



УДК 535.345.1
ГРНТИ 29.33.51

ПЕРСПЕКТИВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ОРУЖИЯ НА ОСНОВЕ ПРОСВЕТЛЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО КАНАЛА С ПОМОЩЬЮ ЗАВИХРЕННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*А.В. ИВАНОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Ю.Г. ПАСТЕРНАК, доктор технических наук
Воронежский государственный технический университет
Д.К. ПРОСКУРИН, кандидат физико-математических наук
Воронежский государственный технический университет*

Показано, что перспективным способом уменьшения потерь мощности оптических волн, передаваемых через атмосферу, является использование пространственно-неоднородной электромагнитной волны оптического диапазона с фазовым фронтом в виде плоской спирали. Завихренное оптическое излучение используется для того, чтобы за счет давления света на частицы воды сепарировать аэрозоль, создав конус, в котором концентрация капель будет существенно уменьшена. В отличие от известного способа просветления атмосферного оптического канала путем испарения частиц аэрозоля с помощью мощного лазерного излучения, предлагаемый способ является существенно менее энергозатратным, т.к. при перемещении частиц водного аэрозоля из области распространения основного лазерного излучения не происходит их испарения.

Ключевые слова: лазер; затухание лазерного излучения; лазерное оружие; электромагнитное поле; лазерная атмосферная связь; просветленные каналы передачи оптической энергии; манипулирование микрочастицами.

PERSPECTIVE OF THE LASER WEAPON ACTION EFFICIENCY IMPROVING BASED ON THE ATMOSPHERIC CHANNEL ENLIGHTENMENT BY SWIRLING LASER RADIATION

*A.V. IVANOV, Candidate of Technical Sciences
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
YU.G. PASTERNAK, Doctor of Technical Sciences
Voronezh state technical University
D.K. PROSKURIN, Candidate of Physical-mathematical Sciences
Voronezh state technical University*

It is shown that a promising way to reduce the power losses of optical waves transmitted through the atmosphere is the use of spatially inhomogeneous electromagnetic wave of the optical range with a phase front in a plane spiral. Swirling optical radiation is used to separate the aerosol by means of light pressure on water particles, creating a cone in which the concentration of droplets will be significantly reduced. In contrast to the known method of atmospheric optical channel clarification by evaporation of aerosol particles with the help of high-power laser radiation, the proposed method is significantly less energy-consuming, since when moving water aerosol particles from the region of propagation of the main laser radiation, their evaporation does not occur.



Keywords: laser; attenuation of laser radiation; laser weapons; electromagnetic field; laser atmospheric communication; enlightened channels of optical energy transmission; microparticle manipulation.

Одной из важных проблем, существенно ограничивающей возможности систем лазерной атмосферной связи, а также лазерного оружия (рисунок 1), является потеря мощности лазерного излучения в аэрозолях атмосферы (облака, дымка, туманы) в результате поглощения и рассеяния оптических волн частицами среды [1].



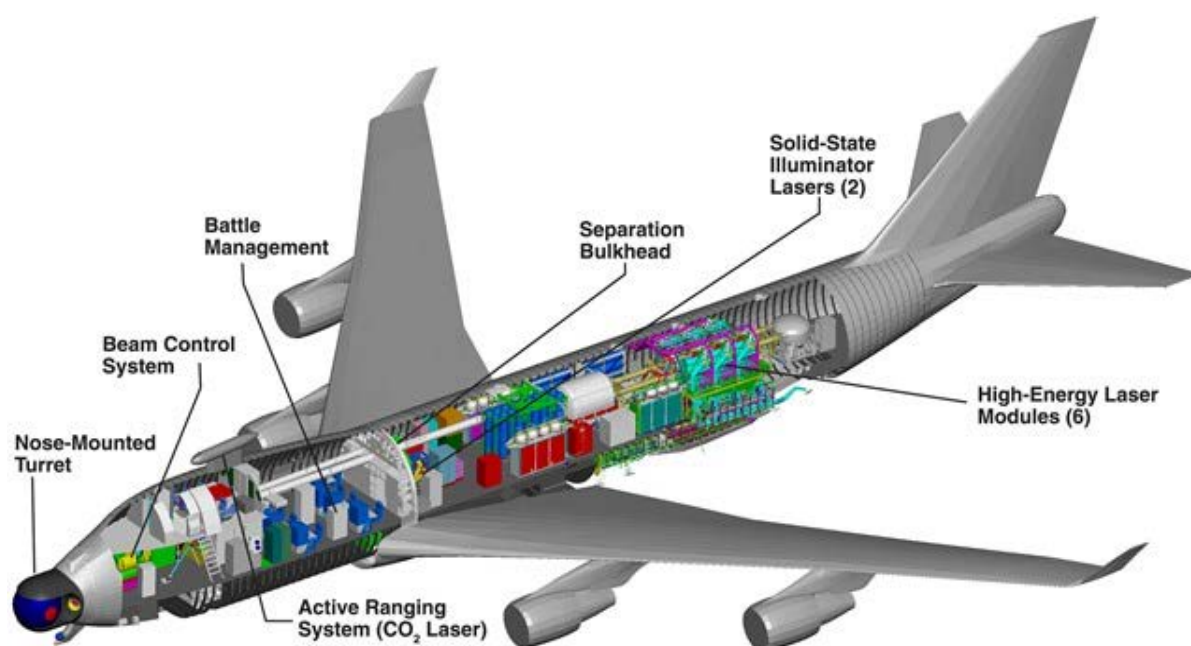
а) лазерная пушка для уничтожения сверхманевренных ракет (США)



б) блок позиционирования лазерного луча (США)



в) размещение блока позиционирования лазерного луча в носовой части самолета Boeing (США)



г) в системе лазерного оружия, разработанного корпорацией «Boeing» (США), используется CO₂ лазер с максимальной мощностью излучения более 100 кВт



д) перспективный боевой лазер HEL MD (High Energy Laser Mobile Demonstrator), США

Рисунок 1 – Экспериментальные образцы лазерного оружия

В случае солнечной погоды и практически нулевой влажности воздуха минимальное затухание лазерного излучения инфракрасного диапазона составляет десятые доли дБ/км. Для густых туманов и облаков затухание может составлять до нескольких сотен дБ/км [1].

В частности, сильное затухание лазерного излучения в туманах и облаках существенно затрудняет связь между наземной аппаратурой и спутниками.

Одним из способов уменьшения затухания оптического излучения в аэрозолях атмосферы является использование излучения мощных CO_2 лазеров для испарения частиц водного аэрозоля [2-14]. Однако у данного способа имеются существенные недостатки [5-14].

Самым существенным из них является необходимость использования мощного лазерного излучения, расходуемого на испарение частиц аэрозоля и взрывы капель воды [5, 6]. Кроме того, пары воды в образованном канале могут оказаться перенасыщенными, что приводит к эффекту вторичной конденсации [10].

При отсутствии на спутнике ядерной энергетической установки использование лазера с высокой мощностью излучения является весьма проблематичным, учитывая максимальный коэффициент полезного действия CO_2 лазеров порядка 10%.

Тем не менее, привлекательность использования лазерного излучения в системах атмосферной связи и в средствах лазерного оружия заставляет искать новые способы формирования просветленных каналов передачи оптической энергии по атмосферному каналу.

Для существенного снижения затрат энергии на просветление атмосферного оптического канала предлагается следующий способ [15]. Для эффективной передачи энергии лазерного излучения через атмосферу создается завихренное оптическое поле с синфазной поверхностью в виде плоской спирали, воздействующее на микрочастицы неоднородной среды и создающее в ней просветленный канал, в котором концентрация рассеивателей существенно снижена. Внутри образовавшегося просветленного канала, на той же или отличающейся длине волны, формируется лазерное излучение с плоским фазовым фронтом, энергию которого необходимо передать через неоднородную среду.



