

# ОБРАЗОВАНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ТРОПОСФЕРЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Степанов И.Г.<sup>1</sup>, Дмитриев А.В.<sup>2</sup>, Бычков В.Л.<sup>3</sup>, Дьяков Ю.А.<sup>1</sup>, Голубков М.Г.<sup>1</sup>

1. Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва
2. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва
3. Физический факультет, МГУ, Москва

## Введение

Информация о распределении концентраций ионов в нижней атмосфере Земли на высотах до 40 км имеет большое теоретическое и прикладное значение, поскольку положительные и отрицательные ионы определяют электропроводность нижней атмосферы и существенно влияют на формирование заряда тропосферы и облаков [1]. Традиционно сведения о процессах, приводящих к накоплению и изменению сорта ионов, представляют значительный интерес для исследователей, использующих различные типы разрядов в плазмохимических технологиях. При оценке воздействия атмосферы на приборы, распространение радиоволн и т.д. возникают значительные трудности, так как свойства атмосферного воздуха постоянно изменяются.

В нижних слоях атмосферы основную роль при образовании однозарядных ионов играет естественная радиоактивная радиация от поверхности почвы, т.е.  $\gamma$ -излучение. Однако этот процесс протекает заметно ниже 500 м над Землей, где образованные заряженные частицы воздействуют на распределение слабого электрического поля. В диапазоне высот от 0 м до 6 км электрическое поле Земли убывает на порядок от величины порядка 130 В/м до 10-20 В/м, т.е. слабо влияет на столкновительные процессы электрон-ионной рекомбинации и прилипания электронов к молекулам кислорода. На высотах от 5 км до 25 км важнейшим процессом является ионизация воздуха космическими лучами (см. Рис. 1). Видно, что максимум  $Q$  находится на высоте 12 км, где определяющим фактором является ионизация воздуха космическими лучами. Кроме того, небольшое увеличение  $Q$  наблюдается вблизи поверхности Земли, что обусловлено  $\gamma$ -излучением от поверхности почвы.

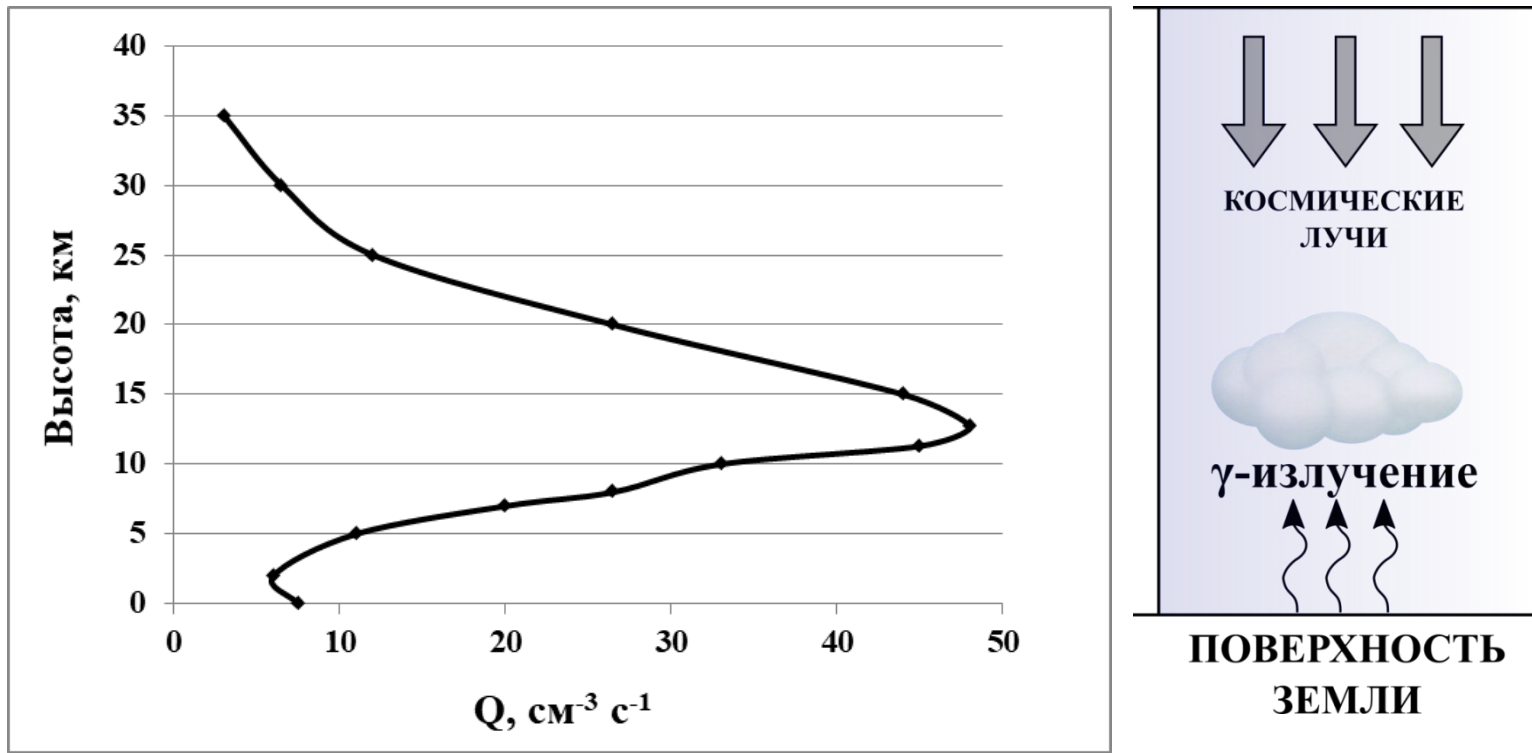


Рис. 1. Зависимость полной скорости ионизации воздуха от высоты над поверхностью Земли.

В данной работе, являющейся логическим продолжением статьи [2], посвященной образованию ионов в сухом воздухе, рассматривается образование ионов во влажном воздухе. Целью работы является определение высотной зависимости концентраций положительных и отрицательных ионов в тропосфере в условиях спокойной геомагнитной обстановки. Актуальность исследования обусловлена важной ролью тропосферных ионов в формировании электрических свойств ионосферы, управления процессами формирования слоистых грозовых облаков и искусственного стимулирования выпадения осадков.

## Кинетические процессы в тропосфере

Для решения задачи разработана кинетическая модель, включающая 55 компонентов и 161 реакцию, и проведены расчеты с использованием программного пакета KINET, в котором реализован алгоритм решения кинетических уравнений для компонентов ионизированной плазмы с учетом альтитудной зависимости их концентраций и температуры. В Таблице 1 представлены основные реакции, протекающие в тропосфере.

Таблица 1. Константы скорости k основных кинетических процессов в тропосфере.

|                                                                      |                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $e + O_2 + H_2O = O_2^- + H_2O$                                      | $k = 2.6 \cdot 10^{-30} \cdot T_e^{-1} \cdot \exp(-0.052/T_e) \text{ см}^6/\text{с}$ |
| $O_2^- + H_2O + M = O_2 \cdot H_2O +$                                | $k = 19 \cdot 10^{-29} \text{ см}^6/\text{с}$                                        |
| $O_2 \cdot H_2O + O_2 + H_2O = O_2^-(H_2O)_2 + O_2$                  | $k = 50 \cdot 10^{-29} \text{ см}^6/\text{с}$                                        |
