

Структура турбулентных движений воздуха в шахте главного зеркала Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН. Эксперимент и численное моделирование

В.В. Носов, В.П. Лукин, Е.В. Носов, А.В. Торгаев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 11.08.2016 г.

Экспериментально и теоретически исследована структура турбулентных движений воздуха в подкупольном помещении (в закрытом помещении шахты главного зеркала диаметром 2,2 м) Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Исследования необходимы для прогноза искажений лазерного излучения. Представлены результаты экспериментов, выполненных с использованием малогабаритной переносной ультразвуковой метеостанции. Установлены главные теплообменные направления движения воздуха внутри помещения шахты. Теоретические результаты получены путем численного решения краевой задачи для уравнений Навье–Стокса. Показано, что в исследуемом помещении наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны), распад которых порождает когерентную турбулентность. Установлено, что в шахте главного зеркала можно ожидать ослабления фазовых флуктуаций оптического излучения и, следовательно, улучшения лидарных оптических изображений. Это повышает эффективность лидарной станции.

Ключевые слова: турбулентность, когерентная турбулентность, когерентная структура, топологический солитон, численное моделирование когерентных структур, уравнения гидродинамики, уравнения Навье–Стокса, топологические предвестники; turbulence, coherent turbulence, coherent structure, topological soliton, simulation of coherent structures, hydrodynamics equations, Navier–Stokes equations, topological precursors.

Введение

Данные измерений параметров турбулентности обнаруживают в среде замкнутых помещений присутствие когерентных структур [1–6]. Гидродинамическая когерентная структура – компактное образование, включающее в себя долгоживущую пространственную вихревую структуру (ячейку), возникающую в результате продолжительного действия термодинамических градиентов, и продукты ее дискретного когерентного каскадного распада. В расширенном понимании когерентная структура есть солитонное решение уравнений гидродинамики (топологический трехмерный солитон, уединенная волна). Это либо односолитонное решение, либо один солитон в многосолитонном решении.

Как установлено в [1–6], турбулентность, возникающая в результате распада главного вихря

в когерентной структуре, является когерентной и детерминированной. Она содержит как крупномасштабные, так и мелкомасштабные продукты распада. При этом одномерный спектр турбулентности (компонент скорости и температуры) имеет более быстрое убывание в инерционном интервале (обычно $8/3$ -степенное убывание, которое в высокочастотной части инерционного интервала переходит в еще более сильное $12/3$ -убывание) по сравнению с колмогоровским $5/3$ -степенным убыванием [1–8].

В настоящей статье приведены экспериментальные и теоретические результаты исследования теплообмена и структуры турбулентности в подкупольном помещении (в закрытом помещении шахты главного зеркала, имеющего диаметр 2,2 м, рис. 1) Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Исследования необходимы для прогноза искажений лазерного излучения вблизи главного зеркала и его фокуса в подкупольном помещении. Они позволяют сделать оценки и дать прогноз эффективности самой лидарной станции.

* Виктор Викторович Носов (nosov@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Евгений Викторович Носов; Андрей Витальевич Торгаев.

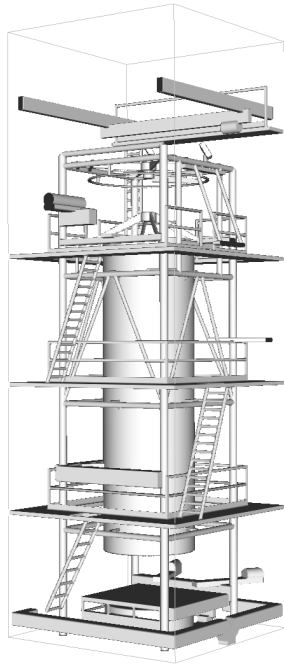


Рис. 1. Модель помещения шахты главного зеркала. Вид с северо-восточного угла

1. Эксперимент

Экспериментальные исследования характеристик турбулентности и теплообмена в подкупольном помещении были выполнены в декабре 2015 г. Измерения проведены с использованием малогабаритной переносной ультразвуковой метеостанции в разных точках (рис. 2) по объему помещения.

