

Исследования астроклимата в Специальной астрофизической обсерватории РАН

В.В. Носов¹, В.П. Лукин¹, Е.В. Носов¹, А.В. Торгаев¹, В.Л. Афанасьев²,
Ю.Ю. Балегга², В.В. Власюк², В.Е. Панчук², Г.В. Якопов^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН

369167, г. Нижний Архыз, Зеленчукский р-н, Карачаево-Черкесская республика

Поступила в редакцию 14.03.2018 г.

Представлены результаты измерений характеристик астроклимата в Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН (Северный Кавказ) в 2012 и 2016 гг. Экспериментальные результаты получены из долговременных рядов наблюдений дневного и ночного астроклимата в САО. Установлено присутствие над территорией САО неколомгоровской когерентной турбулентности, в которой улучшается качество изображений телескопов. Выяснено влияние типа подстилающей поверхности и направления скорости ветра на режим возникновения когерентной турбулентности. Установлено, что причинами ее появления являются горный рельеф и неравномерность нагрева подстилающей поверхности. Экспериментально исследовано распределение скоростей движений воздуха в объеме подкупольного пространства Большого телескопа азимутального (БТА). Проведено численное моделирование движений воздушных масс в подкупольном пространстве БТА для анализа влияния температурного режима и формы конструкций. Решения краевой задачи подтверждают наличие экспериментально зарегистрированной вихревой структуры с вертикальной осью вращения. Причинами ее возникновения являются температурные градиенты подкупольных поверхностей.

Ключевые слова: телескоп, астроклимат, турбулентность, когерентная структура, уравнения гидродинамики; telescope, astroclimate, turbulence, coherent structure, hydrodynamics equations.

Введение

Под астроклиматом обычно понимается совокупность оптических свойств атмосферы, определяющая эффективность астрономических наблюдений. Поэтому он обуславливается климатом и рельефом географического региона, где расположен астрономический приемник. Астроклимат включает достаточно много составляющих, например молекулярное и аэрозольное рассеяние и поглощение излучения, регулярную рефракцию, турбулентность и др. Однако в условиях, при которых обычно проводятся астрономические наблюдения (слабо замутненная безоблачная атмосфера), основной составляющей астроклимата, влияющей на качество астрономических изображений, становится атмосферная турбулентность.

Как известно [1], исследования астроклимата Северного Кавказа, включая район размещения Спе-

циальной астрофизической обсерватории (САО) РАН, ведутся уже более полувека, в том числе (с 1956 г.) с целью выбора места установки Большого телескопа азимутального (БТА). Авторами настоящей работы продолжены исследования астроклимата в САО РАН.

Представлены результаты экспериментальных измерений, выполненных в 2012 и 2016 гг. Мобильными ультразвуковыми метеосистемами были проведены измерения суточного хода характеристик астроклимата на 20-метровой метеорологической вышке на площадке вблизи БТА. Установлено присутствие над территорией САО когерентной турбулентности, в которой улучшается качество астрономических изображений телескопов. Причинами ее появления в районе БТА являются неравномерность нагрева подстилающей поверхности и ущелья, имеющие протяженность поперек Кавказского хребта и создающие «русло» для воздушных масс. Общий уровень зарегистрированной интенсивности турбулентности в ночное наблюдательное время на площадке БТА в среднем низкий.

Кроме того, были выполнены измерения астроклимата в подкупольном пространстве БТА. В нем обнаружена интенсивность турбулентности, сравнимая с наружной. Установлено наличие «шахматной структуры» распределения параметров турбулентности под куполом. Зарегистрирована экспери-

* Виктор Викторович Носов (nosov@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Евгений Викторович Носов (nev@iao.ru); Андрей Витальевич Торгаев (torgaev@iao.ru); Виктор Леонидович Афанасьев (vafan@sao.ru); Юрий Юрьевич Балегга (balega@sao.ru); Валерий Валентинович Власюк (vvlas@sao.ru); Владимир Евгеньевич Панчук (panchuk@yandex.ru); Григорий Владимирович Якопов (yakopov@sao.ru).

ментальная картина движений воздушных подкупольных потоков и выявлено присутствие вихревой когерентной структуры, возникающей вследствие градиента температуры в 2–3 °С по всей высоте подкупольного пространства.

