

ЖИЗНЬ ЗЕМЛИ

LIFE OF THE EARTH

ISSN 0514-7468

2022
Т. 44, № 4

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1961 года,
журнальная ежеквартальная версия — с 2016 года

ИНДЕКСИРОВАНИЕ
ЖУРНАЛА

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
Science Index *

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU



ВЫСШАЯ АТТЕСТАЦИОННАЯ
КОМИССИЯ (ВАК)
при Министерстве образования и науки
Российской Федерации
Перечень Российских
рецензируемых научных журналов
ВАК



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2022

Редакционный совет:

В. А. Садовничий (председатель Совета), Н. А. Абакумова, А. П. Бужилова, В. А. Грачёв, С. А. Добролюбов, М. В. Калякин, Н. С. Касимов, М. П. Кирпичников, А. И. Клюкина, С. А. Маскевич (Беларусь), Нгуен Чунг Минь (Вьетнам), С. Х. Мирзоев (Таджикистан), А. С. Орлов, Йован Плава (Сербия), О. В. Плямина, Д. Ю. Пуцаровский, С. А. Шоба

Редакционная коллегия:

А. В. Смуров (гл. редактор), В. В. Снакин (зам. гл. редактора), Л. В. Алексеева (отв. секретарь), О. Б. Афанасьева, М. И. Бурлыкина, М. А. Винник, И. Л. Ган (Австралия), Е. П. Дубинин, А. В. Иванов, Н. Н. Колотилова, С. Н. Лукашенко (Казахстан), Л. В. Попова, А. Разумная (США), Н. Г. Рыбальский, А. П. Садчиков, С. А. Слободов, В. Р. Хрисанов, В. С. Цховребов, Э. И. Черняк, П. А. Чехович, С. Л. Шмаков

Адрес редакции:

119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, МГУ,
Музей землеведения
Тел.: +7 (495) 939-14-15; +7 (495) 939-12-21
e-mail: zhizn_zemli@mail.ru
<http://zhiznzemli.ru>
[http://msupress.com/catalogue/magazines/
geografiya/](http://msupress.com/catalogue/magazines/geografiya/)

**ЖИЗНЬ
ЗЕМЛИ**
LIFE OF THE EARTH

ISSN 0514-7468

2022

T. 44, № 4

Zhizn Zemli [Life of the Earth]

An Interdisciplinary Scientific and Practical Journal

Published quarterly since 2016

Editorial council:

V. A. Sadovnichy (Council Chairman), N. A. Abakumova, A. P. Buzhilova, V. A. Grachev, S. A. Dobrolyubov, M. V. Kalyakin, N. S. Kasimov, M. P. Kirpichnikov, A. I. Klyukina, S. A. Maskevich (Belarus), Nguyen Trung Minh (Vietnam), S. H. Mirzoev (Tajikistan), A. S. Orlov, J. Plavša (Serbia), O. V. Pliamina, D. Yu. Pushcharovskiy, S. A. Shoba

Editorial board:

A. V. Smurov (Ch. Editor), V. V. Snakin (Deputy Ch. Editor), L. V. Alekseeva (Resp. Secretary), O. B. Afanassieva, M. I. Burlykina, I. L. Gan (Australia), E. P. Dubinin, A. V. Ivanov, N. N. Kolotilova, S. N. Lukashenko (Kazakhstan), L. V. Popova, A. Razumnaya (USA), N. G. Rybalskiy, A. P. Sadchikov, S. A. Slobodov, V. R. Khrisanov, V. S. Tskhovrebov, E. I. Chernyak, P. A. Chekhovich, S. L. Shmakov



PUBLISHING
Moscow State University
2022

Editorial address

119991, Moscow, Leninskiye Gory, MGU,
Earth Science Museum
Tel.: +7 (495) 939-14-15; 7 (495) 939-12-21
e-mail: zhizn_zemli@mail.ru
<http://zhiznzemli.ru>
[http://msupress.com/catalogue/magazines/
geografiya/](http://msupress.com/catalogue/magazines/geografiya/)

СОДЕРЖАНИЕ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕОСФЕР

<i>Фёдоров В.М., Алтунин И.В., Фролов Д.М.</i> Влияние диоксида углерода антропогенного генезиса на термический режим атмосферы и его изменения	402
<i>Кривичев А.И., Нюдлеев Д.Д., Сидоренко В.Н.</i> «Синяя экономика» как основа устойчивого развития арктического региона России	415
<i>Магеррамова М.М.</i> Современное состояние ресурсов влаги на фоне климатических изменений на северо-восточном склоне Большого Кавказа (в пределах Азербайджанской Республики)	425
<i>Караваев В.А., Воскова А.В., Семиноженко С.С.</i> Мезотрофные долинные болота на северном макросклоне Центрального Кавказа	433

ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНАЯ МУЗЕОЛОГИЯ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

<i>Алексеева Л.В., Иванов А.В., Максимов Ю.И.</i> Андиганское землетрясение 1902 г. по материалам фотоархива Музея земледования МГУ	440
<i>Климовская Т.Ф.</i> Структурные и морфологические особенности бивней шерстистого мамонта <i>Mammuthus primigenius</i> : обзор результатов и перспективы исследований	456

МУЗЕЙНАЯ ПЕДАГОГИКА

<i>Третьякова О.Г., Третьяков М.Ф., Филиппов В.Р., Рожин С.С., Третьякова Н.М.</i> 50 лет Томпонскому учебному геолого-съёмочному полигону им. В.И. Коростелёва, кузнице геологических кадров	465
---	-----

ВЕСТИ ИЗ МУЗЕЕВ

<i>Матвиец П.С., Матвиец П.В.</i> Вокруг света на шлюпе «Камчатка». Экспедиция В.М. Головнина в рисунках М.Т. Тиханова по материалам выставки в Музее Мирового океана	475
<i>Винник М.А., Коснырева А.А., Галушкин Ю.И., Галушкина Т.Н.</i> Метеоритные экспедиции сотрудников Музея земледования в 2022 г.	487
<i>Колотилова Н.Н.</i> К 200-летию со дня рождения Луи Пастера. Выставка в Музее земледования МГУ	498

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

<i>Снакин В.В., Митрофанов И.К.</i> Журнал «Жизнь Земли» в информационном музейном пространстве	505
<i>Борискин Д.А.</i> Высотка МГУ как модельный объект изучения орнитофауны крыш	512