Предлагаемый в [15] способ просветления атмосферного оптического канала, основанный на использовании завихренного лазерного излучения, поясняется рисунком 2.

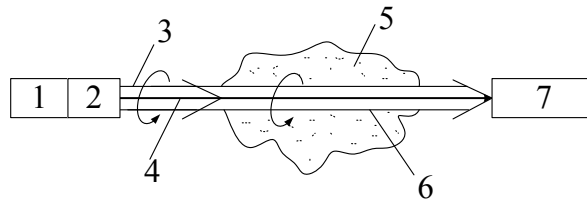


Рисунок 2 – Схема способа передачи энергии электромагнитного излучения через неоднородную среду

Способ реализуется следующим образом. Излучателем 1 (рисунок 2), формируется завихренное электромагнитное поле оптического диапазона 3, которое излучается в сторону приемника излучения 7 и создает в неоднородной среде распространения 5 канал просветления 6. Излучателем 2 формируется излучение оптического диапазона с плоским фазовым фронтом 4, которое проходит внутри образованного канала просветления в неоднородной среде и достигает приемника излучения 7 с минимальными потерями. В качестве приемника излучения 7 (рисунок 2) может быть объект, подлежащий уничтожению интенсивным лазерным излучением, формируемым излучателем 2.

Наиболее существенными силами взаимодействия оптического излучения с микрочастицами (воды, пыли, дыма и т.д.) являются следующие две силы [16]. Первая называется силой давления света Кеплера (сила рассеяния), она пропорциональна рассеивающей поверхности частицы и интенсивности света, ее направление совпадает с вектором Пойнтинга падающей оптической волны [16]. Вторая называется градиентной силой Лоренца, действующая на индуцированный диполь в градиенте интенсивности поля оптической волны [16]. Объекты с показателем преломления выше, чем окружающая среда, притягиваются к областям с высокой интенсивностью света [16].

Пионерами в исследовании взаимодействия электромагнитных волн (в частности, оптических волн) с частицами вещества являлись И. Кеплер, Д. Максвелл и П.Н. Лебедев [17].

А. Ашкином (Bell Laboratories) была разработана современная (1970 г.) теория взаимодействия лазерного излучения с материальными микрочастицами от отдельных атомов до частиц, размером в сотни микрометров, а также проведены многочисленные экспериментальные исследования, показавшие возможность и эффективность использования лазерного пинцета для манипулирования микрочастицами [18, 19]. В частности, Артуром Ашкином была впервые показана возможность манипулирования частицами воды – при использовании аргонового лазера мощностью 0.05 Вт максимальная скорость движения капель воды диаметром 5 микрометров в воздухе составила 2.5 мм/с.

В 1980-1984 гг. под руководством акад. А.М. Прохорова в лаборатории И.Н. Саркисяна (ФИАН, отделение «А») и в лаборатории В.А. Сойфера (Куйбышевский авиационный институт) проводились работы по формированию лазерных световых полей с заранее заданными свойствами с помощью плоских дифракционных оптических элементов [16]. Член-корр. РАН В.А. Сойфер и его коллеги – Скиданов Р.В., Котляр В.В., Хонина С.Н. и др. добились выдающихся результатов по манипулированию микрочастицами в неоднородных оптических полях, в т.ч. частиц, находящихся в вязких жидкостях [20-25].

В частности, в работе [25] описаны эксперименты по вращению в вязкой жидкости полистироловых шариков диаметром 5 мкм в Бесселевых пучках 10-го порядка лазерного излучения He-Ne лазера с длиной волны 0,633 мкм и мощностью излучения 0.1 Вт. Различные стадии движения полистироловых шариков через интервал в одну секунду представлены на рисунках 3 [25].