Также проведено численное моделирование движений воздушных масс в подкупольном пространстве БТА для анализа влияния температурного режима и формы конструкций. Численные решения соответствующих краевых задач подтверждают наличие экспериментально зарегистрированной вихревой структуры с вертикальной осью вращения; причинами ее возникновения являются температурные градиенты подкупольных поверхностей.

1. Измерения астроклимата над территорией САО РАН

Рассмотрим результаты измерений суточного хода (долговременные ряды наблюдений) характеристик астроклимата на метеорологической вышке на площадке вблизи башни телескопа БТА. Обсерватория САО находится на вершине горы на высоте около 2070 м над ур. м. Проведено исследование локальной структуры атмосферной турбулентности, включающей когерентную и колмогоровскую турбулентности. Обнаруженные закономерности согласуются с результатами измерений авторов в других горных обсерваториях (за более чем десятилетний период в различных сезонных и климатических условиях [2]).

Для регистрации параметров атмосферной турбулентности с целью выяснения условий возникновения областей когерентной турбулентности над территорией обсерватории использовались мобильные ультразвуковые метеосистемы АМК-03 в 2012 г. и «Метео-2» в 2016 г. [2]. Метеосистемы были установлены на 20-метровой метеорологической вышке, находящейся на площадке вблизи башни телескопа в 24 м к юго-западу от стены БТА на краю ущелья. Высота центров измерительных головок над подстилающей поверхностью составила 22,5 м. Измерения проводились с 30.07 по 7.08.2016 г. в стабильных климатических условиях. Утром и днем наблюдения велись при ясном небе, вечером после 17:00 появлялась сплошная облачность. Средняя температура T в измерениях на вышке 1–4.08.2016 г. (во время одновременных подкупольных измерений) была достаточно стабильна и изменялась от 11 до 15 °С, тогда как в измерениях 26.10–1.11.2012 г. колебания температуры находились в более широком интервале — от 5 до 13 °С. Зарегистрированные данные наших измерений в САО в 2012 и 2016 гг. согласуются с результатами предыдущих многолетних измерений в САО на метеовышке и внутри БТА (см., например, [1]).

В измерениях на метеовышке в 2016 г. подтвердилось зарегистрированное ранее в 2012 г. присутствие над территорией САО когерентной турбулентности, при которой улучшается качество изображения [2–6]. Спектры флуктуаций темпера-

туры в большинстве случаев имеют 8/3-наклон на значительном участке инерционного интервала и «ступеньки», а также изрезаны, что свидетельствует о смешивании нескольких когерентных структур (рис. 1) [2, 3].

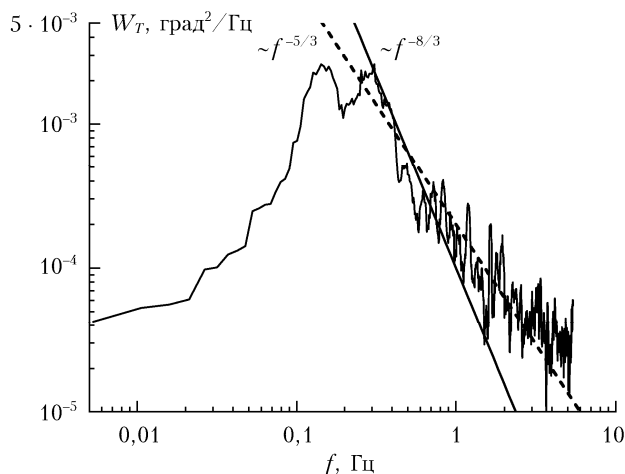


Рис. 1. Временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T на метеовышке 7.08.2016 г.

Причина появления когерентной турбулентности над территорией САО — горный рельеф местности. К югу от горы, где установлен БТА (гора БТА) (рис. 2), находится гора Пастухова (2733 м над ур. м.), которая выше площадки обсерватории (2070 м над ур. м.). К северо-востоку от БТА имеется ровная площадка протяженностью около 500 м, которая понижается в сторону пос. Нижний Архыз примерно на 1 км и затем более полого спускается в долину Ставропольского края (до 200 м). В направлении на юго-запад БТА находится на краю глубокого (около 800 м) ущелья р. Большой Зеленчук. В 3 км юго-восточнее БТА начинается ущелье р. Марухи.

