УДК 551.51

УСКОРЕНИЕ РОСТА КОНЦЕНТРАЦИИ CO_2 В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ МАУНА-ЛОА ЗА 1959–2023 ГОДЫ

И. О. Фамилия

[Вуз, город]

Аннотация. По открытому ряду среднегодовых концентраций CO_2 обсерватории Мауна-Лоа (NOAA GML, 1959–2023 гг.) оценены годовые приросты концентрации и сопоставлены три модели тренда: линейная, квадратичная и экспоненциальная модель избытка над доиндустриальным уровнем 280 ppm. Средний прирост вырос с 0,86 ppm/год в 1960-е годы до 2,40 ppm/год в 2010-е. Лучше всего ряд описывает квадратичная модель (RMSE 0,71 ppm). Относительная скорость роста антропогенного избытка снизилась с 2,4 до 2,0 % в год, время удвоения удлинилось примерно с 29 до 35 лет. Результат согласуется с замедлением роста мировых выбросов в 2010-е годы, однако признаков снижения абсолютного прироста концентрации данные не содержат.

Ключевые слова: углекислый газ; кривая Килинга; Мауна-Лоа; темп роста концентрации; экспоненциальная модель; углеродный баланс

Пример работы, выполненной в Универ AI · univerai.ru

ВВЕДЕНИЕ

Ряд среднегодовых концентраций углекислого газа, измеряемых на вулкане Мауна-Лоа (Гавайские острова), принято называть кривой Килинга. Это самый длинный непрерывный инструментальный ряд для парникового газа, и в Шестом оценочном докладе МГЭИК он служит одной из опор вывода о том, что рост концентрации CO_2 с середины XIX века вызван деятельностью человека [1]. Ч. Д. Килинг начал измерения в 1958 году. Уже в 1960 году он описал выраженный сезонный цикл и отметил, что за ним просматривается рост от года к году [2]. С 1974 года параллельную программу ведёт Национальное управление океанических и атмосферных исследований США (NOAA) [3].

Сам рост давно не вызывает споров. Обсуждается другое: насколько быстро он идёт и меняется ли его темп. Для прогноза климата, для оценки углеродных бюджетов и, в конечном счёте, для проверки того, работают ли международные обязательства по сокращению выбросов, важна именно

вторая производная — ускорение. Если годовой прирост концентрации перестал увеличиваться, это первый измеримый признак того, что мировые выбросы перестали расти; если он продолжает увеличиваться, никакие декларации этого не меняют.

В литературе встречаются две простые модели кривой Килинга. В первой концентрация описывается многочленом второй степени, то есть растёт с постоянным ускорением. Во второй к доиндустриальному уровню около 280 ppm добавляется антропогенный «избыток», который растёт экспоненциально; Д. Хофманн с соавторами оценили время удвоения этого избытка примерно в 30 лет [7]. Модели дают разные прогнозы, и проверить, какая из них лучше описывает последние десятилетия, можно по открытым данным без специального оборудования.

Цель статьи — по открытому ряду среднегодовых концентраций CO_2 на Мауна-Лоа за 1959–2023 годы оценить, как менялся годовой прирост концентрации, и сравнить три модели тренда: линейную, квадратичную и экспоненциальную модель избытка над доиндустриальным уровнем. Задачи: рассчитать средние годовые приросты по десятилетиям; подобрать параметры моделей и сравнить их точность; проверить, постоянна ли относительная скорость роста избытка; сопоставить результат с независимыми оценками глобального углеродного баланса [8; 9].

Материалы и методы

Исходные данные — файл среднегодовых концентраций CO_2 на Мауна-Лоа, который публикует Лаборатория глобального мониторинга NOAA совместно с Институтом океанографии Скриппса [4]. Использована версия файла от 5 октября 2024 года, содержащая 65 значений за 1959–2023 годы; неопределённость каждого среднегодового значения в файле указана как 0,12 ppm. Концентрация выражена в молярных долях сухого воздуха (ppm, миллионные доли). Обсерватория расположена на высоте около 3,4 км,

вдали от крупных источников выбросов, поэтому её данные хорошо характеризуют фоновый воздух северного полушария [3].