ХРОНИКА. СОБЫТИЯ

В преддверии 160-летия В.И. Вернадского. Международная научная конференция, посвящённая 90-летию Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси. Торжественное заседание Секции музеологии МОИП, посвящённое 100-летию Государственного биологического музея им. К.А. Тимирязева. II Международная научно-практическая конференция «Ботанические коллекции Беларуси: сохранность, использование и перспективы развития гербариев». VII Международный симпозиум «Биокосные взаимодействия в природных и антропогенных системах». 7-я Всероссийская научная конференция с международным участием «Наука в вузовском музее». 100-летие основания и 30-летие возрождения Общества изучения русской усадьбы. Выставка «Кабинет редкостей» Московского университета в ГМИИ им. А.С. Пушкина. Пресс-конференция «Экологическая безопасность при освоении морских нефтегазовых месторождений в Арктике и на Дальнем Востоке. Возможно ли сотрудничество науки и бизнеса?». 120 лет со дня рождения Н.А. Базилевской. 110 лет со дня рождения Л.Н. Гумилёва. 90 лет Сергею Алексеевичу Несмеянову	516
---	-----

TABLE OF CONTENTS	528
-------------------------	-----

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕОСФЕР

УДК 551.583, 551.521

DOI 10.29003/m3115.0514-7468.2022_44_4/402-414

ВЛИЯНИЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА АНТРОПОГЕННОГО ГЕНЕЗИСА НА ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АТМОСФЕРЫ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ

В.М. Фёдоров, И.В. Алтунин, Д.М. Фролов*

По выполненным расчётам для периода активной индустриализации с 1959 по 2021 г. содержание антропогенного CO₂ (без учёта вулканической деятельности) составляло не более 4,1 % общего содержания диоксида углерода в атмосфере. Диоксидом углерода, связанным с деятельностью человека в этот период, определяется повышение глобальной температуры Земли не более чем на 0,0004°C, при общем повышении температуры на 0,81°C. В связи с полученными результатами выводы МГЭИК о ведущей роли антропогенного фактора в потеплении климата не представляются убедительными. Определена возможность реалистичного прогнозирования изменения содержания CO₂ в атмосфере на основе простой регрессионной и многоблочной модели. Расхождение между двумя независимыми прогнозами составило на 2020 г. 1,2 %, на 2030 г. – 0,93 %. Расхождение расчётных данных с фактическими на 2020 г. значениями содержания CO₂ в блочной модели составило 0,24 %, в регрессионной модели – 0,97 %. Полученные результаты указывают на отсутствие необходимости использования предлагаемых МГЭИК и приводящих к неопределённости сценарных прогнозов при прогнозировании изменений глобального климата.

Ключевые слова: глобальный климат, солнечная радиация, углеродный цикл, температурный режим, Мировой океан, инсоляционная контрастность.

Ссылка для цитирования: Фёдоров В.М., Алтунин И.В., Фролов Д.М. Влияние диоксида углерода антропогенного генезиса на термический режим атмосферы и его изменения // Жизнь Земли. 2022. Т. 44, № 4. С. 402–414. DOI: 10.29003/m3115.0514-7468.2022_44_4/402-414.

Поступила 22.08.2022 / Принята к публикации 16.11.2022

* Фёдоров Валерий Михайлович – к.г.н., в.н.с. географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, fedorov.msu@mail.ru; Алтунин Иван Васильевич – к.ф.-м.н., член Русского экологического общества; Фролов Денис Максимович – н.с. географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, denisfrolovm@mail.ru.

INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC CARBON DIOXIDE ON THE THERMAL REGIME OF THE ATMOSPHERE AND ITS CHANGES

V.M. Fedorov¹, PhD, I.V. Altunin², PhD, D.M. Frolov¹

¹ Lomonosov Moscow State University (Faculty of Geography)

² Russian Ecological Society

According to our calculations for the active industrialization period (1959–2021), the content of anthropogenic CO₂ (excluding volcanic activity) was no more than 4.1% of its total content in the atmosphere. The carbon dioxide associated with human activity during this period determines an increase in the Earth global temperature by no more than 0.0004°C, against the total temperature increase of 0.81°C. At the same time, the global temperature increase is assumed to be completely determined by the greenhouse effect of our planet only. In connection with results obtained, the conclusions of IPCC on the leading role of the anthropogenic factor in climate warming do not seem convincing.

The possibility of realistic forecasting of changes in the CO₂ content in the atmosphere based on a simple regression model and a multiblock (linear and non-linear) of the global carbon cycles was assessed. Annual insolation contrast (AIC) was used as a predictor in the regression model. Generally, AIC (according to the areas of heat source and sink) reflects changes in the meridional insolation gradient, which regulates the meridional transfer of radiative heat in the ocean–atmosphere system. Our eight-block model of global circulation included the following blocks: the atmosphere, land biota, humus, inorganic ocean carbon, phytoplankton, dissolved organic matter in the ocean, sedimentary carbonate rocks of the continents, and sedimentary carbonate rocks in the ocean. Linear and non-linear relationships were used to describe global CO₂ fluxes from the atmosphere to biota due to net photosynthesis and from the active layer of the ocean to the atmosphere. Carbon penetration into the deep ocean was described by a diffusion equation, and the other fluxes were described by linear relations.

The discrepancy between the two independent model (regression and block) forecasts was 1.2% and 0.93% for 2020 and 2030, respectively. The discrepancy between our calculated data and the actual values of CO₂ content for 2020 was 0.24% and 0.97% for the block model and the regression model, respectively. The results obtained indicate no need to use any scenario forecasts proposed by IPCC and leading to uncertainty when forecasting global climate changes.

Keywords: global climate, solar radiation, carbon cycle, temperature regime, World Ocean, insolation contrast.

For citation: Fedorov, V.M., Altunin, I.V., Frolov, D.M., “Influence of anthropogenic carbon dioxide on the thermal regime of the atmosphere and its changes”, *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] **44**, no 4, 402–414 (2022) (in Russ., abstract in Engl.). DOI: 10.29003/m3115.0514-7468.2022_44_4/402-414.

Введение. Климат, по определению, – статистический набор гидрометеорологических показателей, усреднённых по времени для отдельных районов или Земли в целом – важнейшая характеристика природной среды обитания человека, поэтому исследование изменений глобального климата является одной из важнейших научных и практических задач. Её актуальность определяется необходимостью прогнозирования последствий климатических изменений для природной среды, человека и общества. Наиболее важным при решении указанной проблемы является вопрос о причинах, вызывающих эти изменения [6, 7]. Среди возможных факторов формирования и изменения климата основными считаются солнечная радиация, парниковый эффект, вулканическая деятельность и механизмы теплообмена.