Как известно [7], при обтекании гор воздушным потоком при значительных скоростях ветра на подветренной стороне горного хребта образуется стабильный вихрь (когерентная структура), размеры которого, по данным экспериментальных исследований, могут достигать нескольких сотен метров. Значительные скорости ветра (4–5 м/с и более) обычно определяют движениями крупномасштабных воздушных потоков выше слоя трения. Вихри могут отрываться от хребта и переноситься по воздушному потоку. При меньших скоростях ветра в приземном слое проявляется влияние на воздушные потоки более мелких деталей рельефа.

Ущелья и реки в районе горы БТА имеют протяженность поперек Кавказского хребта вдоль линии с юго-запада на северо-восток, т.е. создают «русло» для воздушных масс в приземном слое атмосферы. Потоки воздуха на небольших высотах испытывают влияние рельефа и могут иметь соответствующие направления. Юго-западнее находится также Черное море, имеющее отличную от гор температуру поверхности. Поскольку БТА расположен на противоположном морю склоне Северного

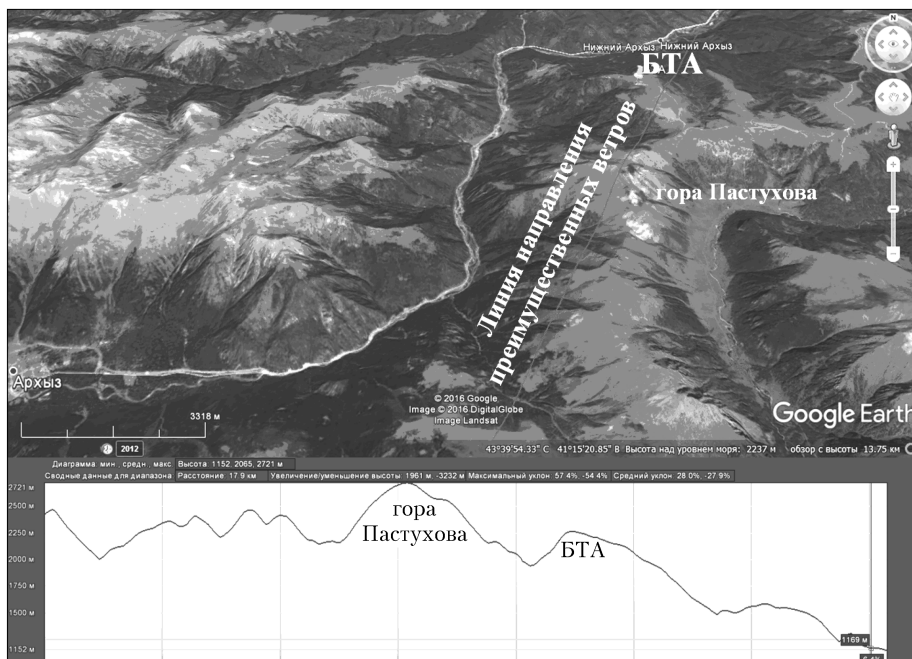


Рис. 2. Вертикальный профиль поверхности по линии направления преимущественных ветров (Google Earth, [8])

Кавказа, то направление ветра здесь может оказаться противоположным бризовым ветрам на берегу моря. Причиной возникающих ветров является температурный контраст между горным хребтом Кавказа и долиной Ставропольского края. Летними ночами горы остывают быстрее долины, а днем при ясном небе северо-восточный склон гор Кавказа нагревается быстрее. Возникающий вдоль юго-западного направления температурный градиент приводит к появлению анабатических (восходящих) дневных и кататических (нисходящих) ночных ветров, аналогичных бризовым. Подобный механизм горно-долинной циркуляции для района САО описан в статье [1]. Зимой, в присутствии снежного покрова, более существенным, вероятно, становится влияние незамерзающего Черного моря. Таким образом, в районе горы БТА имеется выделенное направление среднего ветра: юго-запад–северо-восток.