У ряда есть одна особенность, о которой нужно сказать заранее. 29 ноября 2022 года извержение Мауна-Лоа повредило линию электропередачи, и с декабря 2022 по 4 июля 2023 года измерения вели на площадке обсерваторий Маунакеа [5]. NOAA считает эти данные сопоставимыми, и в этой работе они использованы без поправок, однако значения за 2022–2023 годы следует воспринимать с чуть большей осторожностью.

Годовой прирост концентрации рассчитан как разность соседних среднегодовых значений:

$$\Delta C(t) = C(t) - C(t-1) \tag{1}$$

где C(t) — среднегодовая концентрация CO_2 в году t, ppm; ΔC(t) — прирост за год, ppm/год.

NOAA публикует и собственный ряд темпов роста, но рассчитывает его иначе, по разности декабрьско-январских средних [5]. Поэтому отдельные годовые значения у нас и в официальной таблице могут расходиться на несколько десятых ppm, хотя средние за десятилетие практически совпадают. Для пересчёта прироста в массу углерода использован коэффициент 2,124 ГтС на 1 ppm, принятый в расчётах Глобального углеродного проекта [9].

Для описания тренда сопоставлены три модели. Линейная и квадратичная модели подобраны методом наименьших квадратов по времени x = t − 1959. Третья модель устроена иначе. Она предполагает, что над доиндустриальным уровнем C_0 растёт экспоненциальный избыток. Значение C_0 = 280 ppm взято по измерениям воздуха из ледяных кернов и фирна Антарктиды, где концентрация до начала XIX века держалась в пределах 275–284 ppm [6]:

$$C(t) = C_0 + A\,e^{r\,(t\,-\,1959)} \tag{2}$$

где C_0 = 280 ppm — доиндустриальная концентрация [6]; A — избыток в 1959 году, ppm; r — относительная скорость роста избытка, 1/год.

Параметры A и r найдены линейной регрессией логарифма избытка $\ln(C(t) - C_0)$ на время. Время удвоения избытка вычислено по формуле

$$T_2 = \frac{\ln 2}{r} \tag{3}$$

где T_2 — время удвоения антропогенного избытка концентрации, лет.

Чтобы проверить, постоянна ли скорость r, та же регрессия повторена отдельно для подпериодов 1959–1979, 1980–1999 и 2000–2023 годов. Точность моделей сравнивалась по среднеквадратическому отклонению остатков (RMSE). Все расчёты выполнены автором в Python с библиотекой NumPy [18]; исходный файл и порядок вычислений позволяют любому читателю их воспроизвести. Год достижения 450 ppm по каждой модели рассчитан только как иллюстрация различий между моделями, а не как прогноз: экстраполяция статистического тренда ничего не знает о будущих выбросах.

Результаты

За 64 года наблюдений среднегодовая концентрация выросла с 315,98 до 421,08 ppm, то есть на 105,1 ppm, или на 33 %. Отношение к доиндустриальному уровню 280 ppm увеличилось с 1,13 до 1,50. Около двух третей всего прироста (63 %) пришлось на период после 1990 года, хотя он составляет меньше половины длины ряда. Уже это говорит о том, что рост не был равномерным. Он ускорялся.

Средние приросты по десятилетиям приведены в таблице 1. В 1960-е годы концентрация увеличивалась в среднем на 0,86 ppm в год, в 2010-е — на 2,40 ppm, почти втрое быстрее. Картина почти монотонная. Последовательный рост нарушен только один раз: в 1990-е средний прирост (1,53 ppm/год) оказался немного ниже, чем в 1980-е (1,64 ppm/год). За 2020–

2023 годы средний прирост равен 2,36 ppm/год и пока не превышает уровня 2010-х.

