

УДК 533.9.07

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
С КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОЗОнового СЛОЯ**

*Ю. А. Епишкин, Г. С. Мишин, В. П. Пугачев, Ю. А. Соколов, В. А. Сухнев*  
Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, г. Королев, Россия

*Н. В. Кравцов, Н. И. Наумкин, В. В. Фирсов*  
Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*Разработаны методика и аппаратура экспериментального моделирования процессов, происходящих при взаимодействии лазерного излучения в диапазоне длин волн  $\lambda = 761-768$  нм с кислородом воздуха в присутствии солнечного излучения. Приведены результаты первого этапа исследований, продемонстрировавшие достаточно интенсивное поглощение лазерного излучения в указанных условиях.*

Многолетние исследования отечественных и зарубежных ученых показали, что после 70-х годов нынешнего столетия содержание озона в атмосфере Земли непрерывно убывает. В настоящее время скорость убывания составляет  $\sim 1\%$  в год. Непосредственной причиной убывания озона является непрерывное увеличение в

атмосфере таких продуктов производственной деятельности человечества, как фреоны, оксиды азота и углерода, гидроксиды. К настоящему времени этих веществ в атмосфере содержится столько, что процесс убывания озона будет продолжаться еще десятки лет даже при условии, что их выброс полностью прекратится в ближайшем будущем. Дефицит озона в атмосфере приводит к увеличению на поверхности Земли интенсивности ультрафиолетового излучения Солнца.

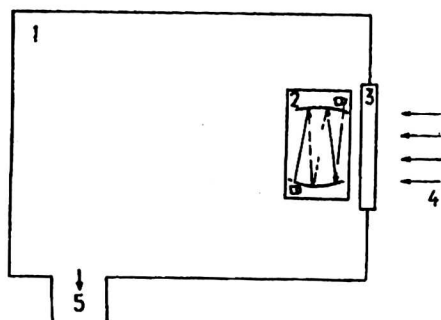
Исследования ученых показали, что увеличение интенсивности ультрафиолетового излучения ослабляет иммунную систему человека и животных, нарушает их генетический код, приводит к возрастанию количества заболеваний органов зрения и кожных покровов. Интенсифицируется гибель простейших организмов, являющихся кормом для морских и сухопутных животных, уменьшается урожайность зерновых и бобовых. Эти процессы уже идут в настоящее время и в будущем будут усиливаться. Оценки показывают, что при сохранении темпа убывания озона уже в 2030-х годах возможно такое накопление ущерба, которое в дальнейшем приведет к гибели биосферы.

В настоящее время учеными предложены методы очистки атмосферы от озоноразрушающих веществ химическими и электрофизическими способами (микроволновое и лазерное излучение). Анализ показывает, что эти способы экологически небезопасны, а затраты на их осуществление значительно превышают возможности цивилизации. Рассматриваются также способы активного восстановления озонового слоя. Предлагается использование электрического разряда, лазеров, работающих на жестком ультрафиолете (длина волны менее 240 нм) или на частотах, соответствующих линиям поглощения кислорода. Проведенные исследования показали, что наиболее перспективным с точки зрения затраты энергии является предложенный отечественными учеными способ перевода стратосферного кислорода в синглетное состояние при помощи лазерного излучения с длинами волн 762 и 1267 нм [1, 2]. Синглетный кислород переходит в озон под действием солнечного излучения со значительно большими значениями длины волны, чем это имеет место в природных условиях при переходе кислорода непосредственно в озон под действием жесткого ультрафиолетового излучения Солнца ( $\lambda = 115\text{--}242$  нм). Так как интенсивность солнечного излучения при  $\lambda > 240$  нм возрастает с увеличением длины волны, то скорость распада возбужденных молекул в десятки раз выше скорости распада невозбужденных. Эффективность такого способа восстановления озонового слоя в значительной мере определяется эффективностью перевода атмосферного кислорода в синглетное состояние с помощью лазеров с соответствующей длиной волны.

