

УДК 532.507+519.6

# Структура турбулентности над нагретыми поверхностями. Численные решения

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 6.11.2015 г.

Исследована структура турбулентных движений воздуха в замкнутых объемах (без обмена веществом на границах) над неоднородно нагретой поверхностью путем численного решения нескольких краевых задач для уравнений Навье—Стокса. Показано, что над неоднородно нагретой поверхностью возникают уединенные тороидальные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны). Количество вихрей и их внутренняя структура зависят от формы и размера нагретых неоднородностей. В случае простых форм нагрева (однородный нагрев, одно нагретое круглое пятно) в объеме наблюдается когерентная турбулентность, возникающая в результате когерентного распада вихрей. Для сложных форм нагрева (тепловая пестрота) тороидальные вихри заметно деформируются. Вихри могут быть вытянутыми вдоль поверхности и иметь спиральные линии тока. В процессе эволюции вихри заметно смешиваются. Это дает колмогоровскую (некогерентную) турбулентность. Экспериментальные данные, полученные ранее в подкупольных помещениях астрономических телескопов, подтверждают наши численные расчеты.

*Ключевые слова:* турбулентность, когерентная турбулентность, когерентная структура, топологический солитон, численное моделирование когерентных структур, уравнения Навье—Стокса, неоднородно нагретая поверхность, тепловая пестрота; turbulence, coherent turbulence, coherent structure, topological soliton, simulation of coherent structures, Navier—Stokes equations, inhomogeneously heated surface, thermal diversity.

## Введение

Экспериментальные данные измерений параметров турбулентности показывают, что в атмосфере и в воздухе закрытых помещений (например, внутри астрономических телескопов) наблюдаются когерентные структуры [1–33].

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 [1–4] когерентная структура есть солитонное решение уравнений гидродинамики (топологический трехмерный солитон, уединенная волна). Это либо односолитонное решение, либо один солитон в многосолитонном решении. Когерентная структура представляет собой результат трансформации энергетических возмущений на границах объема в движение жидкой среды.

Как установлено в [1–4], турбулентность, возникающая в результате распада главного вихря в одиночной когерентной структуре, является когерентной, детерминированной, содержащей как крупномасштабные, так и мелкомасштабные про-

дукты 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 [4, 6–11].

Турбулентность, возникающая в когерентной структуре, как показано в наших работах [2, 4, 6–11], удовлетворяет всем признакам, характеризующим появление хаоса в *титичных нелинейных динамических системах*. К этим признакам обычно относят: возникновение нерегулярных долгоживущих пространственных структур, вид (характер) которых определяется диссипативными факторами, локальную неустойчивость и фрактальность фазового пространства таких структур, появление центрального (на нулевой частоте) пика в спектре. При этом центральный пик в спектре, как установлено нами в [2, 4, 6–11], возникает за счет нестационарности случайных процессов в когерентной структуре.

В границах некоторого выделенного объема в жидкой среде могут возникать сразу несколько когерентных структур. При этом если когерентные структуры имеют разные, но близкие размеры и расположены сравнительно недалеко друг от друга («хорошо смешаны»), то наблюдается локальная изотропия турбулентности. Турбулентность в таком случае описывается колмогоровским спектром и называется колмогоровской некогерентной турбулентностью.

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

Если же одна из когерентных структур существенно больше других (или же структуры значительно удалены друг от друга), то наблюдается анизотропия турбулентности. Турбулентность тогда называется когерентной и описывается спектром турбулентности в одиночной когерентной структуре (спектром когерентной турбулентности) [6–11, 19–22]. По сравнению с колмогоровской когерентная турбулентность обеднена мелкомасштабными неоднородностями.

Свойства одиночных когерентных структур указаны и детально рассмотрены в наших статьях [1–10]. Свойства смесей (сумм) различных когерентных структур рассмотрены и изучены нами в статьях [11–26]. Краткие обзоры установленных нами ранее свойств одиночных когерентных структур и их смесей приведены в [26, 34].

Когерентная турбулентность часто наблюдается в открытой атмосфере [12–18], а также обычно присутствует на оптических трассах в помещениях внутри астрономических телескопов [1–11]. В то же время переход от одного типа турбулентности к другому (от колмогоровской к когерентной) приводит [27–33] к значительному изменению уровня флуктуаций распространяющейся световой волны. Поэтому исследование внутренней структуры движений нагретой среды необходимо для корректного прогноза характеристик оптического излучения.

Результаты численного моделирования [34], полученные нами ранее, показывают, что в замкнутом воздушном объеме с однородно нагретой подстилающей поверхностью обычно возникают удивительно крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны), когерентный распад которых порождает когерентную турбулентность. На рис. 1 [34] приведен типичный рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  для однородно нагретой подстилающей поверхности. Протяженный инерционный интервал с  $8/3$ -степенной зависимостью на рис. 1 соответствует когерентной турбулентности [1–4, 11–18].

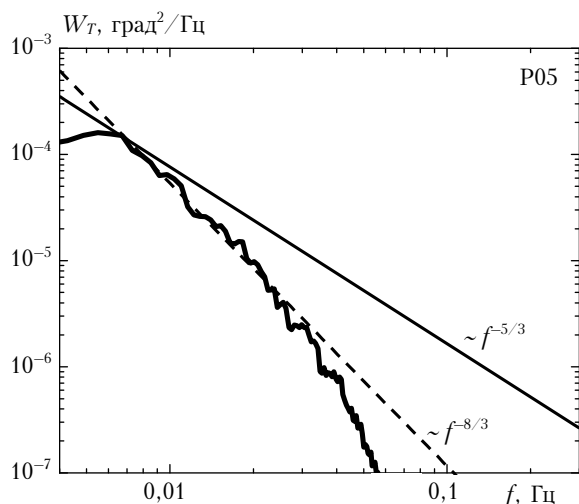


Рис. 1. Типичный рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  над однородно нагретой поверхностью [34]

Представляется интересным сравнить возникающую турбулентность над однородно нагретой и неоднородно нагретой (с «тепловой пестротой») поверхностями.