Солнечная радиация – основной источник энергии гидрометеорологических процессов. Приходящей от Солнца радиацией определяется радиационный и тепловой баланс Земли. Перераспределение радиационного тепла в природной системе Земли осуществляется механизмами теплообмена. Наиболее важными из них являются: меридиональный перенос радиационного тепла в океане и атмосфере от экваториальной области к полярным районам – «тепловая машина первого рода»; теплообмен в системе океан – материк, связанный с реверсивной сезонной сменой областей холода и тепла – «тепловая машина второго рода»; теплообмен в системе океан – атмосфера и межполушарный теплообмен [9]. Важным фактором в регулировании термического режима Земли является состав атмосферы (прежде всего, содержание водяного пара), определяющий величину альбеда (отражения приходящей от Солнца коротковолновой радиации), роль парникового эффекта планеты и его изменение [3, 7, 8].

В XX веке отмечена тенденция повышения глобальной приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и температуры поверхности океана (ТПО). Широко распространено мнение о том, что основной причиной изменения глобального климата является парниковый эффект, связанный, главным образом, с эмиссией парниковых газов, определяемой антропогенным фактором [15, 16]. Однако убедительные научные доказательства этого не приводятся. В то же время не подвергается сомнению тот факт, что солнечная радиация имеет важнейшее значение в генезисе климата [6, 7, 9]. В связи с этим целью представленной работы является оценка влияния двуокси углерода, генетически связанного с деятельностью человека, на изменения термического режима атмосферы.

Значимость поисков причинно-следственных связей определяется необходимостью реалистичных прогнозов изменения климата и связанных с ними последствий, а также тем, что от состояния окружающей природной среды зависят условия жизни, благополучие и здоровье населения. Экономическая и политическая актуальность темы связаны с вопросом реализации Парижского соглашения по климату, предусматривающего ведущую роль антропогенного фактора в эволюции современного климата, а также «зелёного» энергетического перехода [10]. Важным аспектом рассматриваемой темы является неопределённость в существующей системе прогнозирования (сценарные прогнозы).

Основные факторы термического режима. Солнечная радиация является основным источником энергии для гидрометеорологических, биохимических и многих других процессов, происходящих в атмосфере, гидросфере, биосфере, криосфере и в поверхностном слое литосферы, а также важнейшим фактором развития жизни на Земле, обеспечивающим необходимые термические условия и поддерживающим процесс фотосинтеза (рис. 1).

Парниковый эффект проявляется в способности ряда газов и аэрозолей удерживать тепло, получаемое нашей планетой от Солнца. По определению МГЭИК, парниковый эффект – это *«Инфракрасный радиационный эффект всех составляющих атмосферы, поглощающих инфракрасное излучение. Парниковые газы, облака и (в малой степени) аэрозоли поглощают излучение, излучаемое поверхностью Земли и где-либо в атмосфере. Эти вещества испускают инфракрасную радиацию во всех направлениях, но при прочих равных условиях результирующее количество, эмитируемое в космос, обычно меньше, чем могло бы быть в отсутствие этих поглотителей...»* [16, с. 193].

Численно величина парникового эффекта равна разности фактической температуры земной поверхности и эффективной температуры Земли. Эффективная температура

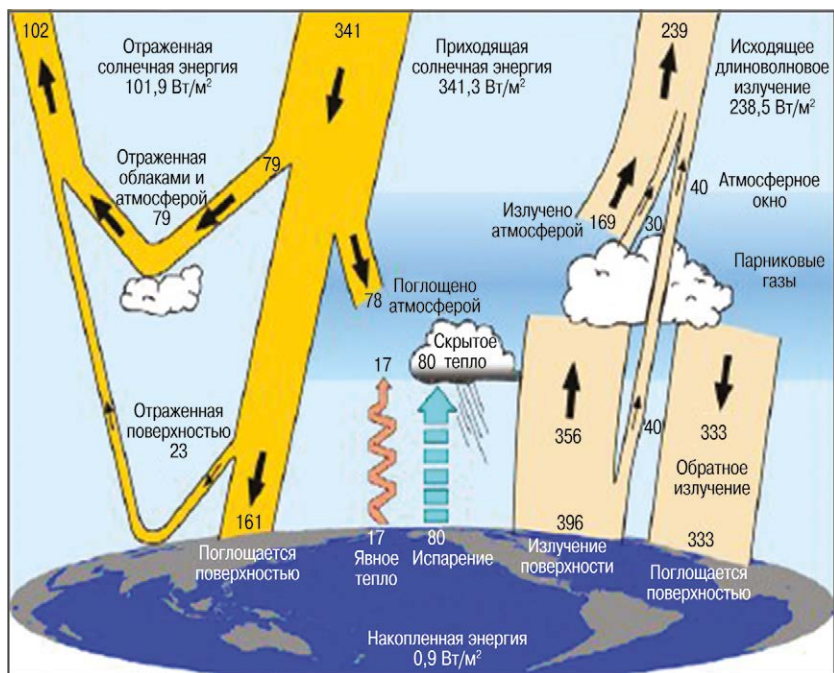


Рис. 1. Составляющие радиационного баланса Земли [18].
 Fig. 1. Components of the Earth's radiation balance [18].

соответствует потоку инфракрасного излучения, направленного от Земли в Космос, и рассчитывается в соответствии с формулой Стефана–Больцмана:

$$L = \sigma T_e^4,$$

где L – поток инфракрасного излучения (Вт/м^2), T_e – эффективная температура (К), σ – постоянная Стефана–Больцмана. При этом предполагается, что Земля является абсолютно черным телом. В работе [7] эффективная температура Земли оценивается в 249 К (или -24°C). Поскольку температура земной поверхности равна 288 К (или $+15^\circ\text{C}$), то парниковый эффект соответствует 39 градусам.

Отметим, что величина T_e определяется солнечной постоянной и планетарным альбедо, которое зависит от альбедо земной поверхности и атмосферы. При отсутствии солнечного излучения температура на Земле была бы близка к температуре окружающего её пространства – к абсолютному нулю (-273°C). В настоящее время среднегодовая приповерхностная температура Земли составляет около $+15^\circ\text{C}$. В случае отсутствия у нашей планеты атмосферы (при существующем притоке лучистой энергии), её температура была бы ниже существующей приблизительно на 39°C [7] и составила бы -24°C . Существуют и другие оценки эффективной температуры. Так, в работах [3, 14] эффективная температура принимается равной 255 К, парниковый эффект оценивается в 33 градуса. В этом случае при отсутствии парникового эффекта температура на Земле составила бы -18°C .

Как следует из рис. 1, интенсивность солнечной радиации на верхней границе атмосферы составляет $341,3 \text{ Вт/м}^2$. Если принять альбедо Земли равным 30 %, то отра-

жённая радиация составит $102,39 \text{ Вт/м}^2$. Достигающей поверхности Земли солнечной радиации ($238,91 \text{ Вт/м}^2$) в соответствии с формулой Стефана–Больцмана соответствует эффективная температура, равная $254,673 \text{ К}$. Таким образом, парниковый эффект оказывается равным $33,3$ градуса. В связи с этим оценка парникового эффекта, приведённая в работе [7], представляется завышенной.