Проведенные в ЦНИИмашиностроения Российского Космического агентства исследования показали, что при условии достижения рассчитанной автором работы [2] производительности рассматриваемого способа в реальных условиях, составляющей 2,68 кг озона на один киловатт-час лазерного излучения, может быть создана система, восполняющая убыль озона в размере  $\sim 1\%$  в год от его полного содержания в атмосфере. Эта система состоит из космических кораблей с мощными лазерами и источниками их питания на борту, обращающихся вокруг Земли по эллиптическим орбитам на высотах  $\sim 300$  км. Для разработки такой системы необходимо 5—7 лет. Естественно, что перед началом разработки необходимо проведение в наземных условиях экспериментальных исследований, подтверждающих работоспособность способа, и определение его производительности.

В связи с этим в ЦНИИмашиностроения, используя экспериментальную базу института, совместно с НИИЯФ МГУ был разработан метод прямого моделирования рассматриваемого способа восстановления озона в наземных условиях. Давление воздуха, соответствующее тем высотам, на которых должно осуществляться воздействие лазерного излучения, обеспечивается барокамерами с механической и диффузионной системами откачки. Имитация солнечного излучения,

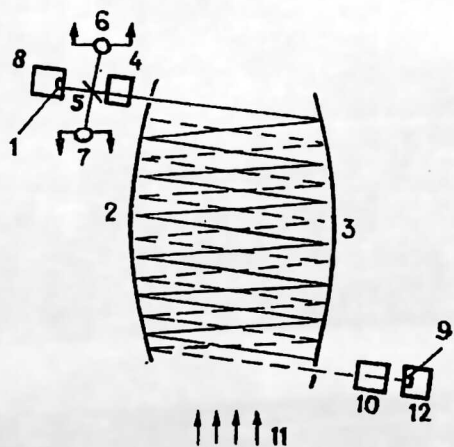
содержащего ультрафиолетовое излучение, осуществляется с помощью прибора ОС-80, создающего поток излучения с помощью кварцевой ксеноновой лампы высокого давления. Для ввода этого излучения в вакуумную барокамеру используется иллюминатор из кварцевого стекла, пропускающего излучение с длиной волны  $\lambda > 200$  нм. Имитатор солнечного излучения снабжен специальной диафрагмой, позволяющей получить поток излучения различной формы в поперечном сечении. Схема эксперимента приведена на рис. 1.



*Рис. 1. Схема эксперимента:*  
 1 — барокамера; 2 — лазерное устройство;  
 3 — кварцевый иллюминатор;  
 4 — излучение имитатора Солнца;  
 5 — система откачки

Для исследования процесса взаимодействия лазерного излучения с длиной волны 762 нм с воздушной средой в барокамеру помещалось специальное устройство, позволяющее резко увеличить длину взаимодействия лазерного излучения и солнечного излучения с газом. Необходимо отметить, что в связи с небольшим сечением поглощения лазерного излучения кислородом при небольших давлениях последняя задача моделирования рассматриваемого процесса в барокамерах с ограниченным объемом (длиной) представляется достаточно сложной.

Принципиальная схема устройства показана на рис. 2. Для увеличения длины взаимодействия использована оптическая линия задержки (ОЛЗ), образованная двумя сферическими зеркалами с высоким (> 99 %) коэффициентом отражения при длине волны 762 нм [3, 4].



*Рис. 2. Схема лазерного устройства:*  
 1, 9 — полупроводниковые лазеры, изготовленные фирмой "ФТИ-ОПТРОН" (г. Санкт-Петербург); 2, 3 — сферические зеркала оптической линии задержки; 4, 10 — формирующие объективы; 5 — светоделительная пластина, 6, 7 — фотоприемники, 8, 12 микрохолодильники; 11 — направление распространение "солнечного" света

Излучение полупроводникового лазера 1 после прохождения объектива 4 поступает в ОЛЗ через небольшое отверстие в зеркале и после многократных отражений от зеркал выходит снова через то же отверстие. Светоделительная пластина направляет часть входящего в ОЛЗ и часть выходящего потока излучения на фотоприемники.

Сравнение сигналов (их разность или отношение), снимаемых с фотоприемников, позволяет регистрировать величину поглощения лазерного излучения в ОЛЗ.

Отметим, что светоделительная пластина направляет на фотоприемники только несколько процентов падающего на нее излучения.