Для исследования структуры турбулентных движений воздуха в закрытых объемах (без обмена веществом среды через границы) нами сформулировано и решено несколько краевых задач для уравнений гидродинамики (уравнений Навье–Стокса) для случаев однородно и неоднородно нагретой подстилающей поверхности в объеме при отсутствии внешних движений среды (внешнего ветра).

Для численного решения краевых задач гидродинамики было использовано The Gerris Flow Solver [35–37] – свободное программное обеспечение (ПО) для решения уравнений Навье–Стокса, распространяемое в открытых исходных кодах свободно и бесплатно. Эффективность и требуемая точность ПО [35–37] проверены и подтверждены на достаточно широком классе 100 типичных тестовых задач [38], решение которых дает удовлетворительные результаты.

Указанное ПО ранее позволило нам [34, 39, 40] получить совпадающие с экспериментом численные решения нескольких краевых задач для уравнений Навье–Стокса.

## Краевые задачи

### *Кубический замкнутый объем с одним нагретым пятном постоянной температуры на подстилающей поверхности*

#### *Краевая задача*

Граничные условия Дирихле: Размеры объема ( $ш \times в \times г$ ):  $100 \times 100 \times 100$  м. Температура подстилающей поверхности  $T_{\text{ни}} = 273$  К. Пятно: температура  $T = T_{\text{ни}} + 50$  К, радиус  $R = 10$  м. Трение на верхней и боковых гранях объема отсутствует. Внутри объема подобная воздуху среда: кинематическая вязкость  $\nu = 13 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, плотность  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. Начальные условия: температура среды  $T = 273$  К.

#### *Моделирование*

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения среды внутри объема в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 2, цв. вкладка).

Как видно из рис. 2, внутри закрытого кубического объема наблюдается эволюция когерентной структуры, ограниченной кубическим объемом. Когерентная структура представляет собой тороидальный упорядоченный вихрь (или трехмерный тороидальный топологический солитон). При этом линии тока теплого воздуха выходят вверх над нагретым пятном на поверхности, на некоторой высоте направление движения отклоняется от вертикального, а затем, закручиваясь, изменяется на противо-

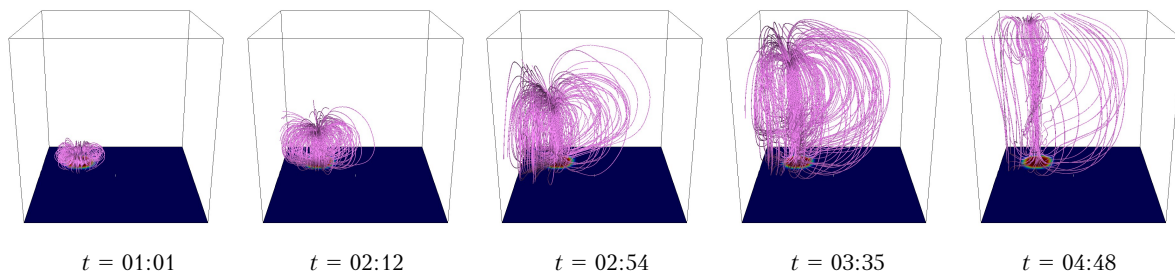


Рис. 2. Фазы формирования тороидальной конвективной ячейки Бенара над одним пятном. Сплошные линии – линии тока. Под каждым рисунком приведен момент времени моделирования в формате мин:с

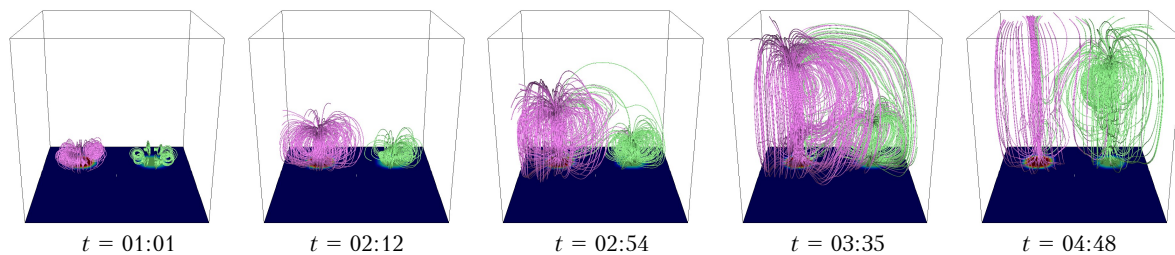


Рис. 4. Фазы формирования тороидальных конвективных ячеек Бенара над двумя пятнами. Сплошные линии – линии тока. Цвет линий тока соответствует пятну. Под каждым рисунком указан момент времени моделирования в формате мин:с

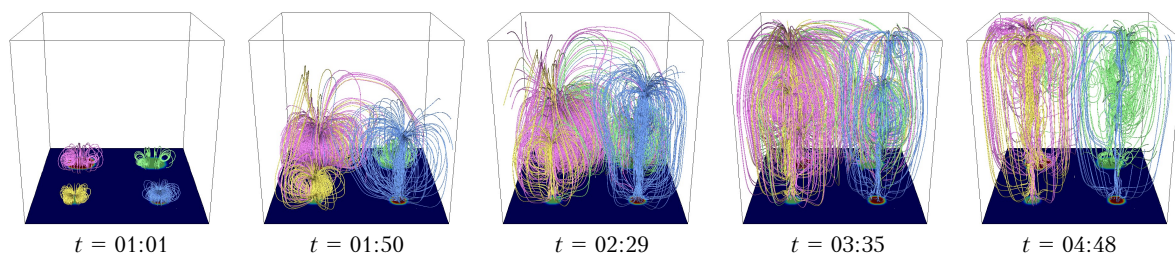


Рис. 6. Фазы формирования тороидальных конвективных ячеек Бенара над четырьмя пятнами. Сплошные линии – линии тока. Цвет линий тока соответствует пятну. Под каждым рисунком приведен момент времени моделирования в формате мин:с