Таблица 1 – Средний годовой прирост концентрации CO_2 на Мауна-Лоа по десятилетиям

Период	Средний прирост, ppm/год	Стандартное отклонение	Минимум (год)	Максимум (год)	В пересчёте, ГтС/год
1960–1969	0,86	0,35	0,42 (1965)	1,57 (1969)	1,8
1970–1979	1,22	0,53	0,51 (1974)	2,22 (1973)	2,6
1980–1989	1,64	0,33	1,26 (1986)	2,38 (1988)	3,5
1990–1999	1,53	0,66	0,67 (1993)	2,96 (1998)	3,3
2000–2009	1,91	0,38	1,17 (2000)	2,53 (2003)	4,1
2010–2019	2,40	0,49	1,75 (2011)	3,40 (2016)	5,1
2020–2023	2,36	0,23	2,12 (2022)	2,56 (2020)	5,0

Источник: рассчитано автором по данным NOAA GML [4]; пересчёт в углерод — по коэффициенту 2,124 ГтС/ppm [9].

Год от года прирост сильно колеблется (рисунок 1). Самые высокие значения приходятся на 1973, 1988, 1998 и 2016 годы, самые низкие — на 1974, 1992–1993 и 2000 годы. Скользящее среднее за десять лет сглаживает эти колебания и показывает почти монотонный подъём, прерванный плато в первой половине 1990-х. Линейный тренд годовых приростов составляет 0,28 ppm/год за десятилетие при коэффициенте корреляции с временем 0,76.



Рисунок 1 – Годовой прирост концентрации CO_2 на Мауна-Лоа, 1960–2023 гг.

Источник: рассчитано автором по данным NOAA GML [4].

Сравнение моделей тренда сведено в таблицу 2. Линейная модель описывает ряд плохо: её остатки образуют дугу, положительную в начале и в конце ряда и отрицательную в середине, а RMSE достигает 4,20 ppm. Квадратичная модель снижает ошибку почти в шесть раз, до 0,71 ppm. Её коэффициент при x^2 равен 0,0131, что соответствует постоянному ускорению 0,026 ppm/год за год. Экспоненциальная модель избытка занимает промежуточное положение: RMSE 1,76 ppm, относительная скорость роста избытка r = 2,17 % в год, время удвоения 31,9 года.

Таблица 2 – Сравнение моделей тренда концентрации CO_2, 1959–2023 гг.

Модель	**Оценки параметров**	**RMSE, ppm**	**Год достижения 450 ppm (иллюстрация)**
Линейная	Наклон 1,64 ppm/год	4,20	—
Квадратичная	Ускорение 0,026 ppm/год²	0,71	2034
Экспоненциальная (C_0 = 280 ppm)	r = 2,17 %/год; T_2 = 31,9 года	1,76	2030
Постоянный прирост 2014–2023 гг.	2,43 ppm/год	—	2035

Источник: рассчитано автором по данным NOAA GML [4]. Годы достижения 450 ppm получены механической экстраполяцией и не являются прогнозом.

Важнее, однако, не итоговая ошибка, а форма остатков (рисунок 2). Экспоненциальная модель систематически занижает концентрацию в 1980–2000-е годы и всё сильнее завышает её после 2010 года: в 2023 году расчётное значение на 5,4 ppm выше наблюдаемого. Это значит, что в последние полтора десятилетия избыток CO_2 рос медленнее, чем требует экспонента с постоянной скоростью. Остатки квадратичной модели не выходят за пределы ±1,9 ppm и не имеют заметного тренда в конце ряда.

