



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*Кафедра физической электроники*



## Концентрация атомарного кислорода в нижней ионосфере.

Проект составил: студент  
Физического факультета МГУ  
Маслов Тимур Александрович

Научный руководитель  
Доктор физ. – мат. наук  
с.н.с. В. Л. Бычков

Москва 2020

## 1. Введение

Вследствие облучения Земли космическими лучами возникла переходная область между атмосферой и космосом, называемая **ионосферой**. Этот сильно ионизированный слой играет важную роль в жизни нашей планеты, и знания о явлениях, происходящих в нём, представляют большой интерес для всего научного сообщества. Ионосфера Земли подвержена влиянию сложных физических и химических процессов, вызванных поглощением солнечного света, динамическими процессами в нижних слоях атмосферы, а также сейсмической и вулканической активностью [11-13]. Примеры таких процессов - электрические токи, сильные атмосферные возмущения, электромагнитные возмущения в различных спектральных диапазонах, оптическая и плазменная неоднородности, повышенные уровни радиоактивности [15]. Все эти явления определяют ионный и молекулярный состав ионосферы. Кроме того, микроволновое излучение высоковозбужденных частиц ионосферы, сопровождающее процессы солнечной активности, определяет характер **магнитных бурь**, тем самым отрицательно влияя на биосферу Земли. **Знание природы влияющих факторов** позволяет нам использовать их в качестве **индикаторов катастрофических процессов**, а также создавать соответствующие системы мониторинга.

**На необходимость проводить исследования указывает ещё и значительное расширение деятельности человека в ионосфере**, что ведёт к возникновению новых рисков. Эти риски связаны с развитием пилотируемых и беспилотных орбитальных систем, авиации с использованием высот средней атмосферы и новыми методами связи. [16] Экспериментальные и теоретические исследования состояний ионосферы, а также физико-химических процессов, происходящих в них, необходимы для обеспечения **надежной работы Глобальной навигационной спутниковой системы в различных частотных диапазонах**. В последние годы большое

внимание уделялось совершенствованию систем спутниковой связи и навигации, использующих транс - ионосферные каналы данных. Это привело к необходимости разработки специальной экспериментальной методики, которая направлена на дальнейшее изучение структуры ионосферы для установления физических причин задержки сигналов GPS. При исследованиях структуры и динамики ионосферы измерялась групповая задержка и фаза спутникового сигнала, а также общее содержание электронов в воздухе (число  $e^-$  между двумя точками вдоль трубки длиной 1 метр с квадратным сечением). Были созданы карты распределения общего содержания электронов с высоким временным и пространственным разрешением. В монографии (Афраимович и Перевалова, 2006 год [14]) описаны существующие методы исследования ионосферы, основанные на существенном расширении нашего понимания физической структуры ионосферы и ее динамических неравномерностей, которые связаны с геомагнитными возмущениями и возмущениями солнечной активности. **Надежность систем связи и навигации, использующих ионосферные каналы связи, зависит от знания поведения ионосферы** как в спокойных, так и в нестандартных условиях.

Кроме того, с точки зрения разработки плазменных устройств для новой авиационной и космической техники на высотах тропосферы и нижней мезосферы важно знать **характеристики пробоя на высотах в диапазоне 90–100 км**. Интерес к ионизационным процессам на больших высотах вызван также возможностью протекания пробойных процессов в воздухе у поверхности летательных аппаратов вследствие электризации или появления атмосферных разрядов, таких как спрайты, струи и т.д. [17] Параметры плазмы чрезвычайно важны также для спутниковой навигации и дистанционного зондирования поверхности Земли

**Цель настоящей работы – определение поведения концентрации атомов кислорода на высотах 90 – 100 км** с помощью уравнения химической

кинетики плазмы и экспериментальных данных о фотодиссоциации и диссоциации под действием быстрых частиц в ионосфере.

Такая информация необходима для **создания моделей плазмы ионосферы** [7] и известных моделей атмосферы

## 2. Механизмы фотодиссоциации

Поглощение фотонов в ультрафиолетовой и видимой частях спектра атмосферными молекулами может вызвать их переходы в возбужденное состояние с последующей *фотодиссоциацией*. Этот процесс является основным источником атомарного кислорода в атмосфере. При решении атмосферных проблем необходимо оценивать количественно скорость фотодиссоциации молекулы А:  $\frac{d n(A)}{d t} = -J(A) * n(A)$ , где  $n(A)$  – концентрация молекул ( $\text{см}^{-3}$ ),  $J(A)$  – вероятность или коэффициент фотодиссоциации ( $\text{с}^{-1}$ ). Величина  $J(A)^{-1}$  есть время жизни молекулы А относительно фотодиссоциации.