В ходе измерений 2012 г., проводившихся на метеовышке возле БТА, зарегистрировано такое же выделенное направление ветра D вдоль линии юго-запад–северо-восток, D – отсчитываемый от севера по часовой стрелке (через восток) осредненный угол направления горизонтального ветра. Ночью ветер имел преимущественно направление $D = 200\text{--}270^\circ$ со стороны ущелья р. Большой Зеленчук, днем ветер часто менял направление на противоположное $D = 10\text{--}50^\circ$, разброс по остальным направлениям незначительный.

В измерениях 2016 г. на метеовышке получены следующие данные: ночь (22:00–05:00) – в основном юго-западный ветер ($D = 220\text{--}280^\circ$), день (07:00–18:00) – средний ветер с севера (из долины Ставропольского края), утром и вечером (05:00–08:00 и 18:00–22:00) происходил переходный процесс, во время которого направление среднего ветра значительно менялось. В ночное время ветер также

часто направлен с юго-востока со стороны ущелья р. Марухи ($D = 110\text{--}140^\circ$).

При юго-западном и юго-восточном ветрах со стороны ущелий рр. Большой Зеленчук и Марухи соответственно над БТА может образоваться вихревая когерентная структура [2, 3, 6, 9]. При таких направлениях ветров в ночных измерениях 2012 г. частотные спектры флуктуаций температуры имеют $8/3$ -наклон в инерционном интервале, что свидетельствует о присутствии когерентных структур (см. рис. 1) [2–6]. Ночью при юго-западном ветре в 90% измерений (при юго-восточном – в 75%) частотные спектры оказались когерентными. Тогда как днем, при противоположном ветре со стороны долины Ставропольского края, несмотря на горный рельеф вблизи БТА, когерентная турбулентность зарегистрирована уже только в 50% измерений. В остальных случаях зарегистрированы колмогоровские спектры.

Средняя скорость ветра днем из Ставропольской долины (с севера) во время наблюдений $V = 2\text{--}4$ м/с, ночью с гор $V = 1\text{--}2$ м/с. Такие невысокие средние скорости говорят о местном характере возникающих ветров, определяемых локальными температурными градиентами. Вертикальные составляющие скорости ветра довольно велики: до $w = \pm 1,5$ м/с. Поэтому ветровая тень (турбулентный след) горы Пастухова, возможно, не играет значительной роли, так как ветер формируется продолжительным горным склоном (более 2 км) и направлен вдоль склона вверх или вниз. Кроме того, преимущественные ветра в наших измерениях были направлены ночью не с юга, где находится гора Пастухова, а с юго-запада со стороны глубокого ущелья р. Большой Зеленчук. Значения структурной характеристики показателя преломления (интенсивность турбулентности) C_n^2 в основном менее

$1,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$, максимальное зарегистрированное значение $C_n^2 = 3,3 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-2/3}$. Значения C_n^2 обычно возрастают с увеличением скорости ветра и больше зависят от V , чем от времени суток. Как отмечено выше, в ночное время летом скорость ветра невелика (в среднем не выше 1–3 м/с). Поэтому общий уровень флуктуаций температуры на площадке БТА в наблюдательное время низкий (пониженные значения C_n^2), что обеспечивает качество астрономических изображений в наблюдениях на БТА.

Отметим, что в измерениях 2.08.2016 г. в течение часа (с 19:40 до 20:30) зарегистрированы высокие усредненные за 2 мин скорости юго-восточного ($\langle D \rangle = 128^\circ$) ветра до 10 м/с. Происходил вечерний переходный процесс смены направления ветра: за рассматриваемый час ветер поменялся с восточного на южный до направления со стороны горы Пастухова. При этом значение структурной характеристики уменьшилось в 2–3 раза — со средних за день $C_n^2 \approx 3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$ до $C_n^2 = 3,7 \cdot 10^{-17} \text{ см}^{-2/3}$.

2. Астроклимат в подкупольном пространстве БТА

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований 2012 и 2016 гг. локальной структуры турбулентности и других параметров астроклимата в подкупольном пространстве БТА. Измерения проводились при закрытом и открытом куполе в целях анализа влияния технологических конструкций, температурного режима элементов телескопа и купола на качество изображения.

2.1. Основные результаты измерений 2012 г.

Первичные измерения выполнены нами на БТА 22–31.10.2012 г. Для этого использовалась ультразвуковая метеостанция «Метео-2». Измерения произведены в разных точках по всему объему специализированного помещения подкупольного пространства БТА. При этом метеостанция крепилась на различных радиусах (удалениях от центра вращения телескопа) при помощи кронштейнов к конструкциям купола и телескопа, ориентируемого под различными азимутальными и зенитными углами. Результаты исследований 2012 г. показали, что в подкупольном пространстве БТА наблюдается одна крупная когерентная структура (рис. 3) [2, 3, 9]. В каждой точке измерения частотные спектры флуктуаций температуры в инерционном интервале имеют $8/3$ -степенное убывание (рис. 4). Спектры становятся колмогоровскими ($5/3$ -степенное убывание) только при измерениях непосредственно в открытой щели телескопа. Исследование распределения скоростей внутри структуры показывает, что возникающую когерентную структуру можно интерпретировать как аналог ячейки Бенара с двумя крупными вихрями, наибольший диаметр

каждого из которых около 16 м (рис. 3). Ячейка распадается на более мелкие вихри.

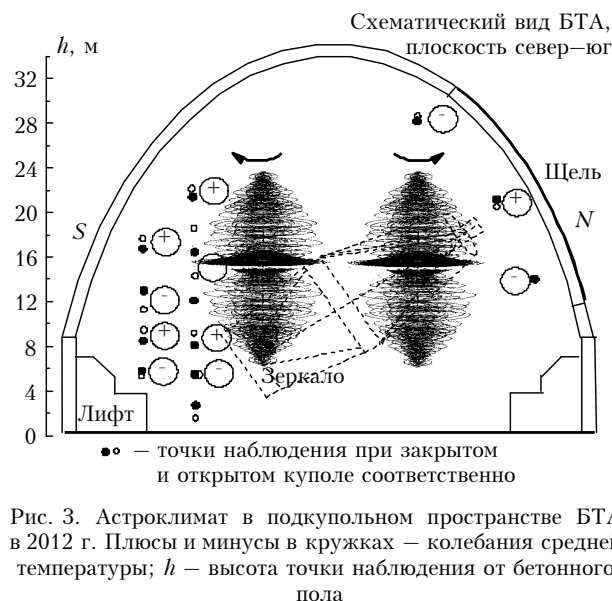


Рис. 3. Астроклимат в подкупольном пространстве БТА в 2012 г. Плюсы и минусы в кружках — колебания средней температуры; h — высота точки наблюдения от бетонного пола

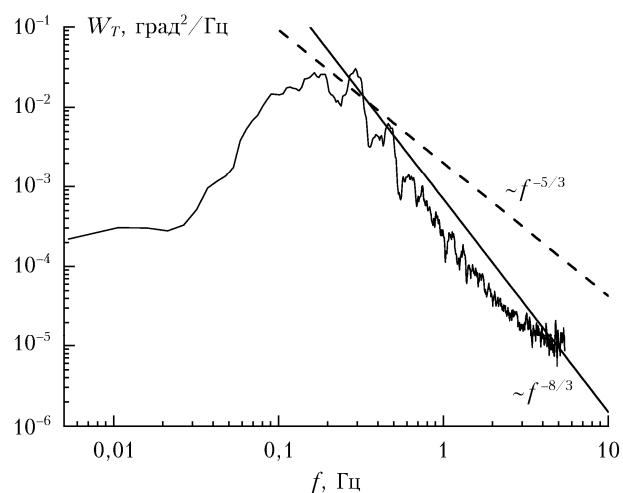


Рис. 4. Спектр температуры под закрытым куполом телескопа БТА в 2012 г. Когерентная турбулентность ($W_T \sim f^{-8/3}$)

Диаметр вихря с наибольшей энергией при этом составляет около 2 м. Впервые одна («чистая») когерентная структура без примесей других структур наблюдалась нами на Байкале в спектрографе Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) в 2006 г. Результаты наших измерений на БТА также показывают существование одной «чистой» когерентной структуры, но уже с другими параметрами. Параметры когерентной структуры на БТА существенно отличаются от параметров когерентной структуры на БСВТ. Например, средняя скорость движения воздуха внутри структуры на БТА в 2012 г. достигла 1 м/с, а на БСВТ — 0,1 м/с. Обнаружена «шахматная структура» распределения средней температуры в подкупольном пространстве БТА. При открытом куполе перед главным зеркалом БТА наблюдается максