

УДК 18.11.19
Н. И. Керимов

Вопросы моделирования и оптимизации CO₂ в индустриально-аграрных регионах

Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана,
г. Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация. Рассмотрены вопросы моделирования и оптимизации эмиссии CO₂ в индустриально-аграрных регионах. Построена упрощенная комбинированная модель эмиссии CO₂ в атмосферу. Оптимизация построенной модели по методу безусловной вариационной оптимизации позволило выработать рекомендации по достижению минимального объема эмитируемого в атмосферу углекислого газа.

Ключевые слова: атмосфера, эмиссия, оптимизация, моделирование, углеродистый газ

Введение

Как отмечается в работе [1], скорость изменения концентрации CO₂ в атмосфере отражает баланс существующий между антропогенной составляющей эмиссии углерода и динамикой различных наземных и океанических процессов в результате которого эмитируется или удаляется CO₂. Долговременная эволюция этого баланса будет определять в основном скорость изменения климата из-за антропогенной деятельности, а также необходимость стабилизировать концентрацию CO₂ на заданном уровне. В последние годы было отмечено существенное увеличение глобального баланса углерода за счет значительного увеличения антропогенной эмиссии, а также изменений степени поглощения CO₂ на земельных и океанических просторах.

Согласно [2], увеличение концентрации CO₂ в атмосфере теоретически было отмечено в течение 1950-х годов, в частности в трудах научного форума «Международный Геофизический год». Экспериментальное подтверждение этого явления в 1960–70-х годах привело к тому, что единственной причиной увеличения концентрации CO₂ стали считать сжигание ископаемого минерального топлива. К 2010-му году измерения концентрации CO₂ в атмосфере проводилось на более чем 100 станциях, расположенных по всему миру.

Как отмечается в [3], метеорологические измерения, проводимые начиная с 1860 г. показывают, что изменение средней температуры за 100 лет составило 0.8 °C ± 0.2 °C. При этом концентрация CO₂ выросла с 280 ppm, что соответствует к уровню в течение доиндустриального периода до 370 ppm в начале 2000-х годов.

Согласно [4], единственным способом стабилизации концентрации CO₂ является уменьшение глобальной эмиссии CO₂ в атмосферу. В то время, как в течение 2000–2008 гг. эмиссии из-за сжигания ископаемого минерального топлива увеличились на 29%, эмиссии из-за землепользования остались на прежнем уровне. При этом, поглощение CO₂ в земельных и океанических просторах не оценено достаточно точно.

Как отмечается в [5], наиболее целесообразным уровнем стабилизации концентрации CO₂ в атмосфере является 450÷500 ppm. Существуют различные

модели динамики роста концентрации CO_2 в атмосфере. Например, в работе [2] построена региональная инверсная модель связанная с трехмерной атмосферной моделью переноса CO_2 . В работе [5] рассмотрена модель где учитывается возможно влияния климатических изменений на показатели эмиссии CO_2 . Здесь также учтены неопределенности, связанные со структурными показателями, а также неопределенности параметров модели. В работе [6], построена диагностическая модель, поясняющая некоторую паузу в росте концентрации CO_2 в атмосфере в течение 2000–2010 гг.

Согласно результатам исследования этой модели, несмотря на увеличение антропогенных эмиссии доля антропогенных эмиссии в атмосфере уменьшилась. Это явление в указанной модели поясняется ростом поглощения CO_2 растительностью и ослаблением влияния потепления на глобальную респирацию. Как отмечено в работе [7], CO_2 выполняет роль своеобразного удобрения для растительности, что отчетливо отображено на рис. 1 [7].

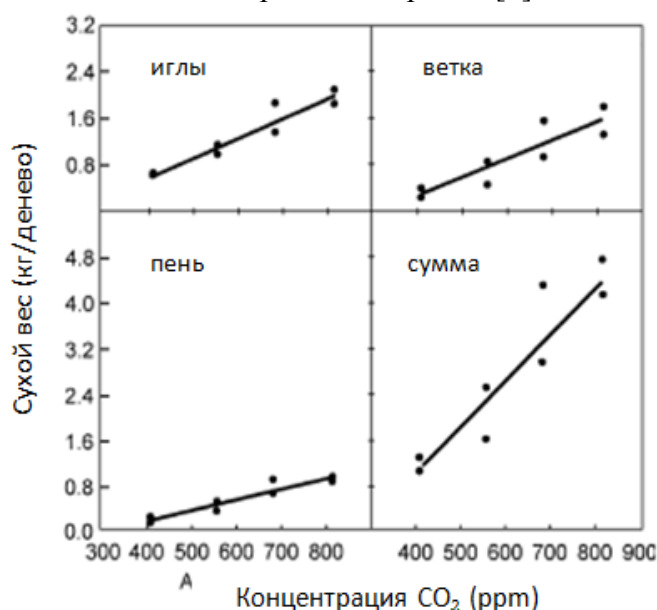


Рис. 1. Стимулирование роста растительности различных видов при увеличении концентрации CO_2 в атмосфере [7].