Для интервала длин волн  $d\lambda$  коэффициент фотодиссоциации молекулы А пропорционален потоку фотонов  $q_\lambda d\lambda$ , сечению поглощения  $\sigma(A, \lambda)$ , квантовой эффективности  $\varepsilon(A, \lambda)$ . Когда рассматривается вся область солнечного спектра от  $\lambda_x$  до  $\lambda_y$ , где может происходить диссоциация молекулы А, коэффициент J определяется следующим образом:

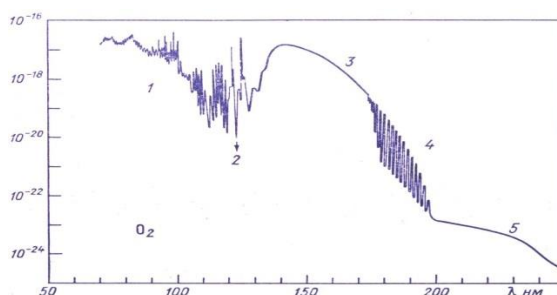
$$J(A, z, \chi) = \int_{\lambda_x}^{\lambda_y} \varepsilon(A, \lambda) \sigma(A, \lambda) q_\lambda(A, z, \chi) d\lambda.$$

Атомы кислорода, которые играют существенную роль в химии средней атмосферы. С аэрономической точки зрения наиболее важными являются переходы  $X^3\Sigma_g^- - A^3\Sigma_u^+$ , которые приводят к образованию систем Герцберга, и переходы  $X^3\Sigma_g^- - B^3\Sigma_u^+$ , которые создают систему Шумана – Рунге.

Последняя характеризуется группой полос в области 175 – 204 нм и континуумом в области 137 -183 нм. Первый из этих переходов представляет собой преддиссоциацию, т.е. переход в запрещённое состояние  $^3\Pi_u^-$ , и приводит к образованию двух атомов кислорода в основном состоянии  $^3P$ . Во втором случае ( $\lambda < 175$  нм) один из атомов образуется в возбужденном состоянии  $^1D$ . В области более коротких волн ( $\lambda < 137$  нм) появляются слабые

диффузные полосы, но они чередуются с серией окон, которые позволяют некоторым длинам волн проникать в атмосферу относительно глубоко. Одно из таких окон случайно совпадает с солнечной линией Лайман –  $\alpha$ , которая играет важную роль в атмосферной химии. На *рисунке 1* представлен общий вид спектрального распределения сечения поглощения для  $O_2$ . Излучение с  $\lambda < 102,8$  нм может производить фотоионизацию  $O_2$ .

$\sigma, \text{см}^2$



**Спектральное распределение сечения поглощения молекулярного кислорода [1]**

**Рис.1** 1.Ионизационный континуум. 2. Лайман – альфа. 3. Континуум Шумана – Рунге. 4. Полосы Шумана – Рунге. 5. Континуум Герцберга.

### 3. Получение коэффициента фотодиссоциации в области полос и континуума Шумана – Рунге.

Рассмотрим спектральную область полос Шумана – Рунге. В этой области происходит преддиссоциация молекулярного кислорода, которая является важным источником атомов  $O(^3P)$ . Сечение поглощения изменяется примерно на 5 порядков величины между 175 и 205 нм. Вычисление скорости фотодиссоциации требует подробной информации о сечении поглощения. На *рисунке 2* приведено изменение сечения поглощения для  $O_2$  от  $57000 \text{ см}^{-1}$  (175,4 нм) до  $49000 \text{ см}^{-1}$  (204,1 нм), вычисленное Кокартсом [4] с разрешением  $0,5 \text{ см}^{-1}$ .