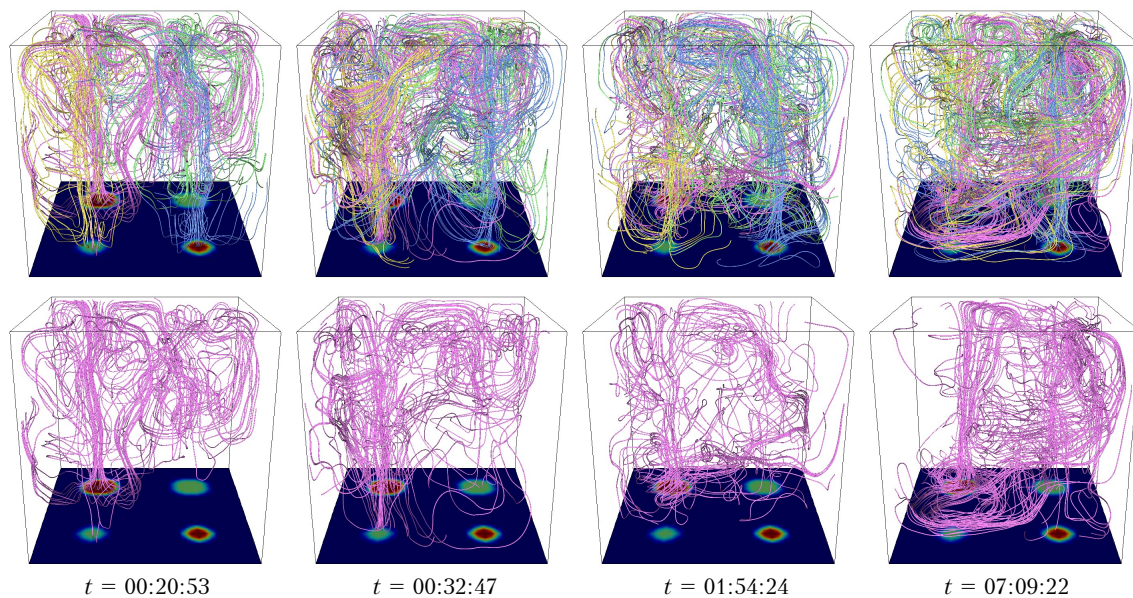


Рис. 7. Эволюция картины движений среды над четырьмя пятнами. Сплошные линии – линии тока. Цвет линий тока соответствует пятну. В нижнем ряду рисунков изолированно показаны линии тока одного пятна. Моменты времени моделирования приведены в формате час:мин:с

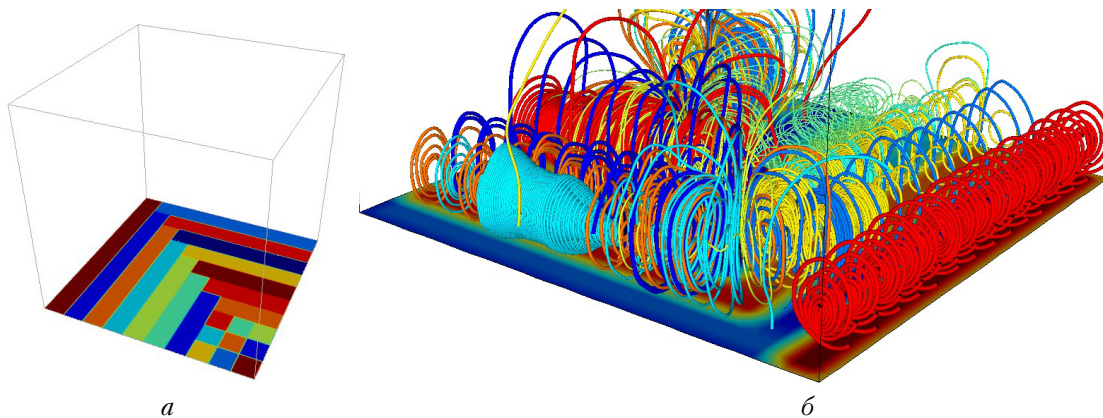


Рис. 9. Распределение температуры (тепловая пестрота) подстилающей поверхности (конфигурация 1) (а); спиральные вихри над неоднородно нагретой подстилающей поверхностью. Сплошные линии – линии тока. Цвет линий тока соответствует температуре (б)

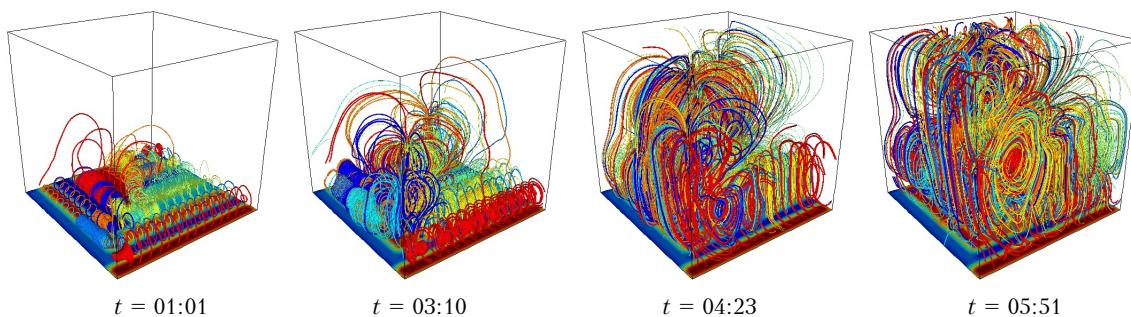


Рис. 10. Эволюция картины движений среды. Сплошные линии – линии тока. Цвет линий тока соответствует пятну. Моменты времени моделирования приведены в формате мин:с