| $H^+ \cdot H_2O + H_2O + H_2 = H^+(H_2O)_2 + H_2$                    | $k = 500 \cdot 10^{-29} \text{ см}^6/\text{с}$                                       |
| $O_2^+ + H_2O + M = H_2O_3^+ + M$                                    | $k = 2.5 \cdot 10^{-28} \cdot (300/T)^{0.75} \text{ см}^6/\text{с}$                  |
| $H_2O_3^+ + H_2O = H_3O^+ + OH + O_2$                                | $k = 3 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$                                         |
| $H^+(H_2O)_n + H_2O + M = H^+(H_2O)_{n+1} + M$                       | $k = 3 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T)^3 \text{ см}^6/\text{с}$                         |
| $H_{11}O_5^+ + O_2 = H_9O_4^+ + H_2O + O_2$                          | $k = 6.0 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$                                       |
| $H_3O^+ + NH_3 = NH_4^+ + H_2O$                                      | $k = 2.1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$                                        |
| $H_5O_2^+ + NH_3 = NH_4^+ \cdot H_2O + H_2O$                         | $k = 2.6 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$                                        |
| $NH_4^+ \cdot H_2O + NH_3 = NH_4^+ \cdot NH_3 + H_2O$                | $k = 1.2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$                                        |
| $H_7O_3^+ + NH_3 = NH_4^+ \cdot (H_2O)_2 + H_2O$                     | $k = 1.6 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$                                        |
| $NH_4^+ \cdot (H_2O)_2 + NH_3 = NH_4^+ \cdot NH_3 \cdot H_2O + H_2O$ | $k = 9 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$                                         |

Ионизация воздуха космическими лучами в диапазоне высот 5–35 км приводит к формированию плазмы, состоящей преимущественно из кластерных ионов, таких как  $NH_4^+ \cdot NH_3 \cdot H_2O$ ,  $H^+ \cdot (H_2O)_4$  и  $O_2^-(H_2O)_2$ . Максимальные концентрации ионов наблюдаются на высотах 10–15 км [3].

## Распределение концентраций ионов

В нижней тропосфере значительное влияние на состав положительных ионов оказывает присутствие молекул аммиака с концентрацией, превышающей  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Аммиак обладает высоким сродством к протону, которое на 40 ккал/моль больше, чем у воды. Поэтому реакции аммиака с кластерами протекают довольно быстро с выделением значительного количества энергии. В работах [4-5] было показано, что константы скорости этих реакций составляют порядка  $10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$ .

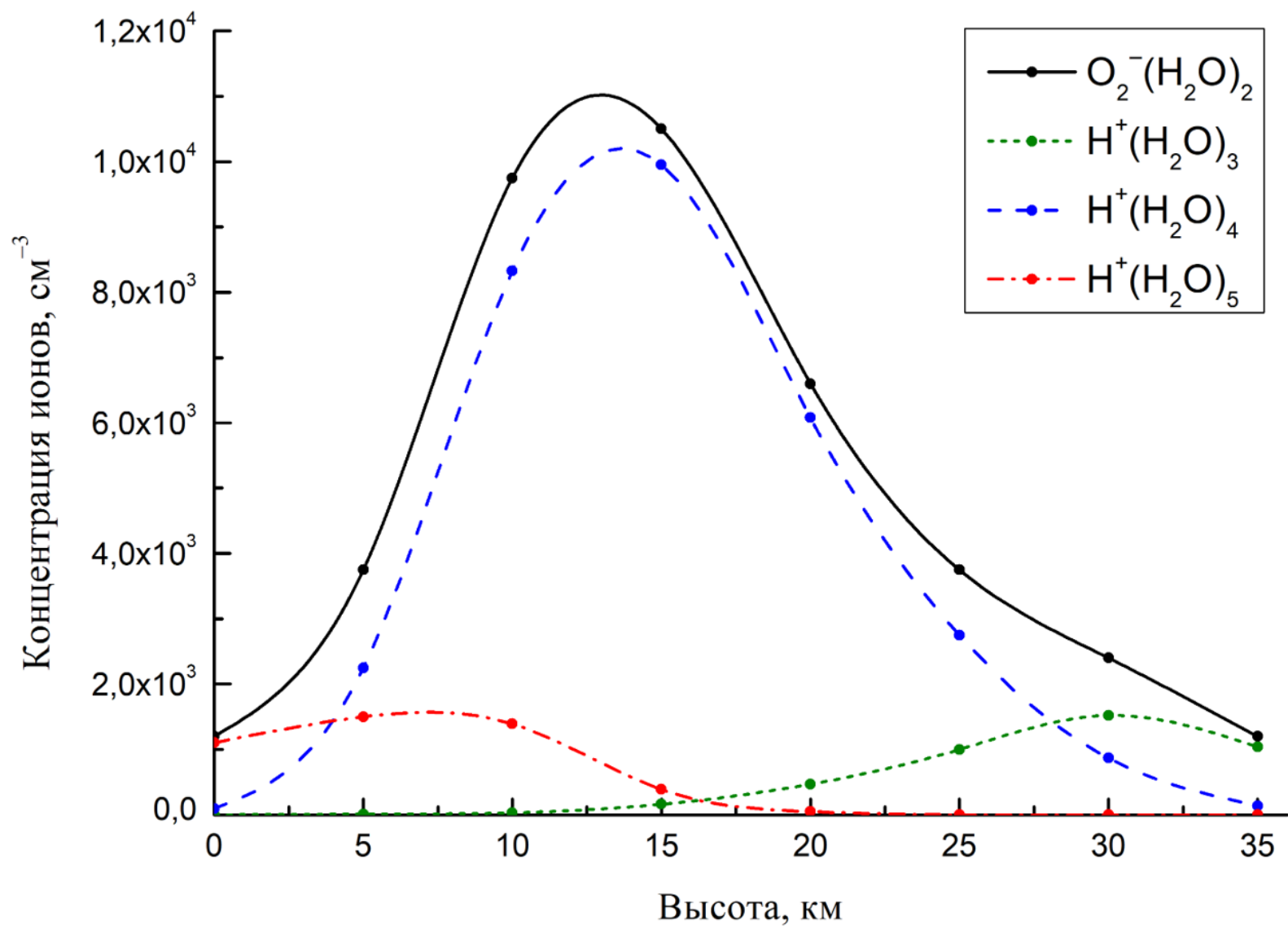
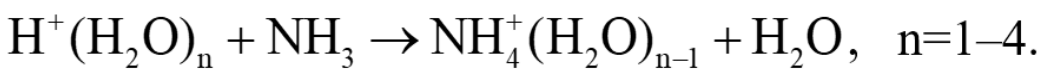