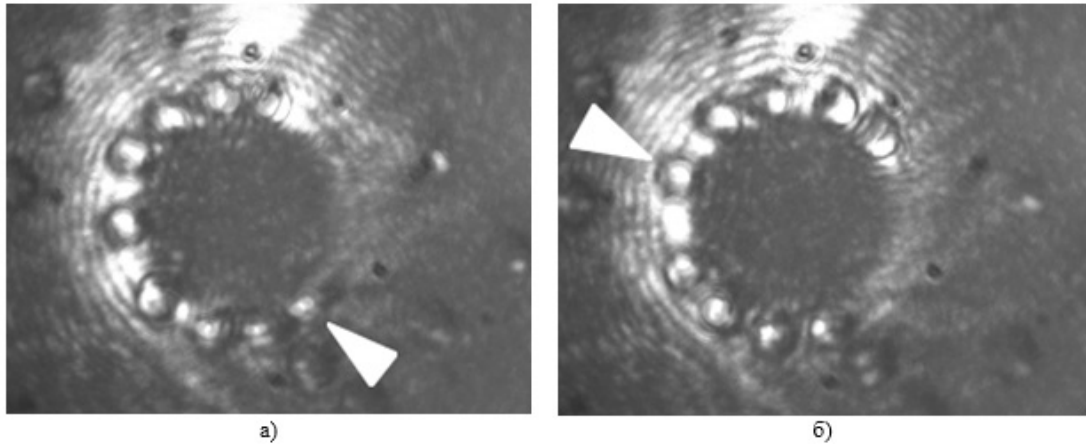


Рисунок 3 – Стадии движения полистироловых шариков в Бесселевых пучках 10-го порядка

Из рисунка 3 видно, что полистироловые частицы, находящиеся в вязкой жидкости, группируются в области максимальной напряженности поля завихренного лазерного излучения [25].

Способы формирования завихренного лазерного излучения и его действия на материальные объекты описаны также в работах [26-30]. Рисунком 4 а) иллюстрируется сущность способа преобразования моды TEM_{00} лазерного излучения в завихренную волну с винтовым фазовым фронтом с помощью дифракционной решетки. На рисунке 4 б) показано распределение интенсивности излучения завихренной оптической волны в поперечном сечении; на рисунке 4 в) показана группировка по кольцу коллоидных частиц, находящихся в вязкой жидкости [29].