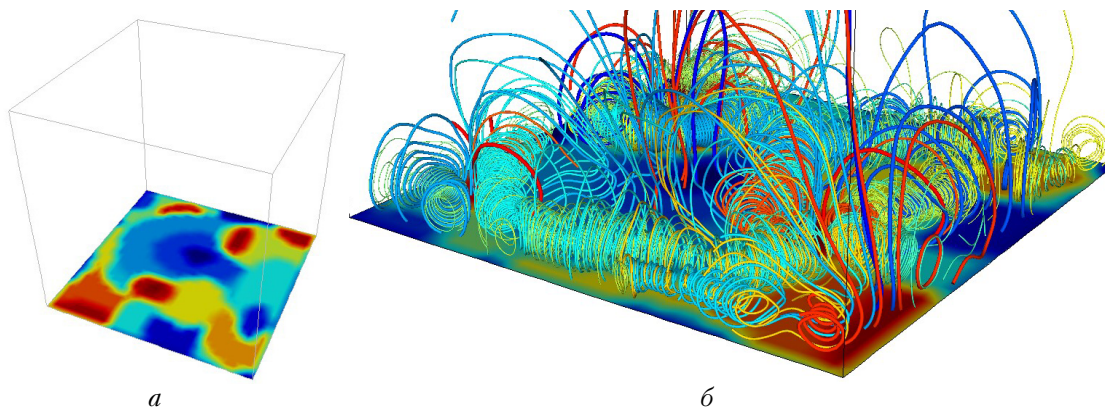


Рис. 12. Распределение температуры (тепловая пестрота) подстилающей поверхности (конфигурация 2) (а); спиральные вихри над неоднородно нагретой подстилающей поверхностью. Сплошные линии – линии тока. Цвет линий тока соответствует температуре (б)

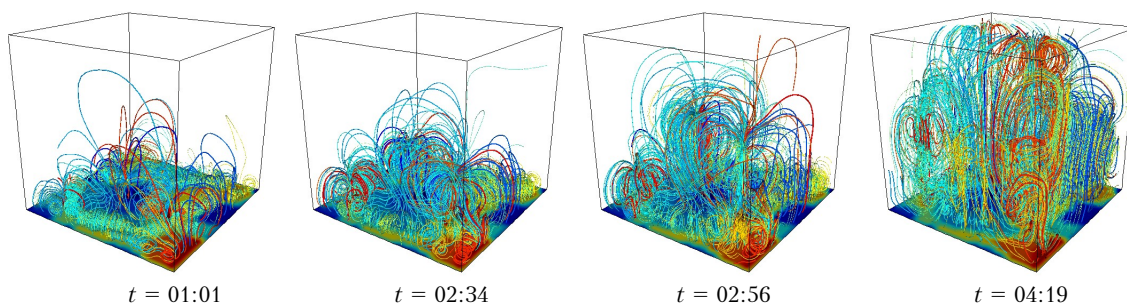


Рис. 13. Эволюция картины движений среды. Сплошные линии – линии тока. Цвет линий тока соответствует пятну. Моменты времени моделирования приведены в формате мин:с

ложное, образуя поверхность тора (тороидальное кольцо, «бублик»). После полного оборота движение вновь становится вертикальным вверх (линии тока входят в приосевую область тора, над нагретым пятном). Тороидальный вихрь, представленный на рис. 2, можно рассматривать как аналог конвективной ячейки Бенара.

### Спектральный анализ

На рис. 3 показан рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  в кубическом объеме (в верхней точке объема, точке P05) с одним нагретым пятном постоянной температуры на подстилающей поверхности.

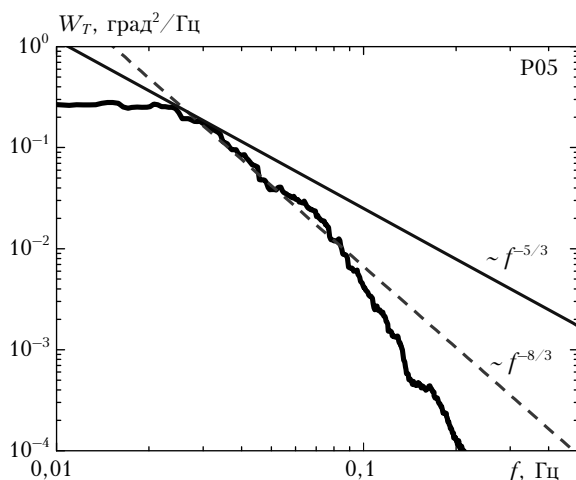


Рис. 3. Временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$ . Моделирование. Справа – схема расположения точек измерения параметров внутри объема

Теоретический спектр имеет  $8/3$ -степенное убывание в большей части инерционного интервала. Такое убывание соответствует когерентной турбулентности.

### Кубический замкнутый объем с двумя нагретыми пятнами разных температур на подстилающей поверхности

#### Краевая задача

Граничные условия Дирихле: Размеры объема (ш × в × г):  $100 \times 100 \times 100$  м. Температура подстилающей поверхности  $T_{\text{ниж}} = 273$  К. Пятно 1: температура  $T_1 = T_{\text{ниж}} + 50$  К, радиус  $R_1 = 10$  м. Пятно 2:  $T_2 = T_{\text{ниж}} + 25$  К, радиус  $R_2 = R_1$ . Трение на верхней и боковых гранях объема отсутствует. Внутри объема подобная воздуху среда:  $\nu = 13 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. Начальные условия: температура среды  $T = 273$  К.