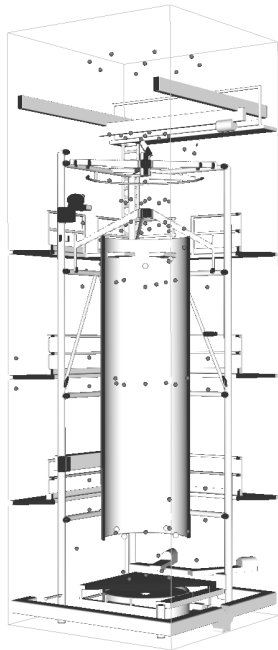


Рис. 2. Точки регистрации величин: темные — моделирование, светлые — эксперимент. Ближний сектор усечен. Вид с северо-восточного угла

Аналогичные измерения ранее выполнялись авторами настоящей работы в подкупольных пространствах нескольких различных астрономических телескопов: АЗТ-33 и АЗТ-14 Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН [9–11], Большой телескоп альт-азимутальный Специальной астрофизической обсерватории РАН на Северном Кавказе [12, 13].

1.1. Воздушные потоки

Экспериментальные измерения выявили наличие воздушных потоков (скоростью до 0,4 м/с) внутри помещения по всей высоте шахты (15,6 м), в том числе в технологических зазорах между элементами конструкций. Установлены следующие теплообменные направления движения воздуха внутри помещения:

- вертикальное нисходящее направление внутри бленды, выполненной в виде вертикальной трубы круглого сечения;
- вертикальное восходящее направление с внешней южной стороны бленды (в зазорах между блендой и горизонтальными трапами);
- вертикальное нисходящее направление с внешней северной стороны бленды.

Причиной возникновения тепловых потоков, как выяснилось, являлись градиенты средней температуры:

- повышение температуры в нижней части помещения шахты в местах прилегания входных дверей в шахту из смежного теплого помещения;
- понижение температуры в верхней части помещения вследствие внешнего выхолаживания подвижной крыши шахты.

1.2. Спектральный анализ

На рис. 3, 4 представлены экспериментальные временные частотные спектры флуктуаций температуры для некоторых точек измерения. В представленных случаях в спектрах наблюдается сравнительно протяженный инерционный интервал с $8/3$ -либо с $12/3$ -степенной зависимостью, что соответствует когерентной турбулентности [1–8, 12, 13].

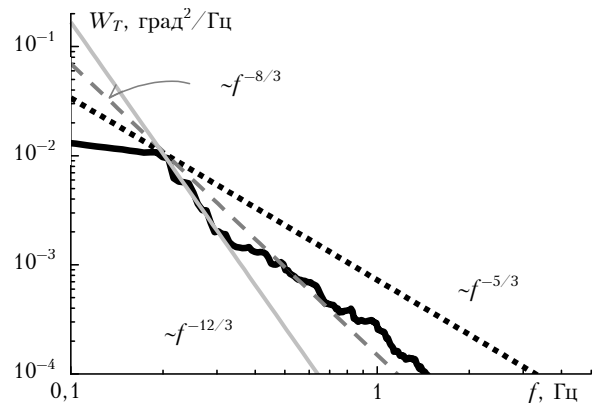


Рис. 3. Экспериментальный временной частотный спектр флуктуаций температуры в нижней западной точке

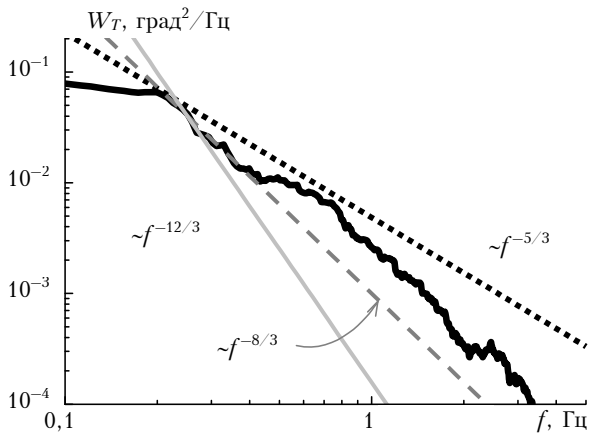


Рис. 4. Экспериментальный временной частотный спектр флуктуаций температуры во внутренней верхней западной точке

2. Моделирование

В настоящей работе для теоретического исследования структуры турбулентных движений воздуха в замкнутом объеме (без обмена веществом среды через границы) решается краевая задача для уравнений гидродинамики (уравнений Навье–Стокса). Для численного решения краевой задачи нами использовано The Gerris Flow Solver [14] – свободное программное обеспечение (ПО) для решения уравнений Навье–Стокса, распространяемое в открытых исходных кодах свободно и бесплатно. Эффективность и требуемая точность ПО проверена и подтверждена на достаточно широком классе 100 типичных тестовых задач [15], решение которых дает удовлетворительные результаты.

Полученные нами ранее результаты численного моделирования [12, 13] показывают, что в замкнутом воздушном объеме обычно наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны), когерентный распад которых порождает когерентную турбулентность.

Моделирование помещения шахты главного зеркала и расположенных внутри него конструкций и оборудования (рис. 1, 5, 6) произведено на основании данных натурных измерений габаритов помещения, конструкций и оборудования, температур поверхностей, а также использованы данные сборочных чертежей.

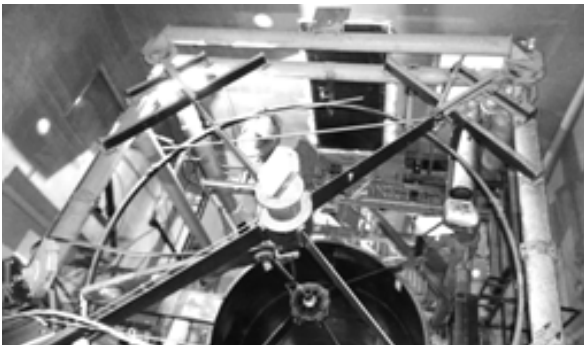


Рис. 5. Конструкции и оборудование верхних этажей. Фото. Вид с юго-запада

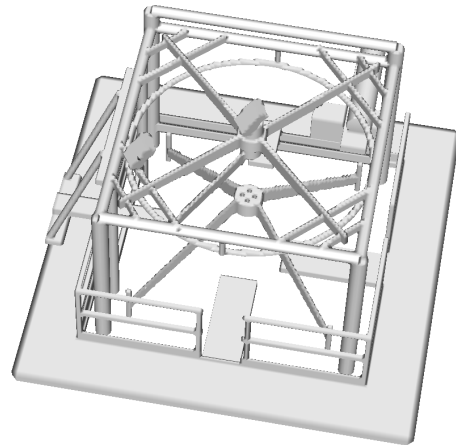


Рис. 6. Конструкции и оборудование верхних этажей. Фрагмент модели. Вид с юго-запада

2.1. Краевая задача

Для проведения численного эксперимента сформулирована следующая краевая задача для уравнений Навье–Стокса:

1. Для модели помещения (рис. 1) заданы размеры (ш × в × г): $5,2 \times 15,6 \times 5,2$ м.

2. Граничные условия Дирихле:

– температуры поверхностей помещения соответствуют измеренным в эксперименте;

– скорости на границах помещения: x -, y -, z -компоненты скорости равны нулю.

3. Начальные условия: внутри помещения температура воздуха T_0 соответствует измеренным в эксперименте; давление $P_0 = 1013,25$ мбар.

4. Среда: внутри помещения подобная воздуху среда: кинематическая вязкость $\nu = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; плотность $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$.

5. Конструкции и оборудование: внутри помещения присутствуют (рис. 5, 6) крупногабаритные оптические элементы и конструкции лидара, в том числе главное зеркало (эллиптический параболоид) диаметром 2,2 м и фокусным расстоянием 10 м.

6. Схема расположения точек измерения параметров в шахте представлена на рис. 2.

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения воздуха в помещении в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 7, 8). Как видно, внутри помещения наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны). Совместно эти вихри можно интерпретировать как аналог конвективной ячейки Бенара, сформированной в закрытом прямоугольном объеме с внутренним конвективным наполнением сложной геометрии.

2.2. Воздушные потоки и конвективные ячейки

На представленных картинах движения воздуха внутри помещения шахты главного зеркала в разные моменты времени (рис. 7, 8, данные численных

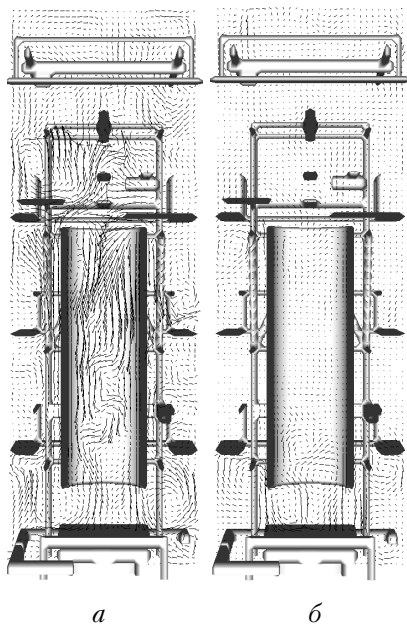


Рис. 7. Поле скоростей в слое вертикального сечения север—юг (моделирование): *a* — в момент времени моделирования $t = 00:00:31$; *б* — $t = 01:48:16$

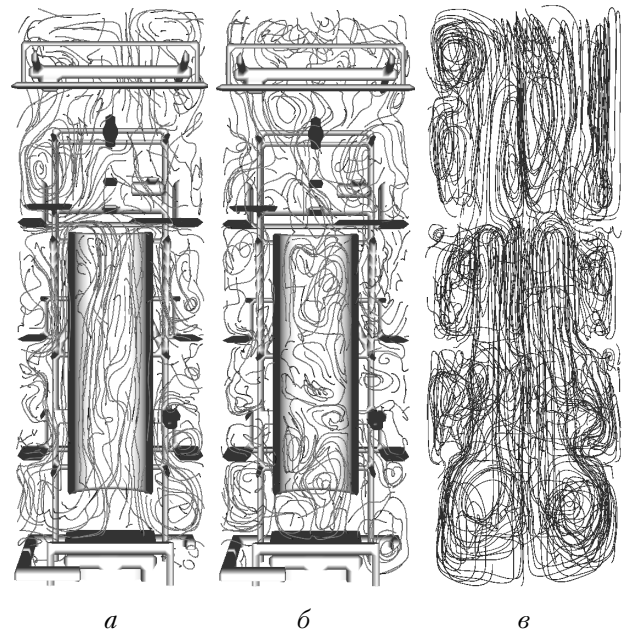


Рис. 8. Картина турбулентных движений воздуха (моделирование): *a* — в момент времени моделирования $t = 00:00:31$, вид с западной стороны; *б* — $t = 01:48:16$; *в* — $t = 00:00:05$, топологические предвестники. Сплошные линии — линии тока

расчетов) можно отметить преобладающее влияние крупных неоднородностей в движениях воздуха. Незначительность вклада мелких вихрей должна проявиться в более быстром убывании спектра турбулентности на высоких частотах.

Как установлено в [12, 13], в закрытых помещениях вначале кратковременно возникает предварительный образ стационарной картины движений (топологические предвестники), сменяющийся периодом хаотизации. Переход от состояния хаоса (нестационарные движения, быстро распадающиеся вихри) к стационарным движениям (очень медленно распадающиеся вихри) происходит обычно в воздухе за период от минуты до десятков минут. В данном случае вид топологических предвестников (поэтажные вихревые ячейки на рис. 8, *a*) помимо градиентов температур также пространственно обусловлен и геометрией конструкций внутри шахты: горизонтальными трапами и вертикальной цилиндрической блендой.

2.3. Спектральный анализ

На рис. 9 и 10 представлены рассчитанные временные частотные спектры флуктуаций температуры. В теоретических спектрах, также как и в экспериментальных (рис. 3, 4), наблюдается сравнительно протяженный инерционный интервал с $8/3$ - либо $12/3$ -степенной зависимостью, что также соответствует когерентной турбулентности.

