

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОГО ПУЧКА В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ. Ч. 2. УЧЕТ ОГРАНИЧЕНИЙ, ВНОСИМЫХ ДАТЧИКОМ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В.П. Аксенов, Ф.Ю. Канев*, Д.С. Куксенок**, Н.А. Макенова*, А.В. Хапаева*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: avp@iao.ru

*Томский политехнический университет

E-mail: mna.05@mail.ru

**Томский государственный университет

E-mail: motty@sibmail.com

Во второй части статьи в используемую расчетную схему вводится модель датчика Гартмана, что позволяет определить его влияние на точность работы оптической системы и провести оптимизацию параметров прибора. В заключительном параграфе точность детектирования оптического вихря в турбулентной среде с использованием датчика сравнивается с точностью результатов работы идеальной оптической системы.

Ключевые слова:

Датчик Шека–Гартмана, локальные наклоны, сингулярная оптика, орбитаальный угловой момент, турбулентная атмосфера.

Key words:

Shack–Hartmann sensor, local tilts, singular optics, orbital angular momentum, turbulent atmosphere.

Точность определения количества дислокаций в идеальной оптической системе.

Статистика особых точек в турбулентной атмосфере

Для определения числа, координат и топологического заряда особых точек было использовано известное условие, согласно которому циркуляция градиентов фазы пучка, вычисленная вдоль контура, охватывающего дислокацию первого порядка, равна $\pm 2\pi$. Поэтому распределение фазы и случайных наклонов было разбито на одинаковые квадратные ячейки, по периметру каждой из которых вычислялся интеграл от градиентов. При равенстве интеграла $\pm 2\pi$ полагалось, что в пределах контура находится дислокация [1].

Тестирование точности алгоритма регистрации было выполнено в модельной задаче, где в волновой фронт вводилось определенное количество дислокаций. После введения особых точек пучок проходил нулевое расстояние.

Изменение точности при варьировании числа оптических вихрей и размеров контура интегрирования иллюстрируется данными таблицы, где приводится усредненное число дислокаций, определенное с использованием алгоритма. Основная особенность предлагаемого подхода – это уменьшение точности, наблюдаемое как при увеличении размеров контура интегрирования, так и при увеличении числа особых точек. Так, для элементарного контура, сторона которого равна $0,12 (d_0 - \text{начальный диаметр пучка})$ с точностью 100 % регистрируется 10 введенных в начальный волновой фронт дислокаций, но при 50 особых точках точность составляет только 84 %. Аналогичное уменьшение точности наблюдается и для других размеров, причем чем больше контур, тем меньше точность алгоритма регистрации.

Таблица. Тестирование точности алгоритма регистрации особых точек

| Число заданных дислокаций | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-----|----|----|----|----|
| Размер контура $0,12d_0$ (4×4 узла) | Число зарегистрированных дислокаций | 10 | 18 | 26 | 34 | 42 |
| | Точность регистрации, % | 100 | 90 | 87 | 85 | 84 |
| Размер контура $0,24d_0$ (8×8 узлов) | Число зарегистрированных дислокаций | 9 | 16 | 22 | 27 | 32 |
| | Точность регистрации, % | 90 | 80 | 73 | 68 | 64 |

Рассмотрим теперь появление дислокаций при задании аберраций случайным фазовым экраном. Как и в предыдущих численных экспериментах в используемой модели лазерный пучок (гауссовский или имеющий особенности) проходит через экран, расположенный непосредственно за апертурой источника, затем распространяется в условиях свободной дифракции. На некотором расстоянии, которое является варьируемым параметром задачи, осуществляется регистрация особых точек. В численных экспериментах также изменяется интенсивность искажений, характеризующая радиусом Фрида.

Усредненное по 200 реализациям случайного фазового экрана число зарегистрированных в различных сечениях трассы особых точек показано на рис. 1. Здесь видны следующие характерные особенности распространения гауссовского излучения (кривые 2 и 3). Несмотря на то, что пучок испытывает искажения, на малых ($Z=0,01$) расстояниях, оптические вихри в волновом фронте отсутствуют. При дальнейшем распространении ($Z=0,05-0,1$) число дислокаций резко увеличивается, причем экстремум функции тем выше, чем больше интенсивность турбулентных искажений. С увеличением пройденного расстояния число вихрей уменьшается и при $Z=0,4$ в пучке присутствуют не более 5 особых точек.

Похожим является поведение пучка, в волновой фронт которого в плоскости апертуры источника был введен оптический вихрь (рис. 1, кривая 1). Здесь на малых расстояниях ($Z=0,01$) регистрируется только одна дислокация. Исходный вихрь сохраняется, его смещения совпадают с изменениями координат центра тяжести пучка, обусловленными турбулентными возмущениями.

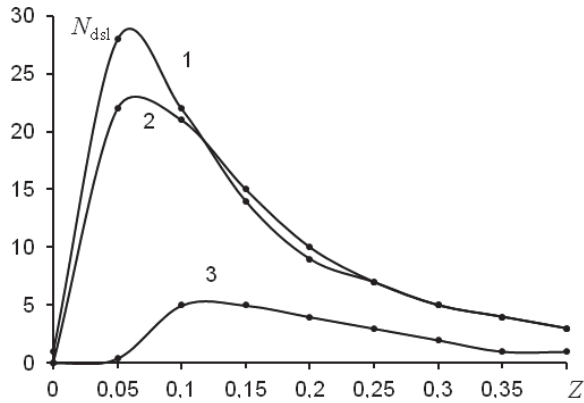


Рис. 1. Число дислокаций N_{dsl} , зарегистрированное в различных сечениях Z трассы распространения. Кривые 1 и 2 получены при $r_0=0,15$, 3 — при $r_0=0,45$. При получении 1 в пучок была введена искусственная дислокация, в остальных случаях дислокации в начальном распределении поля отсутствовали. Усреднение выполнялось по 200 реализациям фазового экрана

Ограничения, вносимые датчиком Гартмана в работу оптической системы.

Оптимизация параметров прибора

В предыдущем разделе для анализа свойств сингулярного излучения использовались градиенты волнового фронта. Приближение условий задачи к условиям лабораторного эксперимента потребовало изменения численной модели оптической системы, в частности введение в нее модели датчика Гартмана [2].

Для оценки точности регистрации датчиком параметров (циркуляции и ротора локальных наклонов) волнового фронта сингулярного излуче-

ния был выполнен ряд тестовых расчетов по определению топологического заряда оптических вихрей. В первом из них пучок проходил нулевого расстояния, и в его фазовый профиль было помещено нечетное число дислокаций (результаты численного эксперимента показаны на рис. 2, а). Поле наклонов регистрировалось датчиком с размерностью раstra микролинз 32×32 , при вычислении циркуляции наклонов контур интегрирования охватывал все особые точки. Так как в пучке находится нечетное число вихрей, циркуляция в этом случае должна быть равна единице. Это положение выполнялось при введении в пучок от 1 до 61 особых точек. Как видно из представленных результатов, при дальнейшем увеличении количества оптических вихрей значение циркуляции отличаются от единицы, т. е. появляются ошибки в работе алгоритма регистрации.

Подобные расчеты были выполнены и при введении в волновой фронт четного числа особых точек (рис. 2, б). Здесь ожидалось нулевые значения циркуляции. Но величина Γ равнялась нулю только в интервале 1–60 особых точек, при дальнейшем увеличении количества вихрей наблюдалось отклонение от этого значения.

Представленные результаты показывают, что предложенный алгоритм даже в самых благоприятных условиях (нулевая длина трассы, отсутствие турбулентных или любых других возмущений) с датчиком размерности 32×32 обеспечивает удовлетворительную точность регистрации суммарного топологического заряда группы особых точек, только если их количество не слишком велико (≤ 60).

В отличие от плоской волны поперечные размеры лазерного пучка всегда конечны, поэтому естественно ожидать зависимости циркуляции поля наклонов сингулярного волнового фронта от размеров контура интегрирования. Для выяснения характера этой зависимости в численных экспериментах в волновой фронт вводилась только одна особая точка ($\Gamma=1$), при этом, как и в предыдущем случае, пучок проходил трассу нулевой длины.