Среднегодовая приповерхностная температура Земли составляет 288 К . Следовательно, приходящей от Солнца радиацией определяется приблизительно $88,6 \%$ тепла (255 К), а парниковым эффектом планеты – $11,4 \%$ (33 К).

Оценка вклада антропогенного CO_2 в термический режим атмосферы. Вода находится на Земле в трёх фазовых состояниях, и переход её из одного состояния в другое сопровождается процессами выделения или поглощения тепла. Участие воды в гидрологическом цикле отражается и в термическом режиме климата – как непосредственно, так и в связи с изменением альбедо. Водяной пар также является основным парниковым газом, что признаётся МГЭИК [15, 16]. Его содержание в воздухе в среднем составляет около 2% и может достигать 4% по объёму. Содержание CO_2 (суммарно естественного и антропогенного) — всего $0,04 \%$ (или 400 ppm – миллионных частей).

Водяной пар поглощает $75\text{--}80 \%$ длинноволновой радиации. На долю CO_2 (суммарно естественного и антропогенного), по расчётам Б.М. Смирнова [8], приходится около $15\text{--}20 \%$ (для безоблачного неба). Принимая, что водяным паром определяется 75% парникового эффекта, а CO_2 (суммарно естественного и антропогенного) – 20% , их вклад в температурный режим атмосферы составит (из 33 градусов) $24,75$ и $6,6$ градуса, соответственно. Отметим, что парниковый эффект определяется как разность температуры поверхности и эффективной температуры. Поэтому он оценивается в градусах, имеющих одно и то же значение – как для шкалы Цельсия, так и для шкалы Кельвина (в отличие от температуры). По данным [3], земная атмосфера обуславливает эффект в $33,2$ градуса со следующими вкладами оптически активных газовых компонентов: H_2O – $20,6^\circ$ (62%), CO_2 (суммарно естественный и антропогенный, $21,6 \%$) – $7,2^\circ$, N_2O – $1,4^\circ$, CH_4 – $0,8^\circ$, O_3 – $2,4^\circ$, NH_3 + фреоны + CCl_4 + CF_4 + NO_2 – $0,8^\circ$.

Парниковый эффект, обусловленный углекислым газом, определяется естественной и антропогенной составляющей. На рубеже второго и третьего тысячелетий антропогенные выбросы CO_2 определялись значением $7,5 \text{ Гт/год}$ (в пересчёте на углерод). Суммарное содержание CO_2 в атмосфере, как следует из работы [4], оценивалось в 910 Гт .

Перед началом индустриального периода концентрация углекислого газа в атмосфере была близка к 280 ppm , что соответствует приблизительно 600 Гт . За индустриальный период концентрация увеличилась почти в полтора раза, достигнув 403 ppm в 2016 г . [8], что соответствует 860 Гт . В связи с этим приведённая выше по работе [4] оценка общего содержания CO_2 в атмосфере вызывает сомнения. Антропогенные выбросы в настоящее время составляют приблизительно 9 Гт/год .

Оценка влияния диоксида углерода антропогенного генезиса на термический режим атмосферы и его изменения была выполнена нами для периода $1959\text{--}2021 \text{ гг}$. (период интенсивного индустриального развития) на основе следующих соображений. Общее содержание CO_2 в атмосфере в 1959 г . (начало инструментальных наблюдений на станции Мауна-Лоа) составляло 316 ppm , в 2021 г . – $414,7 \text{ ppm}$ [17]. За период $1959\text{--}2021 \text{ гг}$. содержание CO_2 возросло на $98,7 \text{ ppm}$, увеличиваясь в среднем за год на $1,57 \text{ ppm}$. Поскольку 1 ppm приблизительно равен $0,5 \text{ Гт}$, то ежегодное увеличение в этот период составляло $0,78 \text{ Гт}$. Примем для всего периода ежегодные антропогенные выбросы CO_2

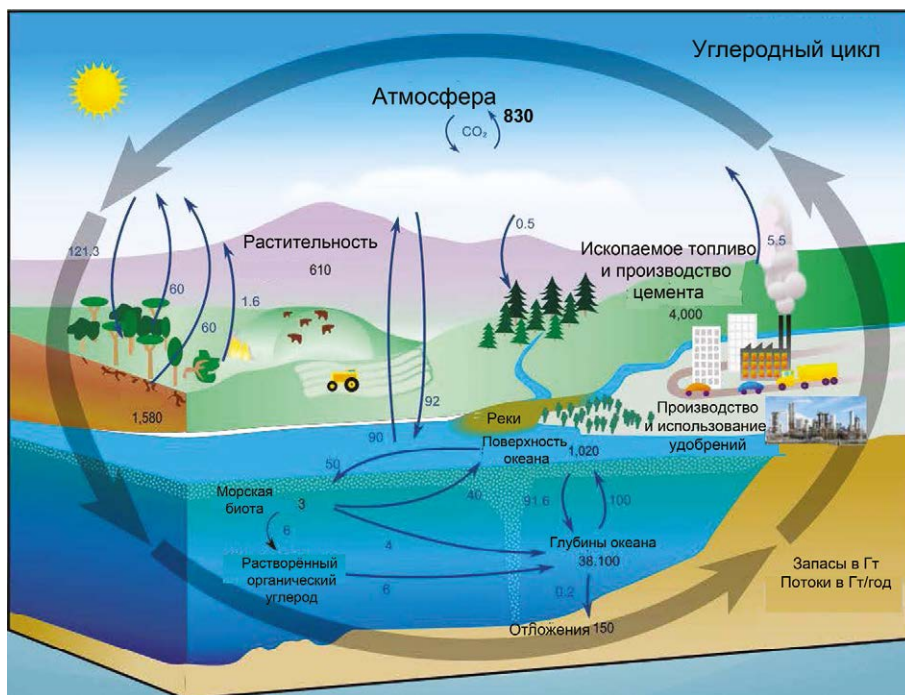


Рис. 2. Глобальный углеродный цикл [13].
Fig. 2. Global carbon cycle [13].

равными 9 Гт. Ежегодное поступление естественного CO_2 с поверхности материков и океана (без учёта вулканических выбросов) составляет 211 Гт [8, 13]. Эти ежегодные поступления вовлекаются в углеродный цикл (рис. 2) и поглощаются в области стока (в Мировом океане).