#### Моделирование

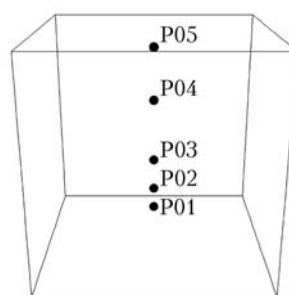
В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения среды внутри объема в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления.

Как видно, внутри закрытого кубического объема наблюдается эволюция двух когерентных структур, ограниченных кубическим объемом (рис. 4, цв. вкладка).

Каждое нагретое пятно порождает свойственную ему когерентную структуру с характерным размером и частотой главного вихря.

### Спектральный анализ

На рис. 5 показан рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  в кубическом объеме (в точке P05) с двумя нагретыми пятнами разных температур на подстилающей поверхности. Схема расположения точек измерения



параметров внутри объема аналогична предыдущей краевой задаче.

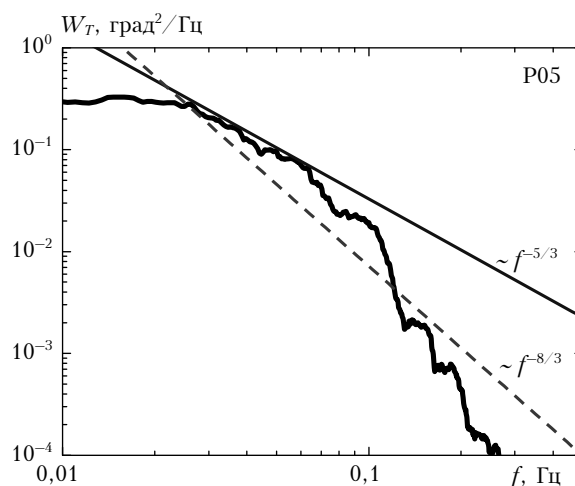


Рис. 5. Временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$

Как видно из рис. 5, смешивание двух когерентных структур, появившихся над двумя нагретыми пятнами, проявляется в спектре турбулентности наличием сравнительно непродолжительного участка колмогоровской  $5/3$ -зависимости.

**Кубический замкнутый объем с четырьмя нагретыми пятнами разных температур и размеров на подстилающей поверхности**

*Краевая задача*

Граничные условия Дирихле: Размеры объема (ш × в × г): 100 × 100 × 100 м. Температура подстилающей поверхности  $T_{\text{ниж}} = 273$  К. Пятно 1: температура  $T_1 = T_{\text{ниж}} + 50$  К,  $R_1 = 10$  м. Пятно 2:  $T_2 = T_{\text{ниж}} + 25$  К,  $R_2 = 10$  м. Пятно 3:  $T_3 = T_2$ ,  $R_3 = 5$  м. Пятно 4:  $T_4 = T_1$ ,  $R_4 = 5$  м. Трение на верхней и боковых гранях объема отсутствует. Внутри объема подобная воздуху среда:  $\nu = 13 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. Начальные условия: температура среды  $T = 273$  К.

*Моделирование*

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения среды внутри объема в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 6 и 7, цв. вкладка).

Как видно из рис. 6 и 7, внутри закрытого кубического объема наблюдается эволюция четырех когерентных структур (тороидальных конвективных ячеек), ограниченных этим объемом. Каждое нагретое пятно порождает свойственную ему когерентную структуру с характерным размером и частотой главного вихря. На начальных фазах формирования ячеек (см. рис. 6) смешивание конвективных тороидальных вихрей незначительно. На более поздних стадиях перемешивание вихрей становится существенным (см. рис. 7). Сильное смешивание наблюдается в первую очередь в верхних слоях кубического объема. При этом взаимодействие когерентной структуры с соседними структурами приводит к значительному искажению ее первоначальной тороидальной формы (см. линии тока от одного изолированного пятна в нижнем ряду на рис. 7).

*Спектральный анализ*

На рис. 8 показан рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  в кубическом объеме (в точке P05) с четырьмя нагретыми пятнами разных температур на подстилающей

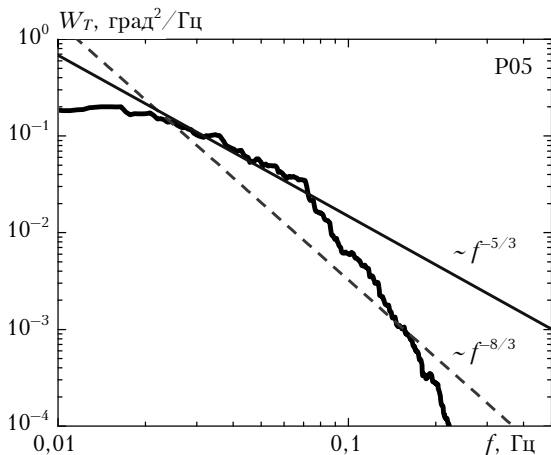


Рис. 8. Временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$

поверхности. Схема расположения точек измерения параметров внутри объема аналогична предыдущей краевой задаче.

Как видно из рис. 8, спектр турбулентности при смешивании четырех когерентных структур (над четырьмя нагретыми пятнами) имеет более протяженный колмогоровский участок (с 5/3-зависимостью) по сравнению с колмогоровским участком спектра над двумя нагретыми пятнами (см. рис. 5).

**Кубический замкнутый объем с неоднородно нагретой подстилающей поверхностью (конфигурация 1)**

*Краевая задача*

Граничные условия Дирихле: Размеры объема (ш × в × г): 100 × 100 × 100 м. Температура подстилающей поверхности  $T_{\text{ниж}} = T(\mathbf{r}) \in [273 \text{ К}, 323 \text{ К}]$ . Трение на верхней и боковых гранях объема отсутствует. Внутри объема подобная воздуху среда:  $\nu = 13 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. Начальные условия: температура среды  $T = 273$  К.

*Моделирование*

Моделирование тепловой пестроты произведено путем разбиения всей подстилающей поверхности на смежные прямоугольные участки разных размеров с различной температурой (рис. 9, а, цв. вкладка). Каждый такой участок порождает свойственную ему когерентную структуру с характерным размером и частотой главного вихря.

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения среды внутри объема в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 9, б, 10).

Как видно из рис. 9, б, 10, на начальных фазах эволюции движения среды над подстилающей поверхностью с тепловой пестротой возникают спиральные вихри. На последующих фазах происходит интенсивное перемешивание эволюционирующих спиральных вихрей. Наиболее сильное перемешивание наблюдается в верхней части рассматриваемого объема.

Из сравнения данных рис. 9, б, 10, полученных для вытянутых прямоугольных нагретых участков поверхности, с данными рис. 2, 4, 6 для круглых нагретых пятен, видно, что спиральные линии тока на рис. 9, б, 10 можно рассматривать как линии тока вытянутых вдоль поверхности тороидальных вихрей. Это хорошо заметно из сравнения начальных стадий развития вихрей над поверхностями. Осесимметричные тороидальные вихри (с круглой внутренней частью) характерны для круглых нагретых пятен (рис. 2, 4, 6). Вытянутые же вдоль поверхности тороидальные вихри (со спиральными линиями тока) соответственно возникают от вытянутых прямоугольных нагретых участков (рис. 9, б, 10). Как симметричные тороидальные вихри, так и вытянутые вдоль поверхности тороидальные

дальние вихри возникают из-за действия локальных термодинамических градиентов между смежными участками поверхности с разной температурой.

Спиральные сильно закручивающиеся вихри обычно имеют достаточно широкий набор гармоник с разными близкими периодами (с разными близкими размерами). Такой набор, как показано в [19–22], обеспечивает появление в спектрах 5/3-инерционного интервала колмогоровской турбулентности. Следовательно, в соответствии с выводами наших работ [19–22] в среде над неоднородно нагретой поверхностью можно ожидать появление достаточно протяженных инерционных интервалов спектра с колмогоровским 5/3-убыванием. Спектральные данные наших расчетов (рис. 11 и ниже следующий рис. 14) подтверждают этот вывод: в обоих случаях в спектре наблюдается сравнительно протяженный колмогоровский инерционный интервал с 5/3-степенной зависимостью.

### Спектральный анализ

На рис. 11 показан рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  в кубическом объеме (в точке P05) над неоднородно нагретой подстилающей поверхностью. Схема расположения точек измерения параметров внутри объема аналогична предыдущей краевой задаче.

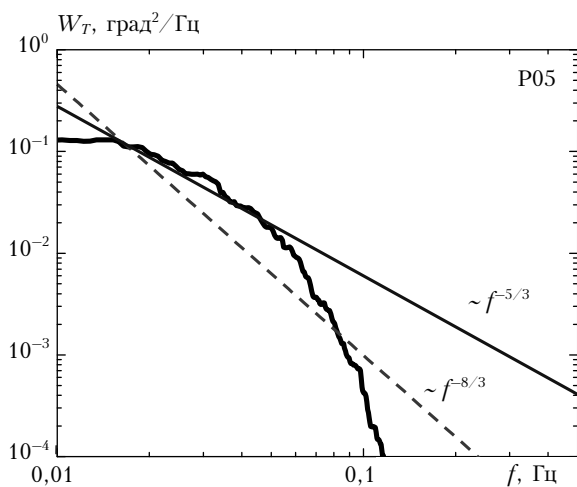


Рис. 11. Временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  (конфигурация 1)

Как видно из рис. 11, влияние множества когерентных структур, порожденных тепловой пестротой поверхности, отражается в спектре турбулентности достаточно протяженным участком колмогоровской 5/3-зависимости.

### Кубический замкнутый объем с неоднородно нагретой подстилающей поверхностью (конфигурация 2)

#### Краевая задача

Граничные условия Дирихле: Размеры объема (ш × в × г): 100 × 100 × 100 м. Температура подсти-

лающей поверхности  $T_{\text{шт}} = T(\mathbf{r}) \in [273 \text{ K}, 323 \text{ K}]$ . Трение на верхней и боковых гранях объема отсутствует. Внутри объема подобная воздуху среда:  $\nu = 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Начальные условия: температура среды  $T = 273 \text{ K}$ .

### Моделирование

Моделирование тепловой пестроты произведено путем разбиения всей подстилающей поверхности на смежные участки разных размеров с различной температурой (рис. 12, а, цв. вкладка). Каждый такой участок порождает свойственные ему когерентные структуры с характерными размерами и частотами главных вихрей.

По сравнению с конфигурацией 1 (рис. 9, а), неоднородный нагрев подстилающей поверхности для конфигурации 2 (рис. 12, а) значительно ближе к тепловой пестроте, реально наблюдаемой в природных условиях.

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения среды внутри объема в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления.

Как видно, над неоднородно нагретой поверхностью (рис. 12, б, 13) в конфигурации 2 наблюдаются спиральные закручивающиеся вихри подобно конфигурации 1 (рис. 9, б, 10). Количество вихрей и их внутренняя структура зависят от формы и размера нагретых неоднородностей.

### Спектральный анализ

На рис. 14 показан рассчитанный временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  в кубическом объеме (в точке P05) над неоднородно нагретой подстилающей поверхностью. Схема расположения точек измерения параметров внутри объема аналогична предыдущей краевой задаче.