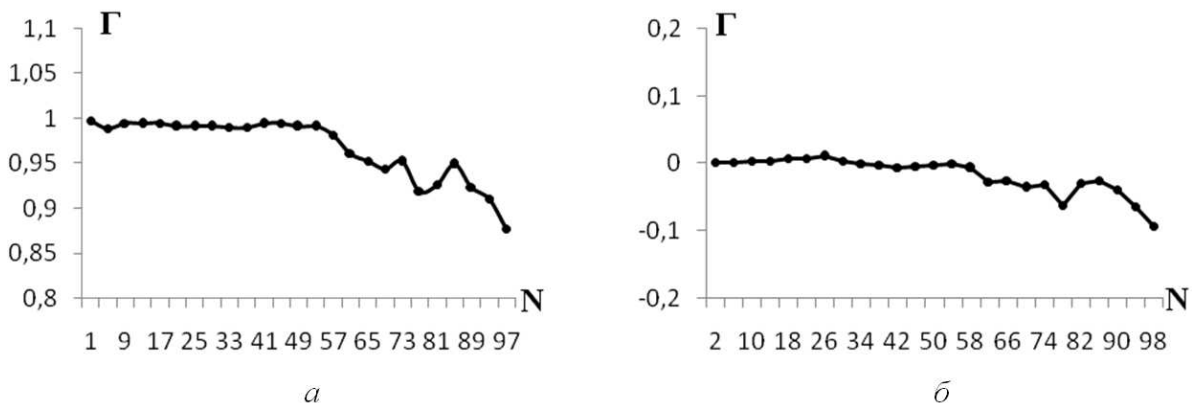


Рис. 2. Зависимость значения суммарного топологического заряда группы особых точек от числа введенных в волновой фронт дислокаций: а) нечетное; б) четное число. Для определения наклонов использовалась модель датчик Гартмана размерности 32×32

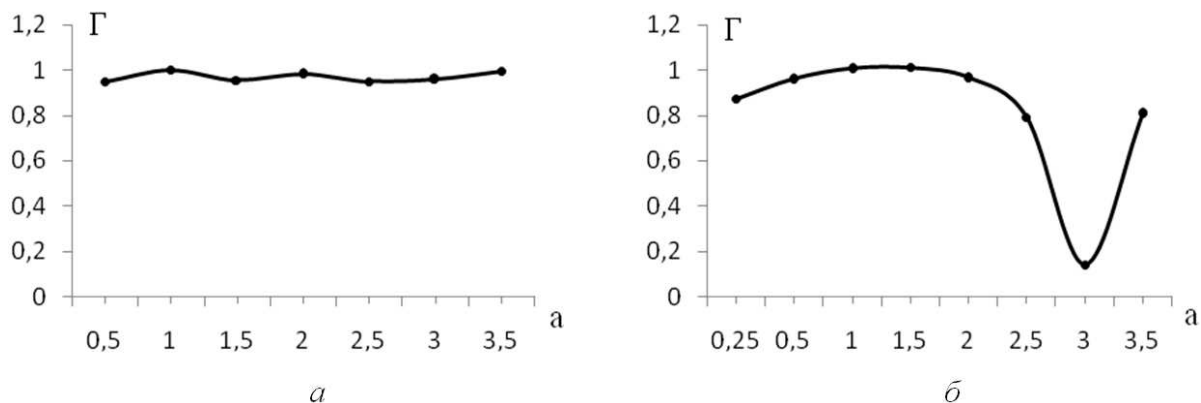


Рис. 3. Зависимость циркуляции сингулярного волнового фронта от размеров контура интегрирования a (размеры контура нормированы на начальный диаметр пучка), полученная для датчиков с размерностью раstra микролинз: а) 16×16 ; б) 32×32

Для датчиков размерности 16×16 и 32×32 результаты моделирования приводятся на рис. 3.

В обоих случаях удовлетворительная точность была зафиксирована для контуров с размерами от 0,25 до 2 начальных диаметров пучка. При дальнейшем увеличении размеров наблюдались отклонения значений циркуляции от 1. Указанные погрешности можно объяснить тем, что в удаленных от центра пучка областях его амплитуда близка к нулю, а при нулевой амплитуде и соответствующей неопределенности фазы наклоны волнового фронта невозможно определить точно.

Кроме размерности датчика и размеров контура интегрирования на точность определения параметров пучка влияет фокусное расстояние микролинз. Для оптимизации этого параметра интегрирование поля наклонов сингулярного излучения проводилось на трассах различной длины при варьировании фокусного расстояния и варьировании размерности раstra (в волновом фронте только одна особая точка, размер контура равнялся 1 диаметру пучка, циркуляция должна быть равна единице). Полученные результаты представлены на рис. 4.