**Сечение поглощения для молекулярного кислорода**

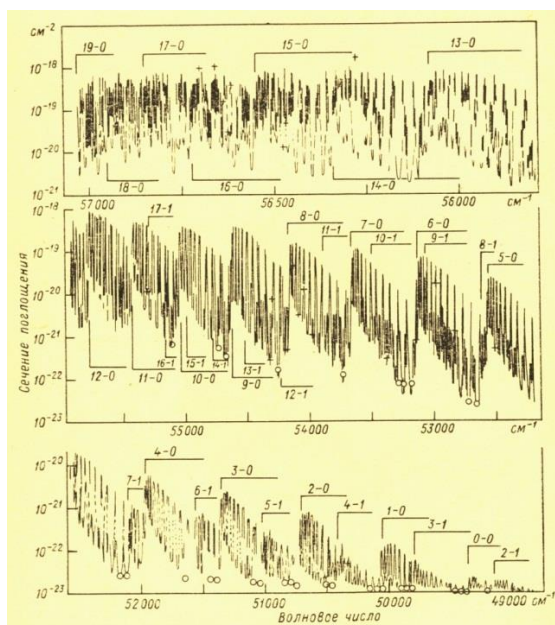


Рис.2 [5]  $0,5 \text{ см}^{-1}$  – разрешение, соответствующее ширине вращательных линий  $O_2$  в большинстве полос.

Коэффициент фотодиссоциации  $O_2$  в полосах Шумана – Рунге получают путём вычислений, при которых учитывается детальная вращательная структура системы полос. Николе [6] вывел, например, следующие выражения для термосферы, где общее количество  $O_2$  в столбе не превышает  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  при низкой солнечной активности с точностью более 10%:

$$J(O_2) = 1,1 * 10^{-7} * \exp[-1,97 * 10^{-10} N^{0,522}] \text{ с}^{-1} N < 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

Вклад каждой полосы в общую величину поглощения меняется с высотой, общее изменение скорости фотодиссоциации в зависимости от солнечной активности уменьшается с уменьшением высоты. [6] Выражение для среднего изменения  $J$  с солнечной активностью, предложенное Николе [6], имеет вид  $J(O_2, \text{ активное Солнце}) = (1,11 \pm 0,04) * J(O_2, \text{ спокойное Солнце})$

Несмотря на сильное поглощение ( $\sigma = 1,5 * 10^{-7} \text{ см}^2$  для  $\lambda=140 \text{ нм}$ ), континуум Шумана – Рунге играет значительную роль в ионосфере. Каждый акт фотодиссоциации приводит к образованию двух атомов кислорода – одного в состоянии  $^3P$ , а другого – в возбужденном состоянии  $^1D$ . Как показано в работах [7,8] для длин волн, больших 160 нм, становится

заметной зависимость сечения поглощения от температуры, что, главным образом, вызвано перераспределением населенности вращательных уровней. Континуум Шумана – Рунге стыкуется с системой полос Шумана – Рунге на  $\lambda=175$  нм и накладывается на полосы вплоть до 183 нм. Континуум вносит вклад в минимум сечения поглощения в указанной системе полос. Согласно Аккерману [9] коэффициент фотодиссоциации в континууме Шумана – Рунге составляет  $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  при нулевой оптической толщине и лишь  $10^{-8} \text{ с}^{-1}$  на 90 км при Солнце в зените. В области длин волн, меньших 130 нм наиболее существенный вклад в фотолиз  $O_2$  даёт **солнечная линия Лайман –  $\alpha$**  ( $\sigma = 10^{-20} \text{ см}^2$ ). Соответствующая скорость фотодиссоциации составляет при нулевом коэффициенте пропускания атмосферы примерно  $3 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ . Хорошо видно, что минимум сечения поглощения приходится на солнечную линию Лайман – альфа (121нм) (Рисунок 3)

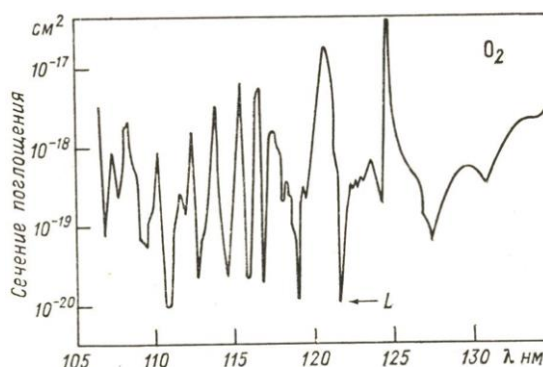
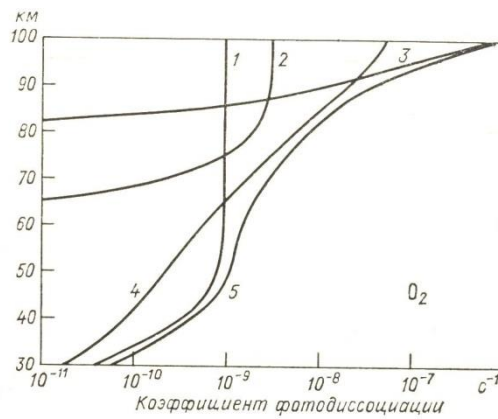