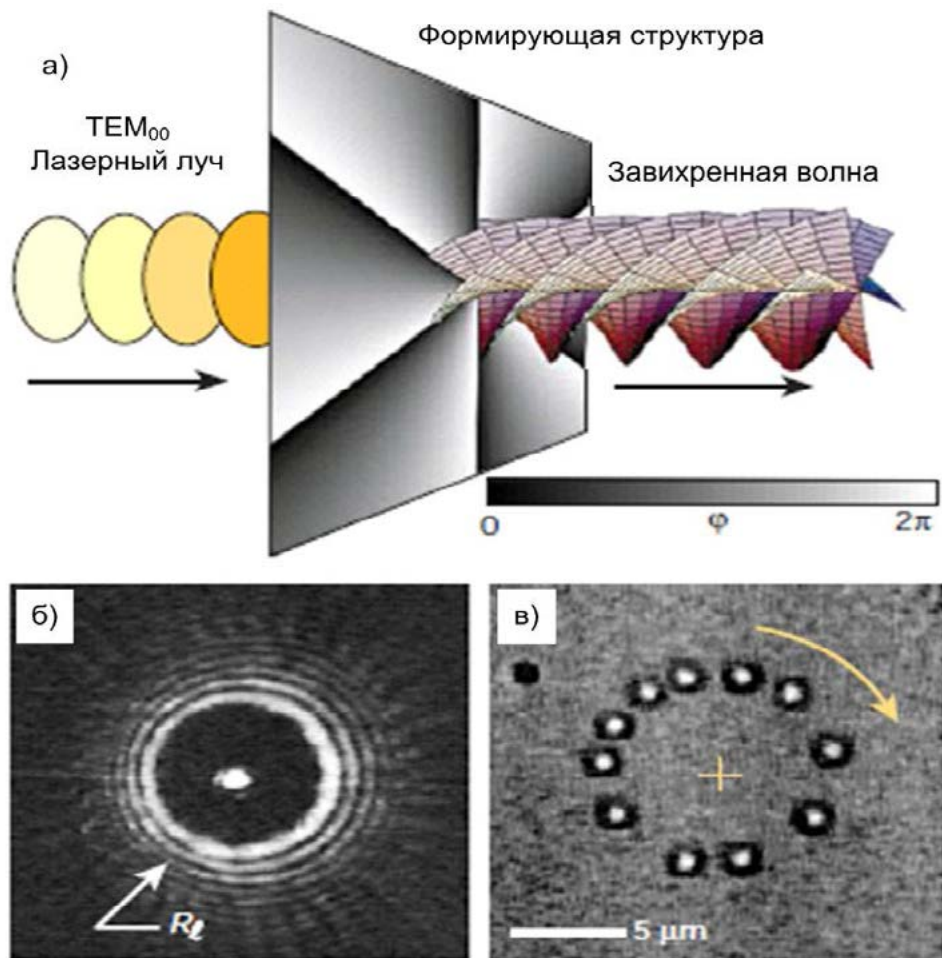


Рисунок 4 – Формирование завихренного излучения и группировка микрочастиц



Приведенные в [16-31] данные свидетельствуют о том, что использование завихренного лазерного излучения является эффективным средством для манипулирования микрочастицами, находящимися как в воздухе, так и в вязкой жидкости.

В настоящей статье предложено использовать завихренное лазерное излучение для просветления атмосферного канала передачи оптической энергии [15]. Выдвинута гипотеза о том, что преимущество предлагаемого способа [15] является значительное снижение затрат энергии на формирование канала с существенно уменьшенной концентрацией частиц аэрозоля и водного пара, по сравнению с традиционно используемым способом испарения аэрозоля с помощью мощного лазерного излучения [3-14] за счет того, что в предлагаемом способе частицы аэрозоля не испаряются, а смещаются в радиальном направлении, освобождая трассу распространения основного лазерного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М., Сов. радио, 1970, 496 с.
2. S.V. Artyshchenko, Yu.G. Pasternak, R.A. Chernov. Features of coherent preparation of medium for the control of its characteristics // Optical Technologies for Telecommunications 2015, Proc. of SPIE Vol. 9807, 980710. Proc. of SPIE Vol. 9807 980710-1-8. 2016. DOI: 10.1117/12.2231419.
3. Грачев Ю.Н., Стрелков Г.М. Изменение прозрачности водного аэрозоля под воздействием импульса излучения CO₂- лазера. Квантовая электроника, 1976, Т. 3, № 3, С. 621-625.
4. Зуев В.Е., Кузиковский А.В. Тепловое просветление водных аэрозолей лазерным излучением. Изв. вузов. Физика, 1977, № 11, с. 106-137.
5. Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях. Новосибирск, Наука, 1980, 182 с.
6. Баринов В.В., Сорокин С.А. Взрывы водных капель под действием оптического излучения. Квантовая электроника, 1973, № 2, с. 5-11.
7. Коровин В.Я., Иванов Е.В. Экспериментальное исследование воздействия излучения CO₂-лазера на капли воды. В кн.: III Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере: Тезисы докладов. Томск, 1975, с.93-94.
8. Гордин М.П., Соколов А.В., Стрелков Г.М. Ослабление излучения CO₂-лазера диффузионно испаряющимся водным аэрозолем. Радиотехника и электроника, 1975, т.20, № 11, с.2241-2249.
9. Землянов А.А., Колосов В.В., Кузиковский А.В. Распространение света при взрыве аэрозолей в лазерных пучках. ЖТФ, 1981, т.51, вып. 4, с.776-780.
10. Семенов Л.П. Просветление облачной среды при наличии конденсации пара. Труды ИЭМ, 1981, вып. 26(99), с.16-21.
11. Свиркунов П.Н., Седунов Ю.С., Семенов Л.П. Просветление облачной среды при наличии взрыва капель. Изв. АН СССР, ФАО, 1980, т. 16, № 5, с. 483-489.
12. Землянов А.А., Кузиковский А.В. Модельное описание газодинамического режима взрыва водной капли в мощном импульсном световом поле. Квантовая электроника, 1980, т.7, № 7, с.1523-1530.
13. Землянов А.А., Кузиковский А.В., Погодаев В.Н., Чистякова Л.К. Макрочастица в интенсивном оптическом поле. В кн.: Проблемы оптики атмосферы. Новосибирск, Наука, 1983, с.13-39.
14. Землянов А.А., Кузиковский А.В., Чистякова Л.К. Взрыв водной капли в поле излучения CO₂-лазера. В кн.: Исследование сложного теплообмена. Новосибирск, Наука, 1978, с.106-111.
15. Способ передачи энергии оптического излучения через неоднородную среду (Патент РФ RU 2572586): Даринский Б.М., Толстых Н.Н., Белицкий А.М., Артыщенко С.В., Пастернак Ю.Г., Негрбов А.В.



