. 1–2, pp. 1–12. DOI: 10.1016/0921-8181(93)90058-v
- [28] Laws E.A., Popp B.N., Cassar N., Tanimoto J. 13C discrimination patterns in oceanic phytoplankton: likely influence of CO₂ concentrating mechanisms, and implications for palaeoreconstructions // *Functional Plant Biology*, 2002, v. 29, pp. 323–333. DOI: 10.1071/PP01183
- [29] Yusup Y., Alkarkhi A.F., Kayode J.S., Alqaraghuli W.A. Statistical modeling the effects of microclimate variables on carbon dioxide flux at the tropical coastal ocean in the southern South China Sea // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2018, v. 84, no. 12, pp. 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2018.08.002>
- [30] Carvalho A.C.O., Kerr R., Mendes C.R.B., Azevedo J.L.L., Tavano V.M. Phytoplankton strengthen CO₂ uptake in the South Atlantic Ocean // *Progress in Oceanography*, 2021, v. 190, no. 1, p. 102476. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102476>
- [31] Farquhar G.D., O'Leary M.H., Berry J.A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves // *Australian J. of Plant Physiology*, 1982, v. 9, pp. 121–137. DOI: 10.1071/PP9820121
- [32] Espoir D.K., Mudiangombe B.M., Bannor F., Sunge R., Tshitaka J.L.M. CO₂ emissions and economic growth: Assessing the heterogeneous effects across climate regimes in Africa // *Science of the Total Environment*, 2022, v. 804, no. 1, p. 150089. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150089>
- [33] Adedoyin F., Ozturk I., Abubakar I., Kumeka T., Bekun F.V. Structural breaks in CO₂ emissions: Are they caused by climate change protests or other factors? // *J. of Environmental Management*, 2020, v. 266, no. 7, p. 10628. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110628>
- [34] Li Y., Ding Y., Li D., Miao Z. Automatic carbon dioxide enrichment strategies in the greenhouse. A review // *Biosystems Engineering*, 2018, v. 171, no. 7, pp. 101–119. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.018>
- [35] IPCC, 2001. Climate Change 2001. Working Group I. The Scientific Basis. UNEP, WMO. NY: University Press, 2001, 893 p.
- [36] Wang J., Hayes F., Chadwick D.R., Hill P.W., Mills G., Jones D.L. Short-term responses of greenhouse gas emissions and ecosystem carbon fluxes to elevated ozone and N fertilization in a temperate grassland // *Atmospheric Environment*, 2019, v. 211, no. 8, pp. 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.027>
- [37] Dyominov I.G., Alexander M. Zadorozhny A.M. Greenhouse gases and recovery of the Earth's ozone layer // *Advances in Space Research*, 2005, v. 35, no. 8, pp. 1369–1374. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.04.090>
- [38] Badr O., Probert S.D., O'Callaghan P.W. Methane: A greenhouse gas in the Earth's atmosphere // *Applied Energy*, 1992, v. 41, no. 2, pp. 95–113. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(92\)90039-E](https://doi.org/10.1016/0306-2619(92)90039-E)
- [39] Laakso T.A., Schrag D.P. Methane in the Precambrian atmosphere // *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, v. 522, no. 9, pp. 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.06.022>

Сведения об авторе

Иванкин Андрей Николаевич — д-р хим. наук, академик МАН ВШ, профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса, МГТУ имени Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), aivankin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 05.04.2022.

Одобрено после рецензирования 20.09.2022.

Принята к публикации 22.09.2022.