Рис.3 Спектральное распределение сечения поглощения в диапазоне 105-135 нм, согласно [10]

#### 4. Вклад каждого спектрального интервала в скорость фотодиссоциации молекулярного кислорода.

Ниже приведен вклад каждого из спектральных интервалов в скорость фотодиссоциации  $O_2$  при Солнце в зените. (Рисунок 4) Скорость фотодиссоциации на каждой высоте разная. Первостепенную роль в диссоциации кислорода на высотах 90 -100 км играет континуум Шумана – Рунге (длины волн 1760-1350 Ангстрем).



[Здесь и далее в таблицах] Учтён вклад: 1. Континуума Герцберга. 2. Линии Лайман – Альфа 3. Континуума Шумана - Рунге 4. Полосы Шумана – Рунге 5. Всех 4х компонент.

**Рис.4** Вклад каждого спектрального интервала в скорость фотодиссоциации  $O_2$  при солнце в зените. [1]

Небольшой вклад в фотодиссоциацию на высоте 90 км вносит область полос Шумана – Рунге (1925–1760 Ангстрем). На высоте 100 км на диссоциацию могут влиять также коротковолновое излучение (1020 Ангстрем). Этим можно объяснить то, что рассчитанная нами концентрация атомарного кислорода в 2-4 раза больше, чем измеренная Р151Н.[3] Линия же Лайман – альфа играет второстепенную роль в этой области ионосферы. Однако она может быть важна для диссоциации других атмосферных компонент.

## 5. Расчёт высотной концентрации атомов кислорода

Зная скорость фотодиссоциации, мы можем определить высотные концентрации атомов кислорода. Мы будем использовать константы скорости фотоионизации из [1]. Чтобы учесть гибель атомов кислорода, мы можем выбрать основные каналы рекомбинации этих атомов на высотах 90-105 км, используя известную работу [2], а именно:

*.Реакции рекомбинации атомов кислорода обратно в молекулу:*

(с участием молекулы кислорода)  $O + O + O_2 \rightarrow O_2 + O_2$  Константа реакции -  $K_{rec\ o1} = 2.45 \cdot 10^{-31} \cdot T^{-0.63} \text{ см}^6/\text{с}$ . [2]

(с участием молекулы азота)  $O + O + N_2 \rightarrow O_2 + N_2$  Константа реакции -  $K_{rec\ o2} = 2.76 \cdot 10^{-34} \cdot \exp(720/T) \text{ см}^6/\text{с}$ . [2]



В условиях квазистационара (скорость изменения концентрации атомарного кислорода считаем равной нулю)

$$\frac{dn(O)}{dt} = K_{d_1} * n(O_2) - K_{rec_{O_1}} * n(O) * n(O_2) - K_{rec_{O_2}} * n(O) * n(O) * n(N_2) = 0 ;$$

$$n(O) = \sqrt{\frac{K_{d_1} * n(O_2)}{K_{rec_{O_1}} * n(O_2) + K_{rec_{O_2}} * n(N_2)}}$$

Обозначения:  $n(O)$  – концентрация атомарного кислорода;  $n(O_2)$  – концентрация молекулярного кислорода;  $n(N_2)$  – концентрация молекулярного азота;  $K_{d_1}$  – коэффициент фотодиссоциации

**Значение концентрации  $n[см^{-3}]$  основных атмосферных компонент на высотах 90 - 100 км [1]**

Таблица. 1

Высота, м	$n[см^{-3}]$	$n[см^{-3}][O_2]$	$n[см^{-3}][N_2]$	T, К
90	$6,98 * 10^{13}$	$1,4 * 10^{13}$	$5,5 * 10^{13}$	187
95	$2,9 * 10^{13}$	$0,6 * 10^{13}$	$2,3 * 10^{13}$	188
100	$1,19 * 10^{13}$	$0,24 * 10^{13}$	$0,9 * 10^{13}$	195

**Значение коэффициента фотодиссоциации  $K_{d_1}$  ( $с^{-1}$ ) на высотах 90-100 км**

Таблица. 2

Высота, км	$K_d(1)$	$K_d(2)$	$K_d(3)$	$K_d(4)$	$K_d(1-4)$
90	$10^{-9}$	$5 * 10^{-9}$	$1,5 * 10^{-8}$	$3,3 * 10^{-8}$	$6,2 * 10^{-8}$
95	$10^{-9}$	$5 * 10^{-9}$	$10^{-7}$	$6 * 10^{-8}$	$2,2 * 10^{-7}$
100	$10^{-9}$	$5 * 10^{-9}$	$8,7 * 10^{-7}$	$7 * 10^{-8}$	$8,8 * 10^{-7}$

**Значение концентрации атомарного кислорода на высотах 90-100 км при разном вкладе в коэффициент фотодиссоциации**

Таблица. 3

Высота, км	$n[см^{-3}] [O] (1)$	$n[см^{-3}] [O] (2)$	$n[см^{-3}] [O] (3)$	$n[см^{-3}] [O] (4)$	$n[см^{-3}] [O]$
90	$1,29 * 10^{11}$	<b><math>2,88 * 10^{11}</math></b>	$5 * 10^{11}$	$10^{12}$	<b><math>1,02 * 10^{12}</math></b>
95	$1,32 * 10^{11}$	<b><math>2,95 * 10^{11}</math></b>	$1,32 * 10^{12}$	$1,97 * 10^{12}$	<b><math>1,9 * 10^{12}</math></b>
100	$1,4 * 10^{11}$	<b><math>3,13 * 10^{11}</math></b>	$3,89 * 10^{12}$	$4,2 * 10^{12}$	<b><math>4,18 * 10^{12}</math></b>

## 6. Сравнение полученных значений с экспериментальными данными из Аренсоийо и Саут - Уиста

Полученные значения для линии Лайман – альфа подтверждаются результатами наблюдений, которые представлены в работе Дикинсона(1980).[3] (Рисунок 5) Измерения проводились, соответственно, в летние и зимние месяцы 1975 – 1977 годов.

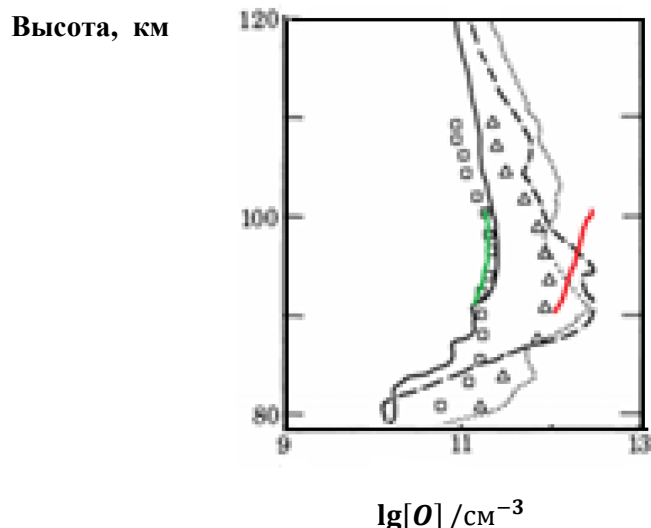


Рис.5 **Зелёная кривая** – Вклад линии Лайман – альфа в образование атомов кислорода; **Красная кривая** – Сумма всех 4х вкладов в образование атомов кислорода. Концентрация атомарного кислорода в

Ареносийо, Испания:  $\triangle$  - 4 января 1976 года  $\square$  - 21 января 1976 года ;

Саут – Уисте, Шотландия:  $\bullet$   $\bullet$  - 11 февраля 1977 года

————— - 29 ноября 1974 года    ———— - 28 ноября 1975 года

[CIRA] и P151H – названия ракет, содержащих фотометры и ионизационные камеры, позволяющие измерить ослабление(поглощение) атмосферой солнечного излучения, в частности, Лайман – альфа (121,6 нм). Отправлены в полёт в ноябре 1975.

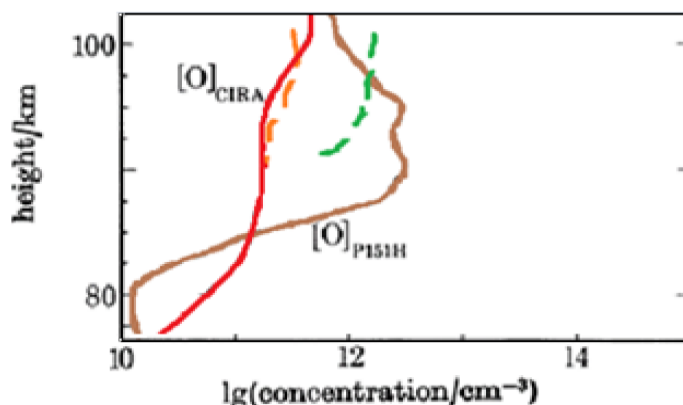


Рис.6 Концентрация молекулярного кислорода в Саут –Уисте 29 ноября 1975 года при измерении ослабления излучения линии Лайман – альфа.

Рассчитанная  $n[O]$ , обусловленная 1) **Жёлтая линия** – вкладом линии Лайман – альфа; 2) **Зелёная линия** – суммой 1 – 4 вкладов; Экспериментальные измерения с помощью ракет: 3) **Красная линия** – CIRA. 4) **Темная линия** – P151H.

## 7. Выводы и литература

На основе представленной аналитической модели фотодиссоциации, учитывающие процессы диссоциации молекулы кислорода определены

концентрации атомов кислорода на высотах 90-100 км. Результаты расчетов показывают хорошее согласие с измерениями и удовлетворительное согласие с расчетами по известным моделям атмосферы. [3] В качестве будущей задачи планируется рассмотреть роль процессов диссоциации молекул кислорода быстрыми частицами в сравнении с ролью процессов фотодиссоциации в наработке атомов кислорода.

[1]. Guy Brasseur and Susan Solomon «Aeronomy of the middle atmosphere»

[2]. Kostinsky A.Y., Matveev A.A// Plasma Sources Sci. Technol. 1992. V. 1. № 3. P. 207.

[3] P. H. G. Dickinson, «The determination of the atomic oxygen concentration and associated parameters in the lower ionosphere»

[4] Kockarts, G., ed. G. Fiocco, Reidel Publ. Co. (Dordrecht, Holland), 160-176,1971.

[5] Miescher, E., J. Quant. Spectros. Rad. Trans., 2, 421, 1962.

[6] Nicolet, M., Photodissociation of molecular oxygen in the terrestrial atmosphere: Simplified numerical relations for the spectral range of the Schumann – Runge bands, ,, in press, 1984.

[7] Hudson, R. D., V. L. Carter and J. A. Stein, An investigation of the effect of temperature on the Schumann – Runge absorption continuum of oxygen, 1580 – 910 Å, , 71, 2295, 1966.

[8] Lean, J.L., J. Geophys. Res., 86, 211, 1981.

[9] Ackerman, M., , D. Reidel (Dordrecht, Holland) 1971 pp. 149 – 159

[10] Watanabe, K. and M. Zelikoff, J. Opt. Soc. Amer., 43, 753, 1953.

[11] Gennady V. Golubkov In The Atmosphere and Ionosphere: Elementary Processes, Monitoring and Ball Lightning. Eds. V. Bychkov, Springer. 2014. P.1-68.

[12] Bychkov V., Golubkov G., Nikitin A.. Preface. The Atmosphere and Ionosphere: Elementary Processes, Monitoring and Ball Lightning. Eds.

[13] N.V. Ardelyan, V.L. Bychkov, , Elementary Processes, Monitoring and Ball Lightning. Eds. V. Bychkov, G. Golubkov, A. Nikitin. Springer. 2014. P.69-111.

[14]Afraimovich EL, Perevalova NP (2006) GPS-monitoring of the Earth upper atmosphere. SC RRS SB RAMS, Irkutsk.

[15] Golubkov, G.V., Manzhelii, Fundamentals of Radiochemical // Russian Journal of Physical Chemistry. 2016. Vol 10, Issue 1. P. 77–90.

[16] В. М. Сорокин, Г. В. Голубков // Научный журнал «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СЕРВИСА» №1 (26) 2008 стр. 47 – 52

[17] Н. В. Арделян, В. Л. Бычков, Г. В. Голубков, З. М. Г. Голубков, К. В. Космачевский // ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, 2018, том 37, № 7, с. 59–64// DOI: 10.1134/S0207401X18070038