Конструкция ОЛЗ рассчитана таким образом, чтобы при заданном продольном габарите макета (равном диаметру сферических зеркал) обеспечить максимальную длину взаимодействия лазерного излучения с воздухом внутри зоны, захватываемой потоком "солнечного" света, направляющей собою последовательность оптических линз с фокусным расстоянием  $f = R/2$  ( $R$  — радиус кривизны сферического зеркала ОЛЗ).

В этом случае можно получить разностное уравнение, описывающее координаты пересечения луча  $r$  на сферических зеркалах:

$$r_{n+1} + (1/f - 2)r_n + r_{n-1} = 0,$$

где  $r_n$  — расстояние от оптической оси до траектории луча на  $n$ -й линзе.

Результаты решения этого уравнения совместно с требованием вывода излучения через входное отверстие после  $m$  отражений от зеркал ОЛЗ при радиусе кривизны последних 10 м позволяет найти расстояние между зеркалами, при котором луч каждого лазера испытывает 14 отражений (включая входное отверстие) от зеркал ОЛЗ, проходя каждый отрезок пути дважды. В этом случае длина луча в ОЛЗ определяется следующей формулой:

$$L = 2(m-1)l,$$

где  $m$  — число отражений луча от зеркал ОЛЗ (включая входное отверстие);  
 $l$  — база ОЛЗ ( $l = 152$  мм). Это дает общую длину луча в ОЛЗ  $L = 392$  см.

#### Техническая характеристика лазерного устройства

Число используемых лазеров .....	2
Мощность излучения, мВт .....	300 + 300
Длина волны излучения, нм .....	761—768
Ширина спектра излучения, нм .....	1,5—2,5
База ОЛЗ, мм .....	152
Габаритные размеры макета, мм .....	300x80x140
Коэффициенты отражения зеркал ОЛЗ, % .....	99,86
"Длина луча" каждого лазера в ОЛЗ, см .....	392

Лазерное устройство располагалось в вакуумной камере таким образом, чтобы плоскость, в которой происходит процесс многократных отражений лазерного луча, располагалась горизонтально внутри потока солнечного излучения, имеющего в поперечном сечении прямоугольную форму.

Экспериментальное исследование планировалось провести в несколько этапов. На первом этапе изучался процесс взаимодействия лазерного излучения с воздухом при атмосферном давлении в диапазоне длин волн от 761 до 768 нм. Изменение длины волны лазерного излучения обеспечивалось регулированием температуры  $T_{\text{ЛД}}$  лазерного диода 1 в пределах 14—34 °С. На рис. 3 приведена зависимость

длины волны излучения лазерного диода в максимуме от его температуры. Распределение интенсивности лазерного излучения по его длине волны для нескольких значений  $T_{\text{лд}}$  показано на рис. 4. Видно, что лазер излучает в таком диапазоне длин волн, что делает невозможным излучение тонкой структуры взаимодействия лазерного излучения с воздухом.

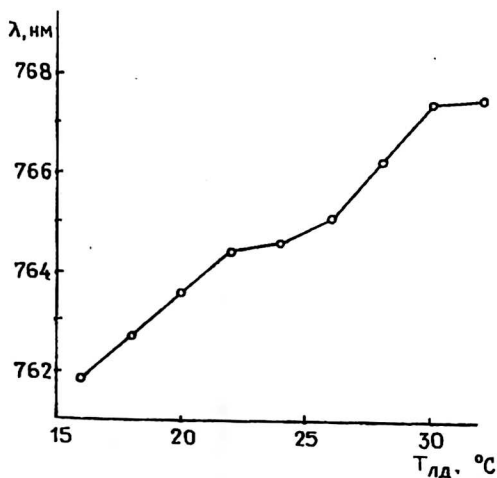


Рис. 3. Зависимость длины волны в максимуме полосы излучения от температуры лазерного диода  $T_{\text{лд}}$

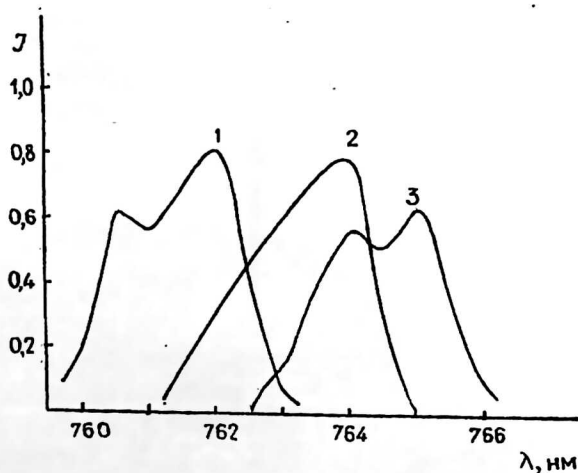


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения лазерного диода (в относительных единицах) от длины волны: 1 —  $T_{\text{лд}} = 16^\circ\text{C}$ ; 2 —  $T_{\text{лд}} = 20^\circ\text{C}$ ; 3 —  $T_{\text{лд}} = 26^\circ\text{C}$

С помощью светоделительной пластины 5 (см. рис. 2) отводилось  $\sim 5\%$  излучения, выходящего из лазерного диода. Интенсивность этого излучения определялась с помощью тока  $I_{\text{пр}}$ , возникающего в фотоприемнике 7. Та же пластина отводила  $\sim 5\%$  излучения, прошедшего все циклы отражения. Его интенсивность определялась при помощи тока  $I_{\text{отр}}$ , возникающего в фотоприемнике 6.

Введем следующие обозначения:

- $J_{00}$  — интенсивность излучения лазерного диода;  
 $J_0$  — интенсивность лазерного диода после прохождения пластины;  
 $r_3$  — коэффициент отражения зеркальной поверхностью лазерного излучения;  
 $\chi$  — доля падающего лазерного излучения, отражаемого на фотоприемник 7;  
 $L$  — общая длина лазерного луча с учетом всех отражений;  
 $n$  — число отражений;  
 $J_{\text{пр}}$  — интенсивность излучения лазера, отражаемого пластиной на фотоприемник 7;  
 $J_{\text{отр}}$  — интенсивность прошедшего между зеркалами лазерного излучения, отражаемой пластиной на фотоприемник 6 (см. рис. 2);  
 $K$  — коэффициент поглощения лазерного излучения воздухом.

Процесс прохождения лазерного излучения через прибор описывается следующими соотношениями:

$$J_0 = (1 - \chi) J_{00}; \quad J_{\text{пр}} = \chi J_{00}; \quad J_{\text{отр}} = J_0 (r_3)^n e^{-kL}.$$

Отсюда следует, что

$$J_{\text{пр}}/J_{\text{отр}} = \frac{e^{kL}}{(1 - \chi)(r_3)^n}.$$

Логарифмируя последнее соотношение после преобразований имеем:

$$K = \frac{\ln(J_{\text{пр}}/J_{\text{отр}}) + \ln[(1 - \chi)(r_3)^n]}{L}.$$

Так как имеют место очевидные соотношения  $J_{\text{пр}} = A_1 I_{\text{пр}}$  и  $J_{\text{отр}} = A_2 I_{\text{отр}}$ , где  $A_1$  и  $A_2$  — числовые коэффициенты, то формула для  $K$  приобретает следующий вид:

$$K = \frac{\ln(\xi I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}) + \ln[(1 - \chi)(r_3)^n]}{L}.$$

Здесь  $\xi = A_1/A_2$ .

Для использованного прибора входящие в выражение для  $K$  константы имеют следующие значения:

$$\chi = 0,05; \quad r_3 = 0,9982; \quad n = 27; \quad L = 400 \text{ см}; \quad \xi = 1.$$

Результаты экспериментального исследования в виде зависимости  $K$  (в  $\text{см}^{-1}$ ) от температуры лазерного диода  $T_{\text{ла}}$ , определяющей (см. рис. 3) длину волны максимума полосы генерации излучения, приведены на рис. 5 для давления воздуха  $P = 10^5$  Па, соответствующей нормальным условиям. Видно, что в рассматриваемом диапазоне длин волн поглощение лазерного излучения достаточно заметно, хотя и имеет немонотонный характер. Последнее, видимо, объясняется

особенностями тонкой структуры зависимости коэффициента поглощения кислорода от длины волны излучения, ранее теоретически исследованной в районе 762 нм в работе [5].