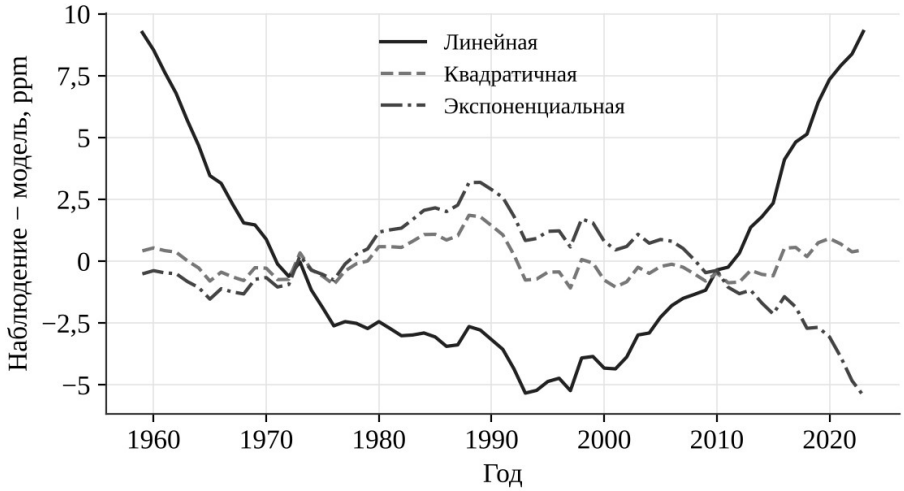


Рисунок 2 – Остатки трёх моделей тренда концентрации CO_2

Источник: рассчитано автором по данным NOAA GML [4].

Проверка постоянства скорости r подтверждает это впечатление. Для 1959–1979 годов относительная скорость роста избытка составляет 2,28 % в год, для 1980–1999 годов — 2,09 %, для 2000–2023 годов — 1,98 %. Если оценивать по двум половинам ряда, разница ещё заметнее: 2,41 % в 1959–1989 годах и 2,00 % в 1990–2023 годах. Время удвоения избытка за это время удлинилось примерно с 29 до 35 лет (для подпериодов 1959–1979, 1980–1999 и 2000–2023 годов — 30,4, 33,1 и 35,1 года).

Итак, данные Мауна-Лоа показывают одновременно две вещи. Абсолютный прирост концентрации за 64 года вырос почти втрое и в 2010–2023 годах держится на уровне 2,4 ppm в год. Относительный же темп роста антропогенного избытка медленно снижается, и экспоненциальная модель с постоянной скоростью, хорошо работавшая до конца XX века, к 2020-м годам начинает давать завышенные значения.

Обсуждение

Первый вопрос — насколько надёжны выявленные колебания. Межгодовая изменчивость прироста давно объяснена: в годы Эль-Ниньо засухи и пожары в тропиках ослабляют сток углерода в наземную растительность, и концентрация растёт быстрее [11; 12]. Пики 1973, 1988, 1998 и 2016 годов совпадают с сильными событиями Эль-Ниньо. Рекордный

прирост 2016 года был предсказан заранее, ещё до того, как он произошёл, именно по прогнозу температуры поверхности Тихого океана [13]. Провал 1992–1993 годов обычно связывают с похолоданием после извержения вулкана Пинатубо в 1991 году, когда сток углерода в океан и на сушу временно усилился [12]. Поэтому сравнивать отдельные годы бессмысленно, и в работе мы опираемся на средние за десятилетие. Даже они не вполне свободны от этого шума. Плато 1990-х годов почти целиком создано двумя «вулканическими» годами: если исключить 1992 и 1993 годы, средний прирост десятилетия поднимается до 1,73 ppm/год и становится выше, чем в 1980-е.

Показательно, что пандемия 2020 года на ряде Мауна-Лоа почти не видна. По оценке К. Ле Кере и соавторов, в начале апреля 2020 года суточные мировые выбросы CO_2 были на 17 % ниже уровня предыдущего года [14], однако годовой прирост концентрации в 2020 году составил 2,56 ppm, больше среднего за десятилетие: сокращение выбросов на несколько процентов в течение нескольких месяцев тонет в естественных колебаниях стока.

Второй вопрос — как согласуется найденное замедление относительного роста с тем, что известно о выбросах. Средний прирост 2010-х годов, 2,40 ppm в год, в пересчёте даёт около 5,1 ГтС в год. По данным Глобального углеродного бюджета, рост атмосферного запаса углерода в 2014–2023 годах близок к этому значению [9], а суммарные выбросы от ископаемого топлива и землепользования примерно вдвое больше: остальное поглощают океан и наземные экосистемы. Доля выбросов, остающаяся в атмосфере, за полвека заметно не изменилась и составляет около 44 % [10].