16. Сойфер В. А., Котляр В. В., Хонина С. Н. Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порожденные дифракционной оптикой // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35. Вып. 6. С. 1367- 1430.
17. Лебедев П.Н. Максвелло-бартолиевские силы давления лучистой энергии // Журн. Русск. Физ.-Хим. О-ва. 1900. Т. 32, вып. 8. С. 211.
18. Ashkin A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. Phys. Rev. Lett. 1970. № 24, p. 156. DOI:10.1103/PhysRevLett.24.156.
19. Ashkin A., Dziedzic J. M., Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams. Nature. 1987. V. 330, P. 769. DOI:10.1038/330769a0.
20. Сойфер В.А. Методы компьютерной оптики. М.: Физматлит. 2000. 688 с.
21. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Дифракционные оптические элементы для оптического манипулирования микрочастицами // Материалы международного форума по голографии Экспо-2004. – 2004. 19-22 октября, Москва, С. 62-63.
22. Skidanov R.V., Kotlyar V.V., Khonina V.V., Volkov A.V., Soifer V.A. Micromanipulation in Higher-Order Bessel Beams // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) – 2007. V. 16, № 2, p. 84.
23. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Вращение микрочастиц в световых полях // Компьютерная оптика – 2005. Вып. 28, С. 5-17.
24. Скиданов Р.В., Котляр В.В., Хонина С.Н. Экспериментальное исследование передачи орбитального углового момента сферическим микрочастицам // Известий СИЦ РАН. 2006. № 4, С. 1200-1211.
25. Скиданов Р.В. Оптический захват и вращение диэлектрических микрообъектов вихревыми лазерными пучками, сформированными дифракционными оптическими элементами / автореф. на соиск. уч. степ. д.ф.-м.н. Самара. Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. С.П. Королева, Ин-т систем обработки изображений РАН. 2007. 32 с.
26. L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman. Optical angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gauss laser modes. Phys. Rev. A, 1992, vol. 45, no. 11, pp. 8185–8189.
27. G. Turnbull, D. A. Robertson, G. M. Smith, L. Allen, M. J. Padgett. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre wave frequencies by use of a spiral phaseplate. Optics Commun., 1996, vol. 127, pp. 183–188.
28. Molina-Terriza G., Torres J. P., Torner L. Twisted photons // Nature Phys. 2007, vol. 3, p. 305–310.
29. Grier D. G. A revolution in optical manipulation // Nature. 2003. vol. 424, p. 810–816.
30. Tamburini F., Thidé B., Molina-Terriza G., Anzolin G. Twisting of light around rotating black holes // Nature Phys. 2011. V. 7, p. 195–7.
31. Friese M. E. J. et al. Optical angular-momentum transfer to trapped absorbing particles // Phys. Rev. 1996. V. 54, No. 2. P. 1593A1596.