Рис. 2. Концентрации ионов  $H^+(H_2O)_3$ ,  $H^+(H_2O)_4$ ,  $H^+(H_2O)_5$  и  $O_2^-(H_2O)_2$  в зависимости от высоты на момент времени, когда их концентрации вышли на стационарное значение. Случай влажного воздуха без учета аммиака.

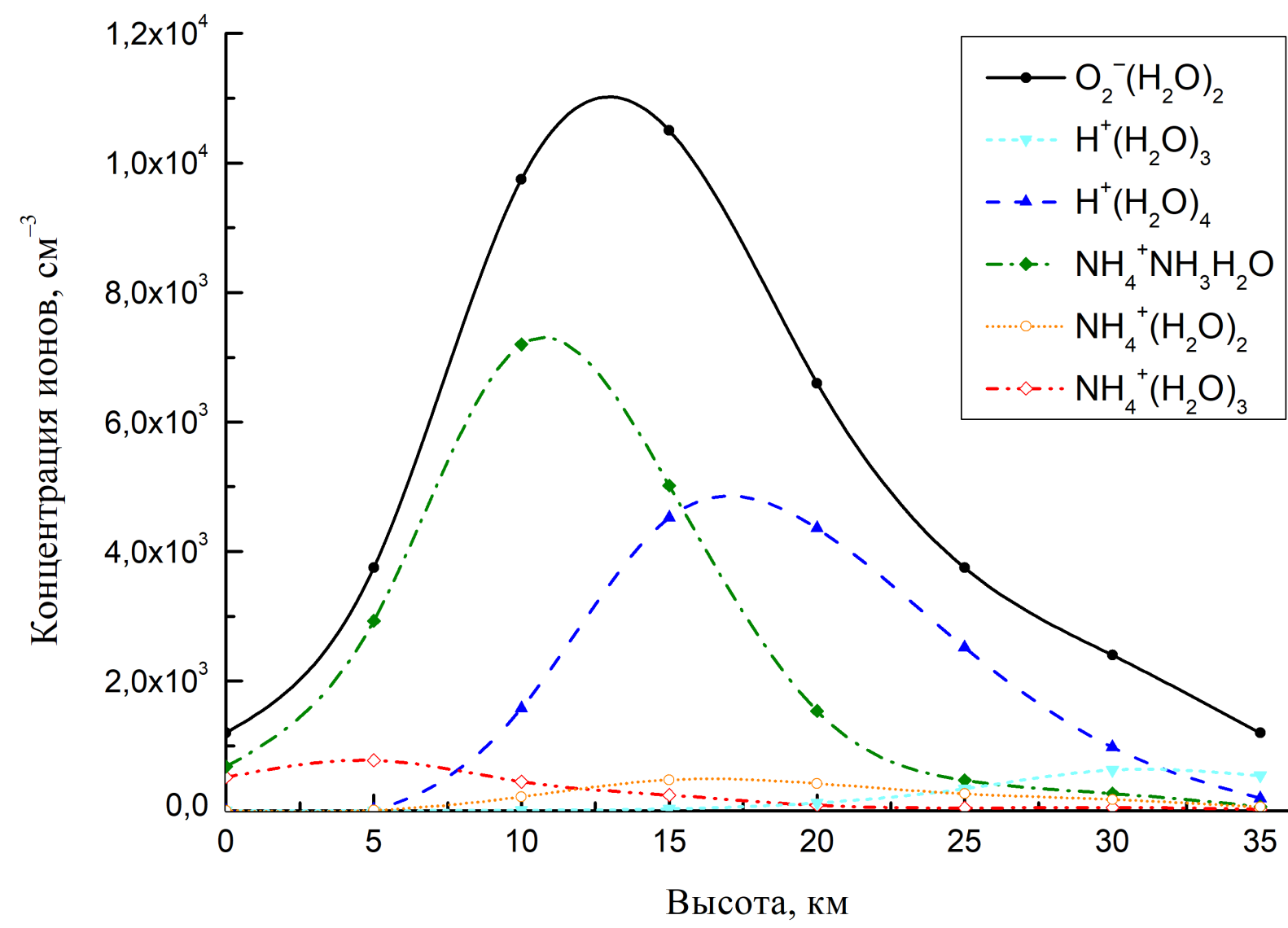


Рис. 3. Концентрации ионов  $H^+(H_2O)_n$ ,  $NH_4^+ \cdot NH_3 \cdot H_2O$ ,  $NH_4^+(H_2O)_n$  и  $O_2^-(H_2O)_2$  в зависимости от высоты на момент времени, когда их концентрации вышли на стационарное значение. Случай влажного воздуха с учетом аммиака.

## Практическая значимость исследования

Полученные данные о распределении концентрации ионов в тропосфере позволяют реализовать газовые разряды и искусственно стимулировать выпадение осадков без применения дорогостоящих химических реагентов, таких как, например, AgI. Данные по ионному составу тропосферы и распределению концентраций ионов по высоте позволяют правильно оценить высоту, на которой следует установить источник, и определить его мощность для эффективного управления процессом. Кроме того, интерес к рассмотренным в настоящей работе процессам обусловлен фундаментальными проблемами, связанными с глобальной спутниковой навигацией и дистанционным зондированием поверхности Земли.

## Финансовая поддержка

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 125012200611-5).

### Литература

1. Смирнов Б.М. Физика глобальной атмосферы. Парниковый эффект, атмосферное электричество, эволюция климата. Долгопрудный: Издательский Дом Интеллект, 2017.
2. Чэнсюнь Ю., Чжисизянь Л., Бычков В.Л. и др. Распределение концентраций положительных и отрицательных ионов в тропосфере // Хим. физика. 2022. Т. 41, № 10. С. 28–37.
3. Stepanov I.G., Bychkov V.L., Golubkov M.G. Formation of ions under the action of cosmic rays in humid air // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2024. V. 262. 106332: 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106332>
4. Fehsenfeld F.C., Ferguson E.E. Thermal energy positive ion reactions in a wet atmosphere containing ammonia. J. Chem. Phys. 1973. V. 59. P. 6272–6276. <https://doi.org/10.1063/1.1680006>.
5. Bohme D.K., Mackay G.I., Tanner S.D. An experimental study of the gas-phase kinetics of reactions with hydrated  $H_3O^+$  ions (n = 1-3) at 298 K. J. Am. Chem. Soc. 1978. V. 101. P. 3724–3730. <https://doi.org/10.1021/ja00508a003>