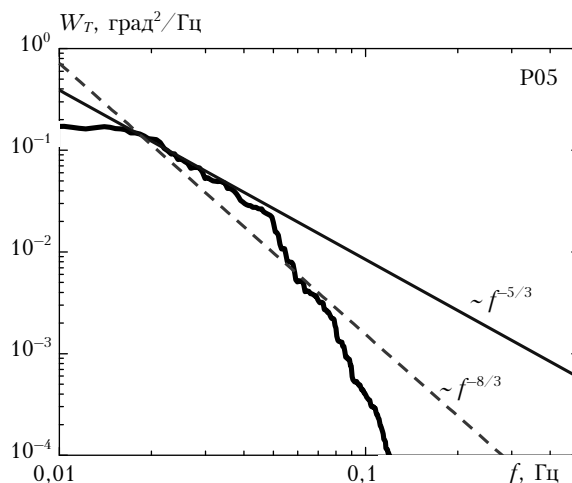


Рис. 14. Временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  (конфигурация 2)

Из рис. 14 видно, что влияние множества когерентных структур, порожденных тепловой пестротой поверхности, проявляется в спектре (как

и на рис. 11) относительно протяженным  $5/3$ -участком колмогоровской турбулентности.

Сравним расчетные данные, приведенные на рис. 11 и 14, с экспериментом.

В 2005 и 2007 гг. нами были выполнены экспериментальные исследования подкупольных характеристик турбулентности в астрономическом телескопе АЗТ-33 Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН [11]. Измерения проведены с использованием малогабаритной ультразвуковой метеостанции в разных точках по объему подкупольного пространства (при закрытой и открытой щели купола).

Эксперименты в АЗТ-33 обнаружили наличие внутрикупольных теплых воздушных потоков, включая потоки из открытых технологических щелей в перекрытиях этажей и лестничного проема. Причиной возникновения тепловых потоков, как установлено в [11], являлись неоднородно нагретые поверхности в подкупольном помещении и на нижних этажах телескопа. Наличие неоднородно нагретых поверхностей внутри телескопа позволяет говорить о смешивании нескольких когерентных структур, возникающих над нагретыми пятнами. Следовательно, спектр турбулентности в подкупольном пространстве телескопа должен отличаться от спектра когерентной турбулентности, приведенного на рис. 1.

На рис. 15 [11] представлен экспериментальный частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  в подкупольном пространстве АЗТ-33 (при закрытой щели).

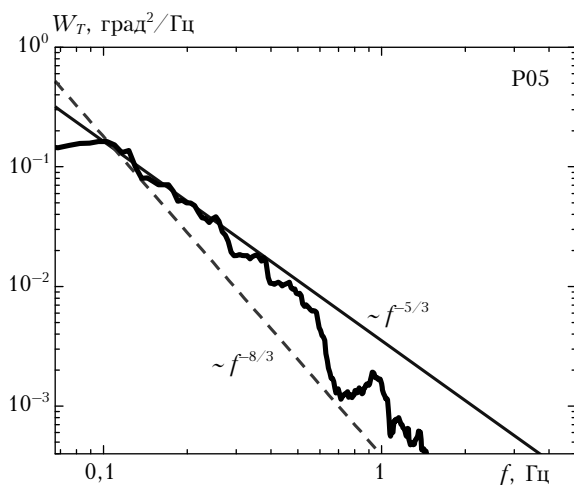


Рис. 15. Экспериментальный временной частотный спектр флуктуаций температуры  $W_T$  в подкупольном пространстве АЗТ-33 при закрытом состоянии щели [11]

Как видно, в спектре на рис. 15, в отличие от рис. 1, в инерционном интервале наблюдается достаточно продолжительный  $5/3$ -участок колмогоровской турбулентности. Сравнение колмогоровских участков спектральных данных, приведенных на рис. 11, 14 и рис. 15, показывает, что расчетные спектры для случаев тепловой пестроты подстилающей поверхности (рис. 11, 14) неплохо согла-

суются с экспериментом (рис. 15). В свою очередь, это сравнение позволяет объяснить появление колмогоровской турбулентности в АЗТ-33 наличием неоднородно нагретых поверхностей в помещении телескопа.

## Заключение

Таким образом, исследована структура турбулентных движений воздуха в замкнутых объемах (без обмена веществом на границах) над неоднородно нагретой подстилающей поверхностью путем численного решения нескольких краевых задач для уравнений гидродинамики (уравнений Навье–Стокса). В качестве краевых условий приняты соответственно одно, два и четыре нагретых круглых пятна, а также две конфигурации поверхности с различной тепловой пестротой.

Показано, что над неоднородно нагретой поверхностью возникают уединенные тороидальные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны). Количество вихрей и их внутренняя структура зависят от формы и размера нагретых неоднородностей. Каждое нагретое пятно порождает свойственную ему когерентную структуру с характерным размером и частотой главного вихря. В случае простых форм нагрева (однородный нагрев, одно нагретое круглое пятно) в объеме обнаруживается когерентная турбулентность, возникающая в результате когерентного распада одного вихря (или нескольких слабо смешивающихся вихрей).

Для сложных форм нагрева (тепловая пестрота) наблюдаются заметные деформации тороидальных вихрей. Вихри, например, могут быть вытянутыми вдоль поверхности и иметь спиральные линии тока. В процессе эволюции вихрей происходит их заметное смешивание. Это приводит к появлению колмогоровской (некогерентной) турбулентности.

Экспериментальные данные, полученные ранее в подкупольных помещениях астрономических телескопов, подтверждают наши численные расчеты.

Полученные численные решения краевых задач также подтверждают сформулированный нами ранее экспериментально [1–4] и теоретически [19–22] вывод, что смешивание когерентных структур с разными близкими размерами (и с близкими частотами главных вихрей) дает в итоге колмогоровскую турбулентность.