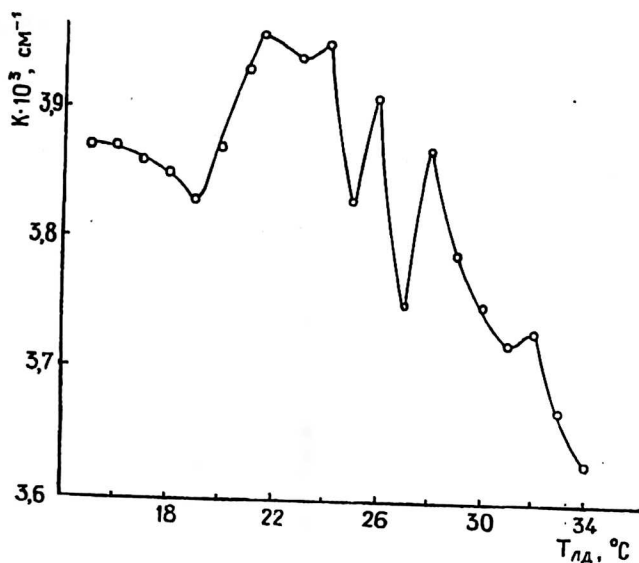


Рис. 5. Зависимость коэффициента поглощения кислородом лазерного излучения  $k$  ( $\text{см}^{-1}$ ) от температуры лазерного диода  $T_{\text{лд}}$

Предварительные эксперименты показали, что аналогичная качественная зависимость  $k$  от температуры диода сохраняется и при давлении  $P = 10^3$  Па, соответствующего давлению на высоте озонового слоя Земли.

Основной вывод, следующий из приведенных выше результатов, заключается в том, что прямым экспериментом показана возможность достаточно интенсивного поглощения лазерного излучения воздухом в диапазоне длин волн от 760 до 766 нм, где можно ожидать интенсивной наработки синглетного кислорода. Это позволит на следующих этапах работы перейти к непосредственному измерению концентрации синглетного кислорода, а также способному образовываться из него озона под действием излучения имитатора солнечного излучения. Соответствующая измерительная аппаратура дорабатывается в настоящее время.

Завершение всего цикла намеченных экспериментов даст объективную основу для подготовки технического предложения по использованию солнечной энергии для глобального восстановления озонового слоя, опираясь на достижения современной космической и лазерной техники.

## Литература

1. Старик А. М., Фаворский О. Н., Хабаров О. С., Амелин Б. Н. Как восстановить озоновый слой Земли // Вестник Российской Академии Наук, 1993. Т. 63, № 12. С. 1082–1089.
2. Старик А. М. О проблеме сохранения озонового слоя Земли при продолжающемся антропогенном загрязнении атмосферы // Прикладная физика, 1996. № 1. С. 11.
3. Кравцов Н. В., Наумкин Н. И. Генерация комбинационного излучения в случае длинной ВКР-активной среды // Квантовая электроника, 1976. № 12. С. 2612–2614.

4. Корниенко Л. С., Кравцов Н. В., Наумкин Н. И., Прохоров А. М. ОКГ на рубине с оптической линией задержки внутри резонатора: Докл. Академии Наук СССР 193. 1974. С. 1280—1282.
5. B u r c h E. D. and G r u y n a k D. A. Strengths, Widths and Shapes of the Oxygen Lines near  $13\,000\text{ cm}^{-1}$  (7620 Å) // Applied Optics, 1969. V. 8. No 7. P. 76.

## INVESTIGATION OF THE INTERACTION LASER RADIATION AND ATMOSPHERIC OXYGEN FOR THE PHYSICAL SIMULATION OF THE EARTH OZONE BELT RECOVERY

*Y. A. Epishkin, G. S. Mishin, V. P. Pugachev, Y. A. Sokolov, V. A. Sukhnev*

Central research institute for mechanical engineering, Korolev, Russia

*N. V. Kravtsov, N. I. Naumkin, V. V. Firsov*

Research institute for nuclear physics of Moscow state university of a name M. V. Lomonosov,  
Moscow, Russia

*Some methods and equipment for the experimental simulation of the interaction between laser radiation ( $\lambda = 761\text{—}768\text{ nm}$ ) and atmospheric oxygen in the presence of solar light are worked out. The results of the 1-st stage of investigations are presented in this article, with a demonstration of intensive laser radiation absorption including.*