При этом в среднем за год остаётся непоглощённым 0,78 Гт (ежегодное увеличение содержания CO_2 в атмосфере). В этом остатке антропогенный CO_2 составляет не более 4,1 % [9 Гт : (9 Гт + 211 Гт) = 0,0409]. Таким образом, ежегодно в атмосфере накапливается 0,032 Гт (0,78 Гт \times 0,0409) антропогенного CO_2 . За период с 1959 по 2021 г. (63 года) в атмосфере накопилось 2,01 Гт диоксида углерода, связанного с деятельностью человека. От общего содержания CO_2 в атмосфере – 860 Гт [8], что составляет 0,0023 (или 0,23 %)¹.

Оценим вклад антропогенного CO_2 в изменение приповерхностной температуры воздуха (ПТВ, представленной в массиве HadCRUT4) в период с 1959 по 2021 г. [12]. Аномалия ПТВ в Северном полушарии в 1959 г. составляла 0,073 °С, в 2021 г. – 1,178 °С, т. е. изменение ПТВ за этот период составило 1,105 °С. Допустим, что всё потепление связано только с парниковым эффектом и связь увеличения водяного пара и CO_2 с ПТВ линейная (т. е. примем, что поступление солнечной радиации не изменялось, вулканических извержений не происходило и увеличение водяного пара в атмосфере происходило сходным образом с увеличением CO_2).

¹ Данная оценка соответствует результатам работы [5], в которой определена доля ежегодных выбросов CO_2 от деятельности человека как 4,6 ppm выбросов/год против 98 ppm/год от природных явлений, то есть менее 5 %.

Тогда 75 % увеличения ПТВ ($0,829^{\circ}\text{C}$) связано с водяным паром, а 20 % ($0,221$) определяется CO_2 (естественным и антропогенным суммарно). Поскольку CO_2 , связанный с деятельностью человека и накопленный за этот период, составляет $0,0023$ от его общего содержания, то из $0,221^{\circ}\text{C}$ естественным CO_2 определяется $0,2205^{\circ}\text{C}$, с антропогенным CO_2 связано увеличение ПТВ в Северном полушарии на $0,0005^{\circ}\text{C}$ ($0,0023 \times 0,221$). В Южном полушарии аномалия ПТВ в 1959 г. составляла $-0,038^{\circ}\text{C}$, в 2021 г. – $0,481^{\circ}\text{C}$, увеличение ПТВ составляет $0,519^{\circ}\text{C}$. В этом случае с водяным паром связано увеличение ПТВ на $0,389^{\circ}\text{C}$, с углекислым газом (суммарно естественным и антропогенным) – на $0,104^{\circ}\text{C}$. Антропогенным CO_2 определяется потепление в Южном полушарии за период с 1959 по 2021 г. на $0,0002^{\circ}\text{C}$. Для Земли аномалия ПТВ в 1959 г. составляет $0,017^{\circ}\text{C}$, в 2021 г. – $0,827^{\circ}\text{C}$. ПТВ Земли увеличивается за этот период на $0,810^{\circ}\text{C}$. С водяным паром связано увеличение ПТВ на $0,608^{\circ}\text{C}$, с углекислым газом – на $0,162^{\circ}\text{C}$. Увеличение содержания CO_2 , связанного с деятельностью человека, приводит к увеличению ПТВ Земли на $0,0004^{\circ}\text{C}$. Эти значения находятся в пределах ошибок измерения температуры. Следовательно, наблюдаемое глобальное потепление в основном связано с естественными факторами изменения климата.

Определим долю антропогенного CO_2 в общем парниковом эффекте планеты в настоящее время. Напомним, что парниковый эффект оценивается в 33 градуса, при этом $6,6^{\circ}$ [8] или $7,2^{\circ}$ [3] связано с CO_2 (естественным и антропогенным суммарно). Антропогенным CO_2 (составляющим $0,0409$ от всего CO_2) в парниковом эффекте определяется $0,270$ ($6,6 \times 0,0409$) или $0,294$ ($7,2 \times 0,0409$) градуса. Доля антропогенного CO_2 в общем парниковом эффекте планеты (из 33 градусов) составляет $0,00819^{\circ}$, или $0,819\%$ (для $6,6^{\circ}$) [8] и $0,00891^{\circ}$, или $0,891\%$ (для $7,2^{\circ}$, определяемых общим содержанием CO_2) [3]. Напомним, что парниковым эффектом определяется только 11,4 % термического режима Земли. В последнем доля антропогенного CO_2 составляет ($0,294 : 288$) около 0,1 %. Для сравнения, доля водяного пара ($20,6 : 288$) [3] составляет от $7,2\%$ до ($24,75 : 288$) [8] $8,6\%$.

Таким образом, следствием низкоуглеродного развития (или «зелёного» энергоперехода) может быть снижение доли CO_2 в парниковом эффекте на $0,27-0,29^{\circ}$ за счёт полного прекращения антропогенной эмиссии. Однако ПТВ при этом будет возрастать в связи с увеличением испарения и содержания водяного пара (возрастанием его доли в парниковом эффекте и самого парникового эффекта) в атмосфере из-за потепления, в основном связанного с естественными причинами, прежде всего, с усилением интенсивности меридионального переноса радиационного тепла вследствие уменьшения наклона оси вращения Земли [9] и геодинамическим колебанием с периодом около 60 лет.

В связи с крайне малым вкладом антропогенного CO_2 в современное потепление и в термический режим атмосферы, представление о том, что основной причиной повышения глобальной температуры является связанное с деятельностью человека увеличение содержания CO_2 в атмосфере, не представляется ни обоснованным, ни убедительным [6, 8, 9]. В связи с полученной оценкой влияния CO_2 , связанного с деятельностью человека, концепция «зелёного» энергоперехода (перехода на низкоуглеродную энергетику) не представляется эффективной в отношении снижения глобальной температуры. Напомним, что при оценке вклада антропогенного CO_2 в термический режим принималось ежегодное значение выбросов, равное 9 Гт (хотя на начало этого века оно составляло около 7,5 Гт); также нами принималось, что в период с 1959 по 2021 г. не происходило вулканических извержений. С учётом того, что в начале исследуемого периода антропогенные выбросы уступали современным, а также происходивших в этот период

извержений вулканов (в среднем около 20–30 в год), даже полученные нами крайне невысокие оценки (для которых допускается, что увеличение ПТВ связано только с парниковым эффектом) представляются завышенными.

Мировой океан и CO₂. Мировой океан является наиболее ёмким резервуаром диоксида углерода, где в результате химических процессов² и деятельности морской биоты основная часть растворённого газа переходит в связанную форму и на длительный срок выводится из поверхностных геосфер (депонируется). Балансовые уравнения для зимнего и летнего периодов включают стоки CO₂ (поглощение слоем перемешивания, фотосинтез, аккумуляция в атмосфере) и источники CO₂ (литосфера, разложение биоты, извлечение газа из атмосферы). Согласно закону Генри–Дальтона, концентрация растворённого газа в воде и интенсивность газообмена атмосферы и гидросферы зависят от парциального давления газа в атмосфере и его растворимости, которая возрастает при понижении температуры и уменьшении солёности воды:

$$mg = Cpg, \quad (1)$$

где mg – молярная концентрация газа в воде; pg – парциальное давление газа над раствором; C – растворимость газа (функция температуры и солёности воды) [8, 11].

Растворимость CO₂ в пресной воде при 273 К составляет 1710 мл/л при парциальном давлении газа 1013 гПа и уменьшается при повышении температуры и увеличении солёности воды. Происходящие в настоящее время потепление климата и повышение температуры поверхности океана с необходимостью должны приводить к снижению растворимости CO₂ в морской воде. При похолодании климата растворимость CO₂ в охлаждающейся морской воде возрастает, что (при условии стабильности источников CO₂) должно приводить к понижению его парциального давления (содержания, концентрации) в атмосфере. Одновременные измерения содержания углекислого газа в атмосфере и морской воде показывают, что содержание CO₂ в воде в основном близко к некоторому равновесному значению, но изменяется при понижении или повышении температуры воды соответственно в сторону повышения или понижения [4]. С учётом того, что около 71 % площади Земли занята Мировым океаном, такое уменьшение растворимости CO₂ при наблюдаемом повышении температуры поверхности океана (ТПО) и увеличении солёности может существенно влиять на увеличение содержания CO₂ в атмосфере. Вывод о том, что основным фактором, определяющим колебания содержания CO₂ в атмосфере, следует считать изменение обмена углекислым газом между океаном и атмосферой при изменении температуры океанических вод, был получен Е.П. Борисенковым и И.В. Алтуниным [2]. Эта точка зрения высказывается и в работе Б.М. Смирнова: «... изменение концентрации молекул углекислого газа в последние 30 лет более или менее объясняется нагреванием океана в результате увеличения глобальной температуры, если предположить термодинамическое равновесие между свободными молекулами углекислого газа в атмосфере и связанными молекулами углекислого газа в океане» [8, с. 50]. Представления о том, что увеличение содержания CO₂ в атмосфере связано с уменьшением растворимости CO₂ в океане из-за увеличения ТПО, объясняемого увеличением интенсивности меридионального переноса радиационного тепла, являются одним из компонентов солярной теории изменения климата [9]. Повышение температуры поверхности океана (ТПО) в настоящее время в основном определяется инсоляционной контрастностью (ИК), обобщённо по областям источника и стока тела, отражающей изменение меридионального градиента инсоляции и геодинамическим колебанием – Атлантической мультидекадной осцилляцией (Atlantic multidecadal oscillation – АМО) [9] (табл. 1).

² CO₂ + H₂O + CaCO₃ ↔ Ca(HCO₃)₂.

Табл. 1. Многолетние изменения ПТВ и ТПО, объясняемые регрессионной моделью на основе ИК и АМО

Table 1. Long-term changes in the surface air temperature and ocean surface temperature, explained by the regression model based on insolation contrast and АМО

Факторы	Земля / Мировой океан	Северное полушарие	Южное полушарие
Приповерхностная температура воздуха (ПТВ), %			
ИК	80,7	73,4	83,1
ИК и АМО	88,3	86,4	84,0
Температура поверхности океана (ТПО), %			
ИК	79,7	69,3	84,1
ИК и АМО	88,5	86,6	85,9

Прогнозирование содержания CO_2 в атмосфере. Напомним, что МГЭИК рекомендуются четыре различных сценария возможных изменений содержания CO_2 в атмосфере [15]. Эти сценарии произвольно ориентированы на тот или иной уровень развития мирового производства, с которым связываются изменения содержания CO_2 в атмосфере. Однако, как показано выше, не более 4,1 % увеличения содержания может определяться антропогенным CO_2 (без учёта доли вулканических извержений). Такой подход к прогнозированию приводит к неопределённости, потому что неизвестно, какой из предлагаемых (или вообще возможных) сценариев будет реалистичным. Для выполнения оценочного прогноза изменения содержания CO_2 в атмосфере нами использовалась простая регрессионная модель [11]. В качестве предиктора учитывалась годовая инсоляционная контрастность. ИК рассчитывалась как разность между годовой инсоляцией широтной области источника (0° – 45°) и стока (45° – 90°) радиационного тепла. Инсоляционная контрастность линейно связана с изменением угла наклона оси вращения Земли (R равен $-0,997$). Годовая ИК обобщённо (по областям источника и стока радиационного тепла) отражает изменение меридионального градиента инсоляции, которым регулируется меридиональный перенос радиационного тепла в системе океан – атмосфера [9]. Значение коэффициента корреляции для содержания CO_2 (данные по наблюдениям на Мауна-Лоа за 1975–2015 гг.) в атмосфере и годовой ИК составляет 0,988. На основании близкой к линейной связи многолетних изменений содержания CO_2 в атмосфере с ИК, которой регулируются тенденции изменения ТПО (и ПТВ, см. табл. 1), можно говорить о том, что увеличение концентрации CO_2 в атмосфере может быть следствием увеличения ИК (обратное невозможно) и зависящего от ИК увеличения ТПО.

Расчёты проводились на основе уравнений линейной и полиномиальной (полином второй степени) регрессии и последующего усреднения соответствующих значений содержания CO_2 , т. е. получались оценочные ансамблевые прогностические решения (рис. 3).

Среднее по модулю расхождение фактических и рассчитанных по ансамблю линейных и полиномиальных решений на период 1975–2015 гг. значений содержания CO_2 в атмосфере составляет 2,631 ppm. Это всего 0,725 % среднегодового содержания CO_2 по данным инструментальных наблюдений за этот период в районе Мауна-Лоа. В соответствии с регрессионной моделью, 98 % изменений CO_2 определяется годовой ИК, которой также в основном определяется увеличение ПТВ и ТПО (табл. 1). По рассчитанному оценочному прогнозу, увеличение содержания CO_2 в 2050 г. относительно 2015 г. составит 65,5 ppm. Таким образом, ожидаемое увеличение содержания CO_2 оценивается приблизительно в

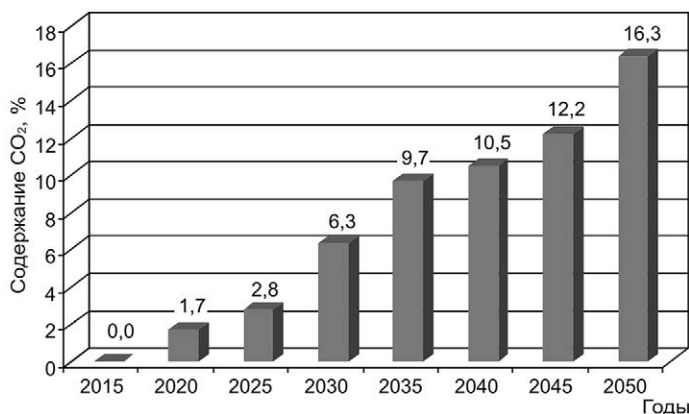


Рис. 3. Оценочный прогноз содержания CO₂ (в процентах относительно 2015 г.).

Fig. 3. Estimated forecast of the CO₂ content (as a percentage relative to 2015).

16,3 %. Это увеличение не зависит от усилий стран – участниц Парижского соглашения по климату, потому что только 2,68 ppm из этого увеличения (4,1 %) связано с деятельностью человека (при ежегодных выбросах 9 Гт и отсутствии вулканических извержений). Полученный по регрессионной модели оценочный прогноз содержания CO₂, таким образом, по своей определённости принципиально отличается от весьма условно предполагаемых и порождающих неопределённость сценарных прогнозов МГЭИК [15].

Ранее Е.П. Борисенковым и И.В. Алтуниным [1, 2] в Главной геофизической обсерватории был выполнен цикл работ по моделированию глобального круговорота углерода в рамках моделей различной степени сложности в системе атмосфера–океан–биосфера. Основная идея, положенная в основу проведённых численных экспериментов, заключается в следующем предположении: наблюдавшиеся в прошлом изменения концентрации CO₂ в атмосфере в первую очередь были вызваны изменением потока углекислого газа в системе океан–атмосфера вследствие колебаний температуры океанических вод (закон Генри–Дальтона). Также предполагалось, что колебания глобальной температуры обуславливали изменения потоков углекислого газа в биоту суши при фотосинтезе и обратного потока в атмосферу из гумуса при его разложении. Соответственно, поглощение фитопланктоном растворённого углекислого газа и разложение растворённого органического вещества океана также модулировались колебаниями температуры. Баланс CO₂ в атмосфере в соответствии с принятой блок-схемой определялся взаимодействием атмосферы с биотой суши и гумусом, с океаном и осадочными карбонатными породами континентов. В свою очередь, в океане баланс углерода определялся взаимодействием органического вещества океана, а также осадочных карбонатных пород океана. Были выполнены работы как по динамике атмосферного CO₂ в прошлом, так и по получению оценок возможных содержаний углекислого газа в атмосфере в будущем. При расчётах будущих концентраций CO₂ в моделях также задавался согласованный с энергетическими прогнозами [1, 2] промышленный (обусловленный сжиганием ископаемого топлива) источник углекислого газа. Необходимые параметры при его аналитическом описании определялись на основании существующих данных потребления энергетического топлива в прошлом и наиболее вероятных значений прогнозируемых запасов. При расчётах учитывался антропогенный биосферный выброс углерода, параметры которого также определялись на основе экспериментальных данных о вырубке леса, распаивании земель

и т. д. Численные эксперименты проводились с многоблочными (от 4 до 8) линейными и нелинейными моделями глобального углеродного цикла. Резервуары четырёхблочной модели — атмосфера, биосфера, деятельный слой океана (глубиной 75 м), глубинный океан. В случае пятиблочной модели биосфера представлялась в виде двух взаимодействующих резервуаров: биоты суши и почвенного гумуса. Семиблочная модель была получена выделением из деятельного слоя океана в отдельные резервуары фитопланктона и продуктов его жизнедеятельности. Восьмиблочная модель глобального круговорота включала блоки: атмосфера, биота суши, гумус, неорганический углерод океана, фитопланктон, растворённое органическое вещество океана, осадочные карбонатные породы континентов, осадочные карбонатные породы океанов. Для описания глобальных потоков CO_2 из атмосферы в биоту вследствие нетто-фотосинтеза и из деятельного слоя океана в атмосферу использовались линейное и нелинейное соотношения. Распространение углерода в глубинный океан описывалось уравнением диффузии, остальные потоки — линейными соотношениями. При численной реализации моделей за начальный момент времени выбирался 1860 г., при этом в качестве калибровочного использовался параметр, ответственный за поглощение углерода биотой в нестационарных условиях; его значение в каждой модели подбиралось так, чтобы на участке 1860–1970 гг. совпадали расчётное и экспериментальное содержание углерода в атмосфере. В результате на основе многоблочной модели был выполнен прогноз (расчёты выполнены по исходным данным до 1983 г.) [2]. На 2020 г. было получено значение содержания CO_2 в атмосфере, равное 413 ppm (что соответствует 883 Гт), на 2030 г. — 430 ppm (921 Гт). По регрессионной модели на основе ИК на эти годы приходится (расчёты выполнены по исходным данным с 1975 по 2015 г.) соответственно 408 ppm и 426 ppm. Расхождение между двумя независимыми модельными (регрессионной и блочной) прогнозами составило на 2020 г. 1,2 %, на 2030 г. — 0,93 %. Фактическое значение CO_2 в атмосфере в 2020 г. оказалось равным 412 ppm [17]. Расхождение расчётных данных с фактическими на 2020 г. в блочной модели составило 0,24 %, в регрессионной модели — 0,97 %. При этом, естественно, понятно, что точность многоблочной модели оказалась выше (при большей глубине исходной для прогноза базы — с 1860 по 1970 г.) точности простой однопараметрической регрессионной модели. Полученные по двум независимым моделям прогностические результаты представляются более объективными и определёнными, чем произвольные ориентиры радиационного форсинга, предлагаемые МГЭИК для четырёх сценарных прогнозов, следствием чего является неопределённость в прогнозировании. Параметризация полученных нами прогностических значений содержания CO_2 при моделировании климатических изменений может исключить неопределённость, связанную с неясностью того, который из четырёх предполагаемых сценариев будет ближе к реальности. При этом следует учитывать, что роль антропогенного CO_2 в современном потеплении крайне незначительна. Таким образом, не существует никакой необходимости в предлагаемых МГЭИК сценарных прогнозах, основанных на произвольных значениях содержания CO_2 в атмосфере.

Заключение. В настоящее время содержание антропогенного CO_2 составляет не более 4,1 % общего содержания диоксида углерода в атмосфере. Диоксидом углерода, связанным с деятельностью человека, в период активной индустриализации с 1959 по 2021 г., определяется повышение глобальной температуры Земли не более чем на 0,0004 °С, температуры Северного полушария — не более чем на 0,0005 °С и Южного полушария — не более чем на 0,0002 °С. В связи с этим выводы Межправительственной группы экспертов по изменению климата о ведущей роль антропогенного фактора в современном потеплении климата не представляются убедительными.

Из полученных результатов следует, что увеличение CO_2 в атмосфере является не причиной, а следствием потепления климата. При увеличении температуры поверхности океана и солёности снижается растворимость CO_2 , а его содержание в атмосфере увеличивается.

Простая регрессионная модель с инсоляционной контрастностью в качестве предиктора и разработанная ещё в прошлом веке Е.П. Борисенковым и И.В. Алтуниным в ГГО многоблочная модель позволяют реалистично прогнозировать изменение содержания CO_2 в атмосфере. В связи с этим нет необходимости в использовании предлагаемых МГЭИК сценарных прогнозов, приводящих к неопределённости.

Благодарности и источники финансирования. Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики» (121051100167-1) и «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтунин И.В., Борисенков Е.П. Описание динамики атмосферного углекислого газа в масштабах времени 10^6 лет // Докл. АН СССР, 1991. Т. 316, № 3. С. 574–576.
2. Борисенков Е.П., Алтунин И.В. Рост углекислого газа в атмосфере и его влияние на климат // Докл. АН СССР, 1985. Т. 281, № 3. С. 559–561
3. Борисенков Е.П., Кондратьев К.Я. Круговорот углерода и климат. Л.: Гидрометеозидат, 1988. 320 с.
4. Голубев В.Н. Роль арктического морского ледяного покрова в газообмене поверхностных геосфер // Криосфера Земли, 2010. Т. XIV, № 4. С. 17–29.
5. Ефимов В.И. Реальность углеродного следа в глобальном изменении климата // Жизнь Земли. 2021. Т. 43, № 3. С. 328–335. DOI: 10.29003/ m2437.0514-7468.2020_43_3/328-335.
6. Кондратьев К.Я., Демирчян К.С. Климат Земли и «Протокол Киото» // Вестник РАН, 2001. Т. 71, № 11. С. 1002–1009.
7. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физ. наук, 2000. Т. 170, № 4. С. 419–445.
8. Смирнов Б.М. Физика глобальной атмосферы. Парниковый эффект, атмосферное электричество, эволюция климата. Долгопрудный. ИД «Интеллект», 2017. 256 с.
9. Фёдоров В.М. Эволюция современного глобального климата Земли и её возможные причины // Геориск, 2020. Т. 14, № 4. С. 16–29. DOI:10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29.
10. Фёдоров В.М. Политические и экономические аспекты концепции «зелёного» энергоперехода // Энергетическая политика, 2022. № 4 (170). С. 68–81.
11. Фёдоров В.М., Голубев В.Н., Фролов Д.М. Многолетняя изменчивость инсоляции Земли и содержания двуоксида углерода в атмосфере // Жизнь Земли, 2018. Т. 40, № 1. С. 12–21
12. CRU. Электронный ресурс университета Восточной Англии и метеобюро Хэдли (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>).
13. EPA. Электронный ресурс Американского Агентства по защите окружающей среды (https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-11/documents/cba2016-creque_increasing_carbon_capture_on_californias_working_lands.pdf).
14. Hobson A. Physics: Concepts and connections, Prentice Hall, Englewood NJ, 2002. 580 p.
15. IPCC. Электронный ресурс Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC) (<http://www.ipcc.ch/>).
16. IPCC: 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, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). Cambridge, Cambridge Univ. Press; New York, 1535 p. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
17. NOAA. Электронный ресурс Национального управления США по исследованиям океана и атмосферы (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>).
18. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Kiehl J. Earth's global energy budget // Bull. American meteorological Society, 2009. P. 311–323. DOI: 10.1175/2008BAMS2634.1.

REFERENCES

1. Altunin, I.V., Borisenkov, E.P., “Description of the dynamics of atmospheric carbon dioxide on a time scale of 10^6 years”, *Doklady AN SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR] **316**, no 3, 574–576 (1991) (in Russian).
2. Borisenkov, E.P., Altunin, I.V., “Growth of carbon dioxide in the atmosphere and its influence on the climate”, *Doklady AN SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR] **281**, no 3, 559–561 (1985) (in Russian).
3. Borisenkov, E.P., Kondratiev, K.Ya., *Carbon cycle and climate* (Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988) (in Russian).
4. Golubev, V.N., “Role of the Arctic Sea ice cover in the gas exchange of surface geospheres”, *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth] **XIV**, no 4, 17–29 (2010) (in Russian).
5. Yefimov, V.I., “Reality of the carbon footprint in the global climate change”, *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] **43**, no 3, 328–335 (2021) (in Russian). DOI: 10.29003/ m2437.0514-7468.2020_43_3/328-335.
6. Kondratiev, K.Ya., Demirchyan, K.S., “Earth’s climate and the Kyoto Protocol”, *Vestnik RAN* **71**, no 11, 1002–1009 (2001) (in Russian).
7. Monin, A.S., Shishkov, Yu.A., “Climate as a problem of physics”, *Uspehi fizicheskikh nauk* [Successes of Physical Sciences] **170**, no 4, 419–445 (2000) (in Russian).
8. Smirnov, B.M., *Physics of the global atmosphere. Greenhouse effect, atmospheric electricity, and climate evolution* (Dolgoprudny: ID "Intellect", 2017) (in Russian).
9. Fedorov, V.M., “Evolution of the modern global climate of the Earth and its possible causes”, *Georisk* **14**, no 4, 16–29 (2020) (in Russian). DOI:10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29
10. Fedorov, V.M., “Political and economic aspects of the green energy transfer concept”, *Energeticheskaya Politika* [Energy Policy] **4** (170), 68–81 (2022) (in Russian).
11. Fedorov, V.M., Golubev, V.N., Frolov, D.M., “Long-term variability of the Earth’s insolation and the carbon dioxide content in the atmosphere”, *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] **40**, no 1, 12–21 (2018) (in Russian).
12. CRU. Electronic resource of the University of East Anglia and the Hadley Weather Bureau (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature>).
13. EPA. Electronic resource of the American Environmental Protection Agency (https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-11/documents/cba2016-creque_increasing_carbon_capture_on_californias_working_lands.pdf).
14. Hobson, A., *Physics: Concepts and Connections* (Prentice Hall, Englewood, New Jersey, 2002).
15. IPCC. Electronic resource of the Intergovernmental Panel on Climate Change (<http://www.ipcc.ch/>).
16. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.), *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge Univ. Press; New York, 2014). DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
17. NOAA. Electronic resource of the US National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>).
18. Trenbert, K.E., Fasullo, J.T., Kiel, J., “Earth’s global energy budget”, *Bull. American Meteorological Society* **90**, no 3, 311–323 (2009). DOI:10.1175/2008BAMS2634.1.