Авторы считают своей приятной обязанностью выразить искреннюю признательность Stéphane Popinet за его значительный бескорыстный вклад в развитие науки в виде разработанного им свободного программного обеспечения Gerris, что позволило авторам сосредоточить свои усилия в 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 атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1013–1022.
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 атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 3. С. 207–217.
  3. Nosov V.V., Grigor'ev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Astroclimate of specialized rooms of the Large solar vacuum telescope. Part 1 // Atmosph. Ocean. Opt. 2007. V. 20, N 11. P. 926–934.
  4. Nosov V.V., Grigor'ev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Astroclimate of specialized rooms of the Large solar vacuum telescope. Part 2 // Atmosph. Ocean. Opt. 2008. V. 21, N 3. P. 180–190.
  5. Nosov V.V., Grigor'ev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Papishev P.G., Torgaev A.V. Astroclimate inside the dome of AZT-14 telescope of Sayan Solar Observatory // Proc. SPIE. 2007. V. 69361R. P. 1–4.
  6. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентные структуры в турбулентной атмосфере. Эксперимент и теория // Солнечно-земная физ. 2009. Вып. 14. С. 97–113.
  7. 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.
  8. 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. by A.B. Nadycto et al. N.Y.: Nova Science Publishers, 2013. Chap. 20. P. 297–330.
  9. Носов В.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Торгаев А.В. Атмосферная когерентная турбулентность // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 753–759.
  10. 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.
  11. 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 физ. 2006. Вып. 9 (122). С. 101–103.
  12. Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G. Result of measurements of the astroclimate characteristics of astronomical telescopes in the mountain observatories // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-11. P. 82–87.
  13. Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G. Astroclimate parameters of the surface layer in the Sayan solar observatory // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-12. P. 87–94.
  14. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентная турбулентность вблизи приемной апертуры астрономического телескопа // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 212–214.
  15. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентная турбулентность на территории Байкальской астрофизической обсерватории // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 204–205.
  16. Носов В.В., Лукин В.П., Торгаев А.В. Когерентные структуры в атмосфере, возникающие при обтекании препятствий // Материалы XVI Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. С. 645–648.
  17. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Results of measurements of A.N. Kolmogorov and A.M. Obukhov constants in the Kolmogorov–Obukhov law // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-09. P. 70–77.
  18. Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V. Structure function of temperature fluctuations in coherent turbulence // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-13. P. 94–97.
  19. 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.
  20. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G. The Solitonic Hydrodynamical Turbulence // Proc. VI Int. Conf. «Solitons Collapses and Turbulence: Achievements Developments and Perspectives». Program committee chief is academician V.E. Zakharov. Novosibirsk, 2012. P. 108–109.
  21. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентные составляющие турбулентности // Тез. докл. Междунар. конф., посвященной памяти академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». I. Турбулентность. М.: ИФА РАН, 2013. С. 43–47.
  22. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентные составляющие синоптических спектров атмосферной турбулентности // Изв. вузов. Физ. 2015. Т. 58, № 8/3. С. 206–209.
  23. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Проблема когерентной турбулентности // Вестник МГТУ «Станкин». 2013. Т. 24, № 1. С. 103–107.
  24. Lukin V.P., Bol'basova L.A., Nosov V.V. Comparison of Kolmogorov's and coherent turbulence // Appl. Opt. 2014. V. 53, N 10. P. B231–B236.
  25. Lukin V.P., Nosov V.V., Kovadlo P.G., Nosov E.V., Torgaev A.V. The reason of non-Kolmogorov's turbulence in atmosphere // Appl. Opt. 2015. V. 54 (in print). Manuscript ID: 252039.
  26. Носов В.В., Лукин В.П., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В. Оптические свойства когерентной турбулентности в горном пограничном слое. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015 (в печати). 154 с.
  27. Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V. Decrease of the light wave fluctuations in the coherent turbulence // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-10. P. 77–82.
  28. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099–1110.
  29. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Оптимальное размещение наземных коротковолновых приемников атмосферных телекоммуникационных систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 76–82.
  30. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Флуктуации астрономических изображений в когерентной турбулентности // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 223–225.
  31. Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Intermittency of the astronomical images jitter in the high-mountain observations // Proc. SPIE. 2014. SPIE paper number AO200-47.

32. *Lukin V.P., Nosov V.V., Torgaev A.V.* Features of optical image jitter in a random medium with a finite outer scale // *Appl. Opt.* 2014. V. 53, N 10. P. B196–B204.
33. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Эффект перемежаемости турбулентности в высокогорных наблюдениях // *Изв. вузов. Физ.* 2015. Т. 58, № 8/3. С. 210–213.
34. *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.
35. *Popinet S.* The Gerris Flow Solver. A free, open source, general-purpose fluid mechanics code. 2002–2014. URL: <http://gfs.sf.net>
36. *Popinet S.* Gerris: A tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries // *J. Comput. Phys.* 2003. V. 190, N 2. P. 572–600.
37. *Popinet S., Smith M., Stevens C.* Experimental and numerical study of the turbulence characteristics of air flow around a research vessel // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2004. V. 21, iss. 10. P. 1575–1589.
38. *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>
39. *Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., 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. SPIE Paper Number AO200-212.
40. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Структура движений воздуха на оптических трассах в специализированных помещениях астрономических телескопов. Численное моделирование // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 7. С. 614–621.

*V.V. Nosov, V.P. Lukin, E.V. Nosov, A.V. Torgaev.* **Turbulence structure over heated surfaces. Numerical solutions.**

The structure of air turbulent motion inside closed volumes (without exchange of internal and external medium through the borders) over inhomogeneously heated underlying surfaces is studied by numerical solution of boundary value problems for hydrodynamics equations (Navier–Stokes). The solitary large vortices (coherent structures, topological solitons) are observed over an inhomogeneously heated surface. Number of vortices and its internal structure depend on the form and size of heated inhomogeneities. In the case of simple forms of heating (homogeneous heating, heated single round spot), the coherent turbulence resulting from the decay of coherent vortices is observed inside a closed volume. For complex forms of heating (thermal diversity, dapple, motley), the toroidal vortices are noticeably deformed. The vortices can be extended along the surface and can have the spiral (helix) streamlines. The vortices are noticeably mixed during the evolution process. It leads to Kolmogorov (incoherent) turbulence. Our experimental data obtained earlier inside dome rooms of astronomical telescopes confirm our numerical simulations.