Составлено автором

Наиболее простая модель эмиссии CO_2 в атмосферу предложена в работе [8], согласно которой

$$\frac{d[\text{CO}_2]^{am}}{dt} = F_1 - O_1 + L_1 - B_1 \quad (1),$$

где $\frac{d[\text{CO}_2]}{dt}$ – скорость изменения концентрации CO_2 в атмосфере; F_1 – показатель эмиссии от сжигания ископаемого топлива; O_1 – степень оседания углерода в океанах; L_1 – степень эмиссии CO_2 из-за эмиссии в атмосферу при проведении антропогенных земле пользовательских работ; B_1 – показатель поглощения углерода растительностью.

Целью проводимых исследований является построение новой модели эмиссии CO₂ с учетом модели (1) и количества населения в регионах, где происходит процесс урбанизации.

Предлагаемый метод

Приняв F_1 , O , L и B показателями, не зависящими от t из выражения (1) получим

$$d[CO_2] = (F_1 - O + L - B) \cdot dt \quad (2)$$

или

$$\Delta CO_2 = [(F_1 + L) - (O + B)] \cdot \Delta t \quad (3),$$

где Δt – период урбанизации.

Далее будет считать, что показатели O и B не зависят от количества населения региона. В то же время примем, что F и L являются линейными функциями населения, т. е.

$$F \cdot \Delta t = k_1 P_1 ; k_1 = const \quad (4)$$

$$L \cdot \Delta t = k_2 P_2 ; k_2 = const \quad (5),$$

где P_1 – население региона, занимающееся в урбанизированной среде; P_2 – население, проживающее в сельской среде.

Из (4) и (5) получим

$$P_1 = \frac{F \cdot \Delta t}{k_1} \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{L \cdot \Delta t}{k_2} \quad (7).$$

Согласно [9] антропогенная составляющая атмосферного CO₂ находится в следующей зависимости от количества населения P

$$CO_2 = 7.72 \cdot P^{1.35} \quad (8),$$

где CO_2 – измеряется в ppm; P – в миллионах.

Примем

$$P = P_1 + P_2 \quad (9).$$

С учетом (6) ÷ (9) получим

$$CO_2 = 7.72 \cdot \left(\frac{F \cdot \Delta t}{k_1} + \frac{L \cdot \Delta t}{k_2} \right)^{1.35} \quad (10).$$

Введем на рассмотрение функциональную зависимость

$$L = f(F) \quad (11).$$

Функция (11) показывает взаимосвязь L и F в период урбанизации.

Выражение (7) с учетом (11) имеет вид

$$P_2 = \frac{f(F) \cdot \Delta t}{k_2} \quad (12).$$

Суммарное количество населения с учетом (6) и (12) определяется как

$$P = \frac{F \cdot \Delta t}{k_1} + \frac{f(F) \cdot \Delta t}{k_2} \quad (13).$$

Интегрируя (13) по $F = (0 \div F_{\max})$ получаем усредненную величину $P/\Delta t$ по всем участкам региона, в которых F принимает величину от 0 до F_m .

$$\frac{P}{\Delta t} = \frac{1}{F_{\max}} \int_0^{F_m} \left[\frac{F}{k_1} + \frac{f(F)}{k_2} \right] \cdot dF \quad (14).$$

При этом по определению $\frac{P}{\Delta t} = C$; $C = const$.

Подобно вышеизложенному, на основе выражения (10) можно составить следующий целевой функционал:

$$\frac{S}{\Delta t} = \frac{1}{F_m} \int_0^{F_m} 7.72 \cdot \left(\frac{F}{k_1} + \frac{f(F)}{k_2} \right)^{1.35} \cdot dF \quad (15).$$

С учетом выражений (14) и (15) составим функционал безусловной вариационной оптимизации

$$S_0 = \frac{S \cdot F_{\max}}{\Delta t} - \lambda \frac{P \cdot F_m}{\Delta t} \quad (16),$$

где λ – множитель Лагранжа.

С учетом (14), (15), (16) имеем

$$S_0 = \int_0^{F_m} 7.72 \left[\frac{F}{k_1} + \frac{f(F)}{k_2} \right]^{1.35} dF - \lambda \left[\int_0^{F_m} \left(\frac{F}{k_1} + \frac{f(F)}{k_2} \right) dF - C \right] \quad (17),$$

где λ – множитель Лагранжа.

Согласно уравнению Эйлера–Лагранжа искомая оптимальная функция $f(F)$ должна удовлетворять условию

$$\frac{d \left\{ 7.72 \left[\frac{F}{k_1} + \frac{f(F)}{k_2} \right]^{1.35} - \lambda \cdot \left[\left(\frac{F}{k_1} + \frac{f(F)}{k_2} \right) - C \right] \right\}}{df(F)} \quad (18)$$

из (18) получим

$$\frac{7.72 \cdot 1.35}{k_2 \cdot \left[\frac{F}{k_1} + \frac{f(F)}{k_2} \right]^{0.35}} - \frac{\lambda}{k_2} = 0 \quad (19).$$

Из (19) нетрудно получить следующее выражение

$$f(F) = k_2 \cdot \exp \left[\frac{\ln 10.42 - \ln \lambda - \ln \lambda}{0.35} \right] - \frac{F \cdot k_2}{k_1} \quad (20).$$

Для вычисления значения λ достаточно вписать (20) в выражение (14) и осуществив интегрирование получить выражение для вычисления этого множителя. Нетрудно убедиться, что при решении (20) вторая производная функционала (17) достигает отрицательной величины, т. е. достигается максимум целевого функционала (17).

Обсуждение

Таким образом, рассматриваемый сценарий динамического изменения F может быть истолкован в 2-х вариантах. В первом случае допускается разделение рассматриваемого региона на многочисленные участки, в которых

F изменяется от нуля до F_{max} . Во втором варианте регион рассматривается в режиме временного развития, где в течение определенного временного интервала интегрирования F растет от нуля до F_{max} . При этом оптимальная функция (20) обеспечивает выделение максимального количества CO₂ в атмосферу. Следовательно, эвристически ясно, что для достижения противоположного эффекта, т. е. достижения минимальных объема эмитируемого в атмосферу CO₂ следует избежать взаимно — инверсного характера изменения F и L_1 выполняя при этом условие (14).

Выводы

Предложена упрощенная модель эмиссии CO₂ в атмосферу, являющаяся комбинацией моделей (1) и (8). Сформулирована и решена оптимизационная задача, в которой:

- а) Наложено интегральное ограничительное условие на степени участия населения региона в процессах эмиссии CO₂.
- б) Принято условие наличия функциональной связи между количествами лиц, вовлеченных в деятельности по сжиганию минерального ископаемого топлива и землепользованию.
- в) Вычисление вышеуказанной функциональной зависимости позволило определить условие достижения наилучшего результата.

Сформулируем основные выводы проведенного исследования:

1. Построена упрощенная комбинированная модель эмиссии CO₂ в атмосферу.
2. Оптимизация построенной модели по методу безусловной вариационной оптимизации позволило выработать рекомендации по достижению минимального объема эмитируемого в атмосферу углекислого газа.

Литература

1. Josef G. Canadell, Corinne Le Quere, Michael R. Rauphac, Christopher B. Field, Erik T. Buitnhuis, Philippe Ciais, Thomas J. Conway, Nathan P. Gillet, Houghton R. A., Gregg Marland. Contribution to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity and efficiency of natural sinks URL: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0702737104.
2. Charles D. Keeling, Stephen C. Piper, Timothy P. Whorf, Ralph F. Keeling. Evolution of natural and anthropogenic fluxes of atmospheric CO₂ from 1957 to 2003, *Tellus // Chemical and Physical Meteorology*. 2011. Vol. 63:1. Pp. 1–22. Doi:10.1111/j1600-0889.2010.00507.x.
3. Alan J. Thorpe. *Climate Change Prediction. A challenging scientific problem*. URL: https://www.iop.org/publications/iop/archive/file_52051.pdf
4. Corinne Le Quere, Michael R. Rauphac, Josef G. Canadell, Gregg Marland. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide // *Nature Geoscience*. URL: www.nature.com/naturegeoscience.
5. Chris D. Jones, Peter M. Cox, Chris Huntingford. Climate-carbon cycle feedbacks under stabilization: uncertainty and observational constraints // (Printed in Singapore. All right reserved) *Tellus*. 2006. Vol. 58B. Pp. 603–613.

6. Trevor F. Keenan, Colin Prentice I., Josep G. Canadell, Christopher A. Williams, Han Wang, Michael Raupach, James Collatz G. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake // Nature Communication: Received 24Mar 2016 Accepted 30 Sep 2016 Published 8 Nov 2019. Doi:10. 1038/ncomms13428.
7. Willie Soon. Sallie L. Baliunas, Arthur B. Robinson, Zachary W. Robinson. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide // Climate Research. 26 October 1999. Vol. 13. Pp. 149-164.
8. Gary Holian, Andrei P. Sokolov, Ronald G. Prinn. Uncertainty atmospheric CO₂ predictions from a parametric uncertainty analysis of a global ocean carbon cycle model. URL: https://globalchange.mit.edu/sites/default/files/MITJPSPGC_Rpt80.pdf
9. David Hofmann. The exponential increase in anthropogenic atmospheric carbon dioxide and its relation to human population growth. URL: https://ams.confex.com/ams/89annual/techprogram/paper_144105.htm

N. Kerimov

Issues of modeling and optimization of CO₂ in industrial-agricultural regions

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

Abstract. The issues of modeling and optimization of CO₂ emissions in industrial-agricultural regions are considered. A simplified combined model of CO₂ emission into the atmosphere was built. Optimization of the constructed model by the method of unconditional variational optimization made it possible to develop recommendations for achieving the minimum amount of carbon dioxide emitted into the atmosphere.

Keywords: atmosphere, emission, optimization, modeling, carbon gas

References

1. Josef G. Canadell, Corinne Le Quere, Michael R. Raupach, Christopher B. Field, Erik T. Buitnhuis, Philippe Ciais, Thomas J. Conway, Nathan P. Gillet, Houghton R. A., Gregg Marland. Contribution to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity and efficiency of natural sinks URL: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0702737104. (in English)
2. Charles D. Keeling, Stephen C. Piper, Timothy P. Whorf, Ralph F. Keeling. Evolution of natural and anthropogenic fluxes of atmospheric CO₂ from 1957 to 2003, Tellus // Chemical and Physical Meteorology. 2011. Vol. 63:1. Pp. 1–22. Doi:10.1111/j1600-0889.2010.00507.x. (in English)
3. Alan J. Thorpe. Climate Change Prediction. A challenging scientific problem. URL: https://www.iop.org/publications/iop/archive/file_52051.pdf (in English)
4. Corinne Le Quere, Michael R. Raupach, Josef G. Canadell, Gregg Marland. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide // Nature Geoscience. URL: www.nature.com/naturegeoscience.
5. Chris D. Jones, Peter M. Cox, Chris Huntingford. Climate-carbon cycle feedbacks under stabilization: uncertainty and observational constraints // (Printed in Singapore. All right reserved) Tellus. 2006. Vol. 58B. Pp. 603–613. (in English)
6. Trevor F. Keenan, Colin Prentice I., Josep G. Canadell, Christopher A. Williams, Han Wang, Michael Raupach, James Collatz G. Recent pause in the growth rate of

- atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake // Nature Communication: Received 24Mar 2016 Accepted 30 Sep 2016 Published 8 Nov 2019. Doi:10. 1038/ncomms13428. (in English)
7. Willie Soon, Sallie L. Baliunas, Arthur B. Robinson, Zachary W. Robinson. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide // Climate Research. 26 October 1999. Vol. 13. Pp. 149-164. (in English)
 8. Gary Holian, Andrei P. Sokolov, Ronald G. Prinn. Uncertainty atmospheric CO₂ predictions from a parametric uncertainty analysis of a global ocean carbon cycle model. URL: [https://globalchange.mit.edu/sites/default/files/MITJPSPGC_Rpt80.pdf/](https://globalchange.mit.edu/sites/default/files/MITJPSPGC_Rpt80.pdf) (in English)
 9. David Hofmann. The exponential increase in anthropogenic atmospheric carbon dioxide and its relation to human population growth. URL: https://ams.confex.com/ams/89annual/techprogram/paper_144105.htm/ (in English)

Поступила в редакцию 30.05.2020 г.