REFERENCES

1. Zuev V.E. Rasprostranenie vidimykh i infrakrasnykh voln v atmosfere. M., Sov. radio, 1970, 496 s.
2. S.V. Artyshchenko, Yu.G. Pasternak, R.A. Chernov. Features of coherent preparation of medium for the control of its characteristics // Optical Technologies for Telecommunications 2015, Proc. of SPIE Vol. 9807, 980710. Proc. of SPIE Vol. 9807 980710-1-8. 2016. DOI: 10.1117/12.2231419.
3. Grachev YU.N., Strelkov G.M. Izmenenie prozrachnosti vodnogo aehrozolya pod vozdeystviem impul'sa izlucheniya CO2-lazera. Kvantovaya ehlektronika, 1976, T. 3, № 3, S. 621-625.
4. Zuev V.E., Kuzikovskij A.B. Teplovoe prosvetlenie vodnykh aehrozolej lazernym izlucheniem. Izv. vuzov. Fizika, 1977, № 11, s. 106-137.



5. Zuev V.E., Kopytin YU.D., Kuzikovskij A.B. Nelinejnye opticheskie ehffekty v aehrozolyakh. Novosibirsk, Nauka, 1980, 182 s.
6. Barinov V.V., Sorokin S.A. Vzryvy vodnykh kapel' pod dejstviem opticheskogo izlucheniya. Kvantovaya ehlektronika, 1973, № 2, s. 5-11.
7. Korovin V.YA., Ivanov E.V. EHksperimental'noe issledovanie vozdejstviya izlucheniya CO₂-lazera na kapli vody. V kn.: III Vsesoyuznyj simpozium po rasprostranenyu lazernogo izlucheniya v atmosfere: Tezisy dokladov. Tomsk, 1975, s.93-94.
8. Gordin M.P., Sokolov A.V., Strelkov G.M. Oslablenie izlucheniya SO₂-lazera diffuzionno isparayayushhimsya vodnym aehrozolem. Radiotekhnika i ehlektronika, 1975, t.20, № 11, s.2241-2249.
9. Zemlyanov A.A., Kolosov V.V., Kuzikovskij A.B. Rasprostranenie sveta pri vzryve aehrozolej v lazernykh puchkakh. ZHTEF, 1981, t.51, vyp. 4, s.776-780.
10. Semenov L.P. Prosvetlenie oblachnoj sredy pri nalichii kondensatsii para. Trudy IEHM, 1981, vyp. 26(99), s.16-21.
11. Svirkunov P.N., Sedunov YU.S., Semenov L.P. Prosvetlenie oblachnoj sredy pri nali-chii vzryva kapel'. Izv. AN SSSR, FAO, 1980, t. 16, № 5, s. 483-489.
12. Zemlyanov A.A., Kuzikovskij A.B. Model'noe opisaniye gazodinamicheskogo rezhima vzryva vodnoj kapli v moshhnom impul'snom svetovom pole. Kvantovaya ehlektronika, 1980, t.7, № 7, s.1523-1530.
13. Zemlyanov A.A., Kuzikovskij A.B., Pogodaev V.N., CHistyakova L.K. Makrochastitsa v intensivnom opticheskom pole. V kn.: Problemy optiki atmosfery. Novosibirsk, Nauka, 1983, s.13-39.
14. Zemlyanov A.A., Kuzikovskij A.B., CHistyakova L.K. Vzryv vodnoj kapli v pole izlucheniya SO₂-lazera. V kn.: Issledovanie slozhnogo teploobmena. Novosibirsk, Nauka, 1978, s.106-111.
15. Sposob peredachi ehnergii opticheskogo izlucheniya cherez neodnorodnuyu sredu (Patent RF RU 2572586): Darinskij B.M., Tolstykh N.N., Belitskij A.M., Artyshhenko S.V., Pasternak YU.G., Negrobov A.V.
16. Sojfer V. A., Kotlyar V. V., KHonina S. N. Opticheskoe manipulirovaniye mikroob"ektami: dostizheniya i novye vozmozhnosti, porozhdennyye difraktsionnoj optikoj // Fizika ehlementarnykh chastits i atomnogo yadra. 2004. T. 35. Vyp. 6. S. 1367- 1430.
17. Lebedev P.N. Maksvello-bartolievskie sily davleniya luchistoj ehnergii // ZHurn. Russk. Fiz.-KHim. O-va. 1900. T. 32, vyp. 8. S. 211.
18. Ashkin A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. Phys. Rev. Lett. 1970. № 24, p. 156. DOI:10.1103/PhysRevLett.24.156.
19. Ashkin A., Dziedzic J. M., Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams. Nature. 1987. V. 330, P. 769. DOI:10.1038/330769a0.
20. Sojfer V.A. Metody komp'yuternoj optiki. M.: Fizmatlit. 2000. 688 s.
21. Sojfer V.A., Kotlyar V.V., KHonina S.N., Skidanov R.V. Difraktsionnye opticheskie ehlementy dlya opticheskogo manipulirovaniya mikrochastitsami // Materialy mezhdunarodnogo foruma po golografii EHkspo-2004. – 2004. 19-22 oktyabrya, Moskva, S. 62-63.
22. Skidanov R.V., Kotlyar V.V., Khonina V.V., Volkov A.V., Soifer V.A. Micromanipulation in Higher-Order Bessel Beams // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) – 2007. V. 16, №. 2, p. 84.
23. Sojfer V.A., Kotlyar V.V., KHonina S.N., Skidanov R.V. Vrashhenie mikrochastits v svetovykh polyakh // Komp'yuternaya optika – 2005. Vyp. 28, S. 5-17.
24. Skidanov R.V., Kotlyar V.V., KHonina S.N. EHksperimental'noe issledovanie peredachi orbital'nogo uglovogo momenta sfericheskimi mikrochastitsami // Izvestij SNTS RAN. 2006. № 4, S. 1200-1211.
25. Skidanov R.V. Opticheskij zakhvat i vrashhenie dielektricheskikh mikroob"ektov vikhrevymi lazernymi puchkami, sformirovannymi difraktsionnymi opticheskimi ehlementami / avtoref. na



soisk. uch. step. d.f.-m.n. Samara. Samarskij gos. aehrokosmicheskij un-t im. akad. S.P. Koroleva, In-t sistem obrabotki izobrazhenij RAN. 2007. 32 s.

26. L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman. Optical angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gauss laser modes. *Phys. Rev. A*, 1992, vol. 45, no. 11, pp. 8185–8189.

27. G. Turnbull, D. A. Robertson, G. M. Smith, L. Allen, M. J. Padgett. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre wave frequencies by use of a spiral phaseplate. *Optics Commun.*, 1996, vol. 127, pp. 183–188.

28. Molina-Terriza G., Torres J. P., Torner L. Twisted photons // *Nature Phys.* 2007, vol. 3, p. 305–310.

29. Grier D. G. A revolution in optical manipulation // *Nature*. 2003. vol. 424, p. 810–816.

30. Tamburini F., Thidé B., Molina-Terriza G., Anzolin G. Twisting of light around rotating black holes // *Nature Phys.* 2011. V. 7, p. 195–7.

31. Friese M. E. J. et al. Optical angular-momentum transfer to trapped absorbing particles // *Phys. Rev.* 1996. V. 54, No. 2. P. 1593A1596.

© Иванов А.В., Пастернак Ю.Г., Проскурин Д.К., 2018

Иванов Александр Владимирович, кандидат технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (военно-технических исследований перспектив развития и применения информационно-управляющих систем авиации), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, pasternakg@mail.ru

Проскурин Дмитрий Константинович, кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по проектной и информационно-аналитической работе, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, pdk@vgasu.vrn.ru