Оптимальное фокусное расстояние, выбираемое с точки зрения близости циркуляции к единице, получается различным для датчиков разной размерности. Так, для раstra 16×16 оно составля-

ет 0,8 см, для раstra 32×32 – 1,1 см, а для раstra 64×64 – 1,05 см. Подбор оптимального расстояния обеспечивает высокую точность вычисления топологического заряда, как видно из рисунка, значения циркуляции, соответствующие кривой 1, не более чем на 10 % отличаются от 1.

Особенности регистрации параметров пучка в турбулентной среде

Так как достаточно большое количество современных оптических систем предназначены для работы в условиях свободной атмосферы, нами была исследована возможность регистрации особых точек при наличии турбулентных искажений на трассе распространения пучка [3, 4]. Соответствующие численные эксперименты проводились с датчиком размерности 64×64 , обеспечивающим наибольшую точность регистрации локальных наклонов.

Результаты определения циркуляции пучка (средние значения по 100 реализациям), включающего в плоскости генерации единственный оптический вихрь, представлены на рис. 5, а, в, $Z=0,25$. На этом же рисунке приводится зависимость вероятности регистрации особой точки от интенсивности турбулентных искажений (рис. 5, б, г). Данные были получены для идеальной системы (кривые 1), т. е. с использованием для вычислений гради-

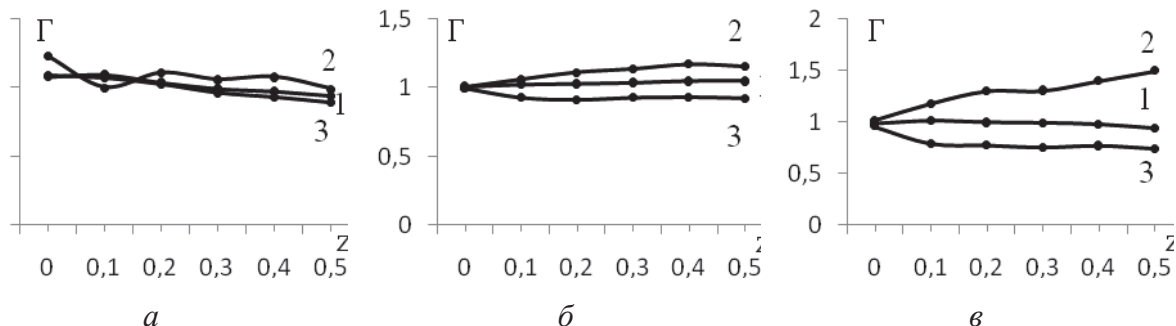


Рис. 4. Определение оптимального фокусного расстояния раstra микролинз для датчиков различной размерности: а) датчик 16×16 , фокусные расстояния (см): 0,8 (кривая 1), 0,7 (2), 0,9 (3); б) датчик 32×32 : 1,1 (кривая 1), 1,0 (2), 1,2 (3); в) датчик 64×64 : 1,05 (кривая 1), 1,1 (2), 0,9 (3)

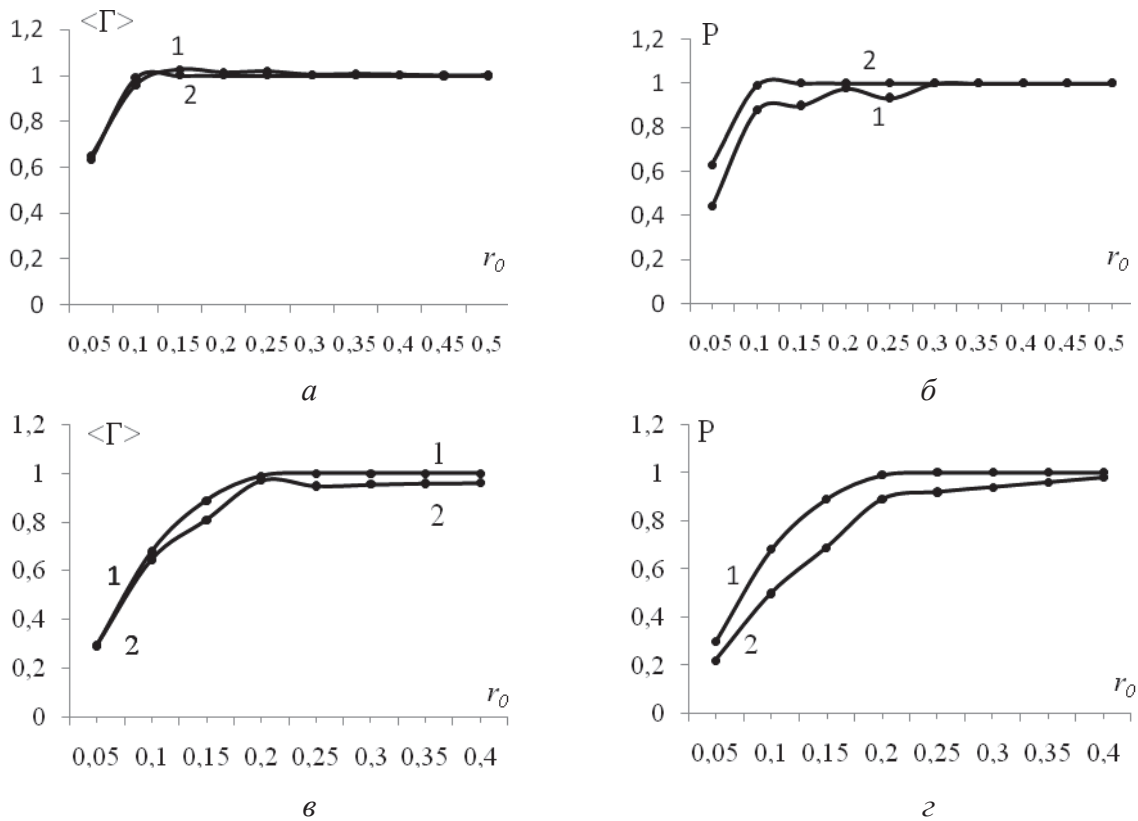


Рис. 5. Зависимость средних значений циркуляции волнового фронта от интенсивности турбулентных искажений (а, в) и вероятности регистрации дислокации в турбулентной атмосфере (б, г). Результаты получены для идеальной оптической системы (кривая 1 на всех графиках) и при регистрации наклонов датчиком Гартмана (кривая 2) размерности 64×64 . $Z=0,25$ (а, б) и $Z=0,5$ (в, г). Усреднение результатов выполнено по 100 реализациям распределения показателя преломления

ентов волнового фронта, и на основе измерений наклонов датчиком Гартмана (кривые 2).

Отметим основные характерные особенности кривых. Во-первых, средние значения циркуляции, полученные в идеальной системе на трассе большей длины ($Z=0,5$), являются на 5...10 % более высокими, по сравнению со значениями, регистрируемыми датчиком. На более короткой из трасс ($Z=0,25$) кривые практически совпадают. Во-вторых, зависимость средних значений циркуляции от интенсивности искажений повторяет зависимость, полученную для вероятности регистрации вихря. В-третьих, обе величины ($\langle \Gamma \rangle$ и P) уменьшаются с уменьшением радиуса Фрида r_0 . На длинных трассах ($Z=0,5$) спад наблюдается для меньшей интенсивности турбулентности, т. е. при больших значениях r_0 .

Результаты, представленные в параграфе, позволяют сделать вывод о том, что при использовании представленного алгоритма наблюдается уменьшение точности регистрации особых точек при увеличении длины трассы и при увеличении интенсивности турбулентных искажений. При этом датчик с размерностью раstra 64×64 обеспечивает вероятность регистрации близкую к вероятности, полученной при вычислении циркуляции с использованием градиентов волнового фронта.

Заключение

В статье рассмотрен метод регистрации оптических вихрей в лазерном излучении на основе вычисления циркуляции и ротора поля локальных наклонов волнового фронта. Использование модели датчика Гартмана в численных экспериментах позволило учесть ограничения, вносимые этим прибором. Представленные в работе данные позволяют сделать следующие выводы:

1. При распространении лазерного излучения, прошедшего тонкий слой турбулентной атмосферы, искажения проявляются на трассах малой длины ($Z=0,01$), но, несмотря на это, оптические вихри в волновом фронте отсутствуют. При дальнейшем распространении ($Z=0,05-0,1$) число дислокаций резко увеличивается, причем экстремум функции тем выше, чем больше интенсивность турбулентных искажений. С увеличением пройденного расстояния число вихрей уменьшается.
2. Для датчиков всех размерностей, рассмотренных в работе (от 16×16 до 64×64), удается подобрать оптимальные размеры контура интегрирования и оптимальное фокусное расстояние микролинз, обеспечивающие уверенную регистрацию в неискажающей среде топологического заряда одной особой точки на трассах длиной от 0 до 0,5 дифракционных длин.