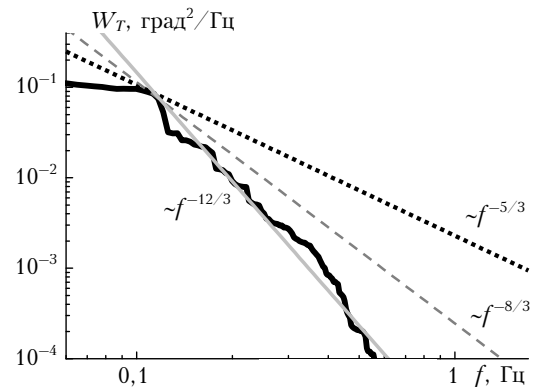


Рис. 9. Рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры в нижней западной точке

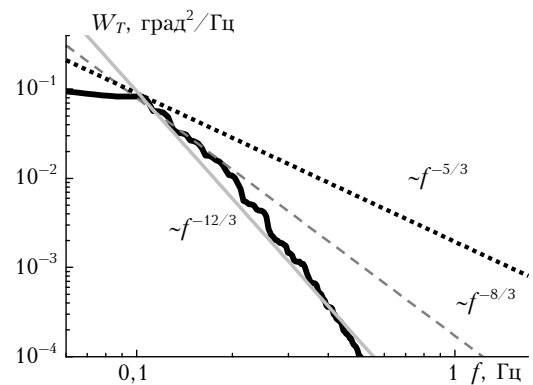


Рис. 10. Рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры во внутренней верхней западной точке

Заключение

Вертикальные направления движения воздуха, аналогичные зафиксированным в эксперименте, наблюдаются в условиях моделирования преимущественно в нестационарном режиме. Охлажденный от контакта с холодной крышей шахты воздух опускается вниз в основном внутри бленды, которая в силу своей геометрии (вертикально ориентированная труба) собирает его в сравнительно узкий нисходящий поток. Теплый воздух из мест прилегания входных дверей в шахту на нижнем этаже, вытесняясь холодным, поднимается в конструктивных зазорах между горизонтальными трапами и внешней стороной бленды. Направления движения воздуха, зафиксированные в эксперименте, при установившемся тепловом режиме в построенной модели появляются реже и становятся менее выраженными. Это следует из того, что объем шахты в действительности не является герметично замкнутым: в районе прилегания сдвижной крыши шахты имеются открытые щели, из которых в помещение поступает холодный наружный воздух, в то время как теплый воздух из шахты выходит наружу. Исследованная модель шахты построена в предположении ее герметичности, что приводит к картине движения воздушных масс, незначительно отличающейся от экспериментальной. В то же время проведенный спектральный анализ и сравнение экспериментальных и расчетных данных указывают на то, что построенная модель помещения шахты хорошо воспроизводит структуру турбулентных движений воздуха внутри помещения, подтверждая наличие когерентной турбулентности.

Таким образом, можно сформулировать научные результаты экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в закрытой шахте главного зеркала лидарной станции.

1. Установлены теплообменные направления движения воздуха внутри помещения закрытой шахты главного зеркала лидарной станции:

- а) внутри бленды – вертикальное нисходящее;
- б) в зазорах между блендой и трапами – вертикальное восходящее с южной стороны, вертикальное нисходящее – с северной стороны.

Причиной возникновения выявленных тепловых потоков являются градиенты температуры: нагрев от входных дверей, охлаждение от крыши шахты.

2. Как эксперимент, так и численное моделирование указывают на присутствие когерентной турбулентности в шахте главного зеркала. Как известно, когерентная турбулентность по сравнению с колмогоровской обеднена мелкомасштабными неоднородностями [1–8], поэтому, на основании данных [1–6], в закрытой шахте главного зеркала можно ожидать ослабления фазовых флуктуаций оптического излучения и, следовательно [1–6], улучшения лидарных оптических изображений, что повышает эффективность лидарной станции.

3. Проведенный комплекс мероприятий по изучению структуры турбулентных движений воз-

духа в закрытой шахте главного зеркала лидарной станции (экспериментальные измерения и численное моделирование без обмена веществом среды через границы) можно рассматривать в качестве первого шага по исследованию эффективности Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН. Следующим шагом должно стать изучение структуры турбулентных движений воздуха в открытой шахте в условиях свободного теплообмена и массообмена между помещением шахты и открытой атмосферой.

Авторы выражают свою признательность Stéphane Popinet за его значительный бескорыстный вклад в развитие науки в виде разработанного им свободного программного обеспечения Gerris, что позволило нам сосредоточить свои усилия на исследовании законов гидродинамики.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 15-05-05404.

1. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. 1 // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1013–1021.
2. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. 2 // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 3. С. 207–217.
3. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G. Coherent structures in the turbulent atmosphere // Mathematical Models of Non-linear Phenomena, Processes and Systems: From Molecular Scale to Planetary Atmosphere / Eds. A.B. Nadycto et al. N.Y.: Nova Science Publishers, 2013. Ch. 20. P. 297–330.
4. Носов В.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Торгаев А.В. Атмосферная когерентная турбулентность // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 753–759; Nosov V.V., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Torgaev A.V. Atmospheric Coherent Turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 201–206.
5. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G. Coherent structures in turbulent atmosphere // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-09. P. 53–70.
6. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Causes of non-Kolmogorov turbulence in the atmosphere // Appl. Opt. 2016. V. 55, N 12. P. B163–B168.
7. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентные структуры – элементарные составляющие атмосферной турбулентности // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 236–238.
8. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентные составляющие турбулентности // Тезисы докл. Междунар. конф., посвященной памяти академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». I. Турбулентность. М.: ИФА РАН, 2013. С. 43–47.
9. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Панушев П.Г., Торгаев А.В. Результаты измерений астроклиматических характеристик подкупольного пространства телескопа АЗТ-33 Саянской солнечной обсерватории

- Института солнечно-земной физики СО РАН // Солнечно-земная физика. 2006. Вып. 9 (122). С. 101–103.
10. *Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Papushev P.G., Torgaev A.V.* Repeated testing of under dome astroclimate of AZT-33 telescope // Proc. SPIE. 2008. V. 7296-08. P. 48–53.
 11. *Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Papushev P.G., Torgaev A.V.* Astroclimate inside the dome of AZT-14 telescope of Sayan Solar Observatory // Proc. SPIE. 2008. V. 69361R. P. 1–4.
 12. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Simulation of coherent structures (topological solitons) indoors by numerical solving of hydrodynamics equations // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. P. 92920U-1-14.
 13. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Моделирование когерентных структур (топологических солитонов) в закрытых помещениях путем численного решения уравнений гидродинамики // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 120–133.
 14. *Popinet S.* The Gerris Flow Solver. A free, open source, general-purpose fluid mechanics code. 2001–2015. URL: <http://gfs.sf.net>
 15. *Popinet S.* 100 Gerris Tests. V. 1.3.2. URL: <http://gerris.dalembert.upmc.fr/gerris/tests/tests/index.html>; Gerris: Bibliography. URL: <http://gfs.sf.net/wiki/index.php/Bibliography>; List of recent publications. URL: <http://gfs.sf.net/wiki/index.php/User:Popinet>

V.V. Nosov, V.P. Lukin, E.V. Nosov, A.V. Torgaev. **Structure of air turbulent motion inside Primary mirror shaft at Siberian lidar station of IAO SB RAS. Experiment and simulation.**

Structure of air turbulent motion inside the dome room (Primary mirror closed shaft) at Siberian lidar station of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS has been experimentally and theoretically studied. The researches are needed to forecast the laser radiation distortion. Experimental measurements have been performed with the portable compact ultrasonic meteorological station. The major heat-exchange directions of air flows inside the dome have been determined. Theoretical results have been obtained by numerical solving of the boundary value problem for Navier–Stokes equations. Solitary large vortices (coherent structures, topological solitons) are observed indoors. Coherent decay of these vortices leads to the coherent turbulence. One may expect the weakening of optical radiation phase fluctuations inside the dome and, therefore, the enhancement of optical images. It increases the efficiency of lidar station.