THE STATE OF GREENHOUSE GASES AND THEIR ASSIMILATION IN NATURE. A REVIEW

A.N. Ivankin

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

aivankin@mgul.ac.ru

A brief review of the state and influence of greenhouse gases, primarily carbon dioxide, on possible changes in climatic parameters is presented. It was noted that the main greenhouse gases are water vapor, the amount of which in the total mass can be from 36 to 72 %, as well as carbon dioxide (9...26 %), methane (4...9 %) and ozone (3...7 %). The main sources of formation of the concentration of carbon dioxide, which attracts the attention of researchers, as a result of anthropogenic impact as a result of industrial development, as well as significant natural factors, such as the consequences of volcanic activity, are described. Concentration changes in the content of greenhouse gases in the atmosphere in the historical period are discussed. A certain contribution of individual economies to the total volume of greenhouse gas emissions on the planet is shown and it is noted that in annual terms the amount of carbon dioxide formed as a result of human activity can reach 35–40 billion tons of CO₂. It is noted that in recent years the concentration of CO₂ has consistently exceeded 400 ppm and this level is, apparently, the highest in the history of observations. The most significant sources of greenhouse gases are described — industry, transport and volcanoes. An assessment was made of the contribution of volcanic activity to the increase in the amount of CO₂ in the atmosphere, which can be at the level of 60...250 million tons of CO₂ per year, and according to some estimates, reach 0,5 billion tons of CO₂. The potential influence of the most significant factors of absorption of excess CO₂ — the world's oceans and forests on the possibility of removing greenhouse gases from the atmosphere is shown. An assessment is given of the assumption that the world ocean absorbs up to 2,6 billion tons of CO₂ per year. It is believed that its absorption capacity is much higher. Consideration of the protective role of forests and vegetation cover in carbon dioxide sequestration shows that, under certain conditions, existing forest areas are likely to be able to absorb at least most of the anthropogenic emissions. The assessment made of the contribution of individual countries to the necessary negative carbon balance shows the groundlessness of claims against the Russian Federation on this issue. A certain forecast of the prospects for climate change is presented in relation to geographical and economic factors.

Keywords: greenhouse gases, carbon dioxide, methane, ozone, volcanoes, emissions, industry, protective function of the ocean and forests

Suggested citation: Ivankin A.N. *Sostoyanie parnikovyykh gazov i ikh assilyatsiya v prirode. Obzor* [The state of greenhouse gases and their assimilation in nature. A review] // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 6, pp. 132–140. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-132-140

References

- [1] Li Y.L., Sun W.D., Zhao Y.F. A supercritical carbon dioxide layer in the Hadean atmosphere for the origin of life? *Science Bulletin*, 2021, v. 66, no. 12, pp. 1157–1159. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.02.028>
- [2] Bornemann H.J., Seidel A. A get-away special experiment to measure the carbon dioxide content of the earth's atmosphere. *Acta Astronautica*, 1987, v. 15, no. 11, pp. 871–878. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(87\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0094-5765(87)90043-9)
- [3] Singha D., Zhu Y., Liu S., Srivastava P.K., Dharpure J.K. Exploring the links between variations in snow cover area and climatic variables in a Himalayan catchment using earth observations and CMIP6 climate change scenarios. *J. of Hydrology*, 2022, v. 608, no. 5, p. 127648. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127648>
- [4] Scotese C.R., Song H., Mills B.J.W., van der Meer D.G. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years. *Earth-Science Reviews*, 2021, v. 215, no. 4, p. 103503. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103503>
- [5] Petty G.W. *A First Course in Atmospheric Radiation*. Columbia: Sundog Publishing, 2004, pp. 229–251.
- [6] Liu Z., Pagani M., Zinniker D., DeConto R., Huber M., Brinkhuis H., Shah S.R., Leckie R.M., Pearson A. Global cooling during the Eocene-Oligocene climate transition. *Science*, 2009, v. 323, pp. 1187–1190. DOI: 10.1126/science.1166368
- [7] Conte M., Sicre M.A., Ruhlmann C. Global temperature calibration of the alkenone unsaturation index (UK 37) in surface waters and comparison with surface sediments. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2006, v. 7, Q02005. DOI: 10.1029/2005GC001054
- [8] Palike H., Norris R.D., Herrle J.O., Wilson P.A., Coxall H.K., Lear C.H., Shackleton N.J., Tripati A., Wade B.S. The heartbeat of the Oligocene climate system. *Science*, 2006, v. 314, pp. 1894–1898. DOI: 10.1126/science.1133822
- [9] Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, v. 399, no. 6, pp. 429–436. DOI: 10.1038/20859
- [10] Luthi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Stocker T.F. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 2008, v. 453, pp. 379–382. DOI: 10.1038/nature06949
- [11] Siegenthaler U., Stocker T.F., Monnin E., Schwander J., Stauffer B., Raynaud D., Barnola J.M. Stable carbon cycle–climate relationship during the Late Pleistocene. *Science*, 2005, v. 310, pp. 1313–1317. DOI: 10.1126/science.1120130
- [12] van der Burgh J., Visscher H., Dilcher D.L., Kurschner W.M. Paleoatmospheric signatures in Neogene fossil leaves. *Science*, 1993, v. 260, pp. 1788–1790. DOI: 10.1126/science.260.5115.1788
- [13] Kurschner W.M., Kvacek Z., Dilcher D.L. The impact of Miocene atmospheric carbon dioxide fluctuations on climate and evolution of terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2008, v. 105, pp. 449–453. DOI: 10.1073/pnas.0708588105

- [14] Plancq J., Grossi V., Henderiks J., Simon L., Mattioli E. Alkenone producers during Late Oligocene–Early Miocene revisited. *Paleoceanography*, 2012, v. 27, PA1202. DOI: 10.1029/2011PA002164
- [15] Kim S., Choi K., Chung J. Reduction in carbon dioxide and production of methane by biological reaction in the electronics industry. *International J. of Hydrogen Energy*, 2013, v. 38, no. 8, pp. 3488–3496. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.007>
- [16] Adesina A. Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environmental Challenges*, 2020, v. 1, no. 12, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>
- [17] EDGAR — Emissions database for Global Atmospheric Research. Published in: Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J.G.J., Vignati, E., Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries, 2019 Report, EUR 29849 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. DOI: 10.2760/687800, JRC117610
- [18] Bijl P.K., Houben A.J.P., Schouten S., Bohaty S., Sluijs A., Reichert G.J., Damste J.S.S., Brinkhuis H. Transient Middle Eocene atmospheric CO₂ and temperature variations. *Science*, 2010, v. 330, pp. 819–821. DOI: 10.1126/science.1193654
- [19] Pagani M., Huber M., Liu Z.H., Bohaty S., Henderiks J., Sijp W., Krishnan S., DeConto R. The role of carbon dioxide during the onset of Antarctic glaciation. *Science*, 2011, v. 334, pp. 1261–1264. DOI: 10.1126/science.1203909
- [20] Saroni A., Sciarra A., Grassa F., Eich A., Weber M. Shallow submarine mud volcano in the northern Tyrrhenian sea, Italy. *Applied Geochemistry*, 2020, v. 122, no. 11. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104722>
- [21] Wolf-Gladrow D., Riebesell U. Diffusion and reactions in the vicinity of plankton: a refined model for inorganic carbon transport. *Marine Chemistry*, 1997, v. 59, pp. 17–34. DOI: 10.1016/S0304-4203(97)00069-8
- [22] Lunt D.J., Foster G.L., Haywood A.M., Stone E.J. Late Pliocene Greenland glaciation controlled by a decline in atmospheric CO₂ levels. *Nature*, 2008, v. 454, pp. 1102–1105. DOI: 10.1038/nature07223
- [23] Ruddiman W.F. A paleoclimatic enigma? *Science*, 2010, v. 328, pp. 838–839. DOI: 10.1126/science.1188292
- [24] Kaneko H., Blanc-Mathieu R., Endo H. Eukaryotic virus composition can predict the efficiency of carbon export in the global ocean. *Science*, 2021, v. 24, no. 1, p. 102002.
- [25] Burkhardt S., Riebesell U., Zondervan I. Effects of growth rate CO₂ concentration and cell size on the stable carbon isotope fractionation in marine phytoplankton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, v. 63, pp. 3729–3741. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00217-3
- [26] Raven J.A., Johnston A.M. Mechanisms of inorganic-carbon acquisition in marine phytoplankton and their implications for the use of other resources. *Limnology and Oceanography*, 1991, v. 36, pp. 1701–1714. DOI: 10.4319/lo.1991.36.8.1701
- [27] Raven J.A., Johnston A.M., Turpin D.H. Influence of changes in CO₂ concentration and temperature on marine phytoplankton 13C/12C ratios: an analysis of possible mechanisms. *Global Planet*, 1993, v. 8, no. 1–2, pp. 1–12. DOI: 10.1016/0921-8181(93)90058-v