- Предложенный алгоритм при нулевой длине трассы распространения и отсутствии турбулентных или любых других возмущений обеспечивает удовлетворительную точность регистрации суммарного топологического заряда группы особых точек, только если их количество не слишком велико (≤ 60).
- При использовании алгоритма для регистрации параметров пучка в турбулентной

атмосфере наблюдается уменьшение его точности при увеличении длины трассы и при увеличении интенсивности турбулентных искажений. При этом датчик с размерностью растра 64×64 обеспечивает вероятность регистрации близкую к вероятности, полученной при вычислении циркуляции с использованием градиентов волнового фронта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Soskin M.S., Vasnetsov M.V. Singular optics // Prog. Opt. – 2001. – V. 42. – P.219–276.
- Siegman A.E. Lasers. – Mill Valley, Calif.: University Science, 1986. – 1304 p.
- Young C.Y., Gilchrest Y.V., Macon B.R. Turbulence induced beam spreading of higher order mode optical waves // Optical Engineering. – 2002. – V. 41. – № 5. – P. 1097–1103.
- Palacios D.M., Rozas D., Swartzlander G.A., Jr. Observed scattering into a dark optical vortex core // Phys. Rev. Lett. – 2002. – V. 88. – P. 103902.

Поступила 27.11.2012 г.

УДК 536.253

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ СЕРНОГО АНГИДРИДА В АТМОСФЕРЕ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин

Томский политехнический университет
E-mail: dim2003@tpu.ru; gubin@tpu.ru

Представлены результаты численной оценки интенсивности процесса конденсации серного ангидрида в воздушном пространстве, прилегающем к тепловой электрической станции. Определены размеры ядер капель кислоты, которые в процессе седиментации могут выпадать на поверхность Земли.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, тепловая электрическая станция, дымовые газы, загрязнение, серный ангидрид, конденсация, частица, серная кислота.

Key words:

Mathematical modeling, thermal power plant, smoke gases, pollution, sulphurous anhydride, condensation, particle, sulfuric acid.

Введение

Проблема антропогенного загрязнения атмосферы Земли многие годы является актуальной [1, 2]. Одним из основных источников загрязняющих веществ являются объекты теплоэнергетического комплекса, такие как тепловые электрические станции (ТЭС) [1, 2]. С каждым годом объемы эмиссии загрязняющих веществ в воздушный бассейн планеты увеличиваются [3–5], хотя, следует отметить, прогнозы мировой антропогенной эмиссии оксидов серы и азота неоднозначны (табл. 1). Наличие в воздушном пространстве Земли таких загрязняющих веществ как SO_2 , SO_3 , NO_x , при их взаимодействии с компонентами атмосферного воздуха, может приводить к образованию соответствующих кислот [2]. Взаимодействие кислотных дождей с биосферой, сооружениями, техникой, как правило, заканчиваются для них губительными последствиями [1, 5].

Таблица 1. Фактические выбросы оксидов серы и оксидов азота в 2000 г. и прогнозы мировой антропогенной эмиссии [3]

| Источник | Оксиды серы, млн т | | | | Оксиды азота, млн т | | | |
|--|--------------------|------|------|------|---------------------|------|------|------|
| | 2000 | 2025 | 2050 | 2100 | 2000 | 2025 | 2050 | 2100 |
| IPCC (Межправительственная комиссия по изменению климата) 1992 [5], сценарий IS92a | 178 | 240 | 308 | 296 | 122 | 174 | 210 | 273 |
| WEC (Всемирный энергетический совет) 1993 [6], сценарий В | – | 132 | – | – | – | 89 | – | – |
| Клименко В.В., Клименко А.В. [3] | 145 | 135 | 100 | 50 | 114 | 126 | 114 | 87 |