А выбросы как раз изменили характер роста. В первой половине 2000-х годов мировые выбросы от ископаемого топлива увеличивались более чем на 3 % в год, и М. Раупах с соавторами описывали это как ускорение, обусловленное прежде всего экономическим ростом Китая и других быстро развивающихся стран [15]. После кризиса 2008–2009 годов выбросы быстро

восстановились [16], но в 2010-е годы их рост замедлился и в среднем не превышал 1 % в год [8; 9]. Экспоненциальная модель избытка с постоянной скоростью неявно предполагает, что выбросы растут экспоненциально. Когда рост выбросов замедляется, прирост концентрации перестаёт увеличиваться, что мы и видим в 2010–2023 годах.

Результат согласуется с оценкой Д. Хофманна и соавторов [7]. Время удвоения избытка около 30 лет, полученное ими по данным до 2008 года, близко к нашим 30–33 годам для 1959–1999 годов. Новые данные показывают, что после 2000 года удвоение заняло бы уже около 35 лет. Это не означает, что проблема ослабла. Концентрация продолжает расти примерно на 2,4 ppm ежегодно, в 2023 году среднемировое значение по данным Всемирной метеорологической организации достигло 420 ppm, или около 151 % доиндустриального уровня [17]. Речь идёт только о том, что рост перестал ускоряться в прежнем темпе. Тормозит не концентрация, а её ускорение.

Отсюда следует и практический вывод для тех, кто пользуется простыми трендами. Механическая экстраполяция даёт заметно разные даты достижения порога 450 ppm: 2030 год по экспоненте, 2034 год по квадратичной модели, 2035 год при сохранении среднего прироста 2014–2023 годов (см. таблицу 2). Для оценки будущего нужны сценарии выбросов и модели углеродного цикла, а не подгонка к прошлому, на что прямо указывает и МГЭИК [1].

У работы есть ограничения. Использованы среднегодовые значения одной станции, хотя и самой репрезентативной; глобальный ряд NOAA, рассчитанный по морским станциям, ведёт себя похоже, но не совпадает с Мауна-Лоа в отдельные годы [4; 17]. Подпериоды выбраны по круглым датам, и при другом разбиении оценки r сдвигаются на несколько сотых процентного пункта, хотя направление изменения сохраняется. Наконец, доиндустриальный уровень известен с погрешностью: при C_0 = 278 ppm,

ближе к оценке МГЭИК для 1750 года [1], скорость r для всего ряда составляет 2,11 % в год вместо 2,17 %, а качественные выводы не меняются.

ВЫВОДЫ

1. За 1959–2023 годы среднегодовая концентрация CO_2 на Мауна-Лоа выросла на 105 ppm, а средний годовой прирост увеличился с 0,86 ppm в 1960-е годы до 2,40 ppm в 2010-е, что соответствует росту атмосферного запаса углерода примерно с 1,8 до 5,1 ГтС в год.

2. Из трёх простых моделей тренда лучше всего описывает ряд квадратичная (RMSE 0,71 ppm), экспоненциальная модель избытка над 280 ppm систематически завышает концентрацию после 2010 года.

3. Относительная скорость роста антропогенного избытка снизилась с 2,4 % в год в 1959–1989 годах до 2,0 % в 1990–2023 годах, а время его удвоения удлинилось примерно с 29 до 35 лет. Это согласуется с замедлением роста мировых выбросов в 2010-е годы.

4. Прирост концентрации в 2020–2023 годах (2,36 ppm/год) не превышает уровня предыдущего десятилетия. Признаков снижения абсолютного прироста данные пока не содержат, поэтому стабилизации концентрации в ближайшие годы ожидать не приходится.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by V. Masson-Delmotte [et al.]. – Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2021. – 2391 p. – DOI 10.1017/9781009157896.

2. Keeling, C. D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere / C. D. Keeling // Tellus. – 1960. – Vol. 12, no. 2. – P. 200–203. – DOI 10.3402/tellusa.v12i2.9366.

3. Thoning, K. W. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974–1985 / K. W. Thoning, P. P. Tans, W. D. Komhyr // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1989. – Vol. 94, no. D6. – P. 8549–8565. – DOI 10.1029/JD094iD06p08549.

4. Lan, X. Mauna Loa CO2 annual mean data : [файл co2_annmean_mlo.txt, версия от 05.10.2024] / X. Lan, R. Keeling ; NOAA Global Monitoring Laboratory, Scripps Institution of Oceanography. – URL: https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_annmean_mlo.txt (дата обращения: 22.10.2026).

5. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide: Growth rate / NOAA Global Monitoring Laboratory. – URL: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gr.html (дата обращения: 22.10.2026).

6. Etheridge, D. M. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO2 over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn / D. M. Etheridge, L. P. Steele, R. L. Langenfelds [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1996. – Vol. 101, no. D2. – P. 4115–4128. – DOI 10.1029/95JD03410.

7. Hofmann, D. J. A new look at atmospheric carbon dioxide / D. J. Hofmann, J. H. Butler, P. P. Tans // Atmospheric Environment. – 2009. – Vol. 43, no. 12. – P. 2084–2086. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2008.12.028.

8. Friedlingstein, P. Global Carbon Budget 2023 / P. Friedlingstein, M. O'Sullivan, M. W. Jones [et al.] // Earth System Science Data. – 2023. – Vol. 15, no. 12. – P. 5301–5369. – DOI 10.5194/essd-15-5301-2023.

9. Friedlingstein, P. Global Carbon Budget 2024 / P. Friedlingstein, M. O'Sullivan, M. W. Jones [et al.] // Earth System Science Data. – 2025. – Vol. 17, no. 3. – P. 965–1039. – DOI 10.5194/essd-17-965-2025.

10. Ballantyne, A. P. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years / A. P. Ballantyne, C. B. Alden, J. B. Miller [et al.] // Nature. – 2012. – Vol. 488, no. 7409. – P. 70–72. – DOI 10.1038/nature11299.

11. Bacastow, R. B. Modulation of atmospheric carbon dioxide by the Southern Oscillation / R. B. Bacastow // Nature. – 1976. – Vol. 261, no. 5556. – P. 116–118. – DOI 10.1038/261116a0.

12. Keeling, C. D. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980 / C. D. Keeling, T. P. Whorf, M. Wahlen, J. van der Plicht // Nature. – 1995. – Vol. 375, no. 6533. – P. 666–670. – DOI 10.1038/375666a0.

13. Betts, R. A. El Niño and a record CO2 rise / R. A. Betts, C. D. Jones, J. R. Knight [et al.] // Nature Climate Change. – 2016. – Vol. 6, no. 9. – P. 806–810. – DOI 10.1038/nclimate3063.

14. Le Quéré, C. Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement / C. Le Quéré, R. B. Jackson, M. W. Jones [et al.] // Nature Climate Change. – 2020. – Vol. 10, no. 7. – P. 647–653. – DOI 10.1038/s41558-020-0797-x.

15. Raupach, M. R. Global and regional drivers of accelerating CO2 emissions / M. R. Raupach, G. Marland, P. Ciais [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. – 2007. – Vol. 104, no. 24. – P. 10288–10293. – DOI 10.1073/pnas.0700609104.

16. Peters, G. P. Rapid growth in CO2 emissions after the 2008–2009 global financial crisis / G. P. Peters, G. Marland, C. Le Quéré [et al.] // Nature Climate Change. – 2012. – Vol. 2, no. 1. – P. 2–4. – DOI 10.1038/nclimate1332.

17. WMO Greenhouse Gas Bulletin. No. 20: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023. – Geneva : World Meteorological Organization, 2024.

18. Harris, C. R. Array programming with NumPy / C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt [et al.] // Nature. – 2020. – Vol. 585, no. 7825. – P. 357–362. – DOI 10.1038/s41586-020-2649-2.