- [28] Laws E.A., Popp B.N., Cassar N., Tanimoto J. 13C discrimination patterns in oceanic phytoplankton: likely influence of CO₂ concentrating mechanisms, and implications for palaeoreconstructions. *Functional Plant Biology*, 2002, v. 29, pp. 323–333. DOI: 10.1071/PP01183
- [29] Yusup Y., Alkarkhi A.F., Kayode J.S., Alqaraghuli W.A. Statistical modeling the effects of microclimate variables on carbon dioxide flux at the tropical coastal ocean in the southern South China Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2018, v. 84, no. 12, pp. 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2018.08.002>
- [30] Carvalho A.C.O., Kerr R., Mendes C.R.B., Azevedo J.L.L., Tavano V.M. Phytoplankton strengthen CO₂ uptake in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 2021, v. 190, no. 1, p. 102476. <https://doi.org/10.1016/j.poccean.2020.102476>
- [31] Farquhar G.D., O’Leary M.H., Berry J.A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian J. of Plant Physiology*, 1982, v. 9, pp. 121–137. DOI: 10.1071/PP9820121
- [32] Espoir D.K., Mudiangombe B.M., Bannor F., Sunge R., Tshitaka J.L.M. CO₂ emissions and economic growth: Assessing the heterogeneous effects across climate regimes in Africa. *Science of the Total Environment*, 2022, v. 804, no. 1, p. 150089. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150089>
- [33] Adedoyin F., Ozturk I., Abubakar I., Kumeka T., Bekun F.V. Structural breaks in CO₂ emissions: Are they caused by climate change protests or other factors? *J. of Environmental Management*, 2020, v. 266, no. 7, p. 10628. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110628>
- [34] Li Y., Ding Y., Li D., Miao Z. Automatic carbon dioxide enrichment strategies in the greenhouse. *A review. Biosystems Engineering*, 2018, v. 171, no. 7, pp. 101–119. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.018>
- [35] IPCC, 2001. Climate Change 2001. Working Group I. The Scientific Basis. UNEP, WMO. NY: University Press, 2001, 893 p.
- [36] Wang J., Hayes F., Chadwick D.R., Hill P.W., Mills G., Jones D.L. Short-term responses of greenhouse gas emissions and ecosystem carbon fluxes to elevated ozone and N fertilization in a temperate grassland. *Atmospheric Environment*, 2019, v. 211, no. 8, pp. 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.027>
- [37] Dyominov I.G., Alexander M., Zadorozhny A.M. Greenhouse gases and recovery of the Earth’s ozone layer. *Advances in Space Research*, 2005, v. 35, no. 8, pp. 1369–1374. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.04.090>
- [38] Badr O., Robert S.D., O’Callaghan P.W. Methane: A greenhouse gas in the Earth’s atmosphere. *Applied Energy*, 1992, v. 41, no. 2, pp. 95–113. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(92\)90039-E](https://doi.org/10.1016/0306-2619(92)90039-E)
- [39] Laakso T.A., Schrag D.P. Methane in the Precambrian atmosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, v. 522, no. 9, pp. 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.06.022>

Author’s information

Ivankin Andrey Nikolayevich — Dr. Sci. (Chem.), Member of The International Higher Education Academy Of Sciences (IHEAS), Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@mgul.ac.ru

Received 05.04.2022.

Approved after review 20.09.2022.

Accepted for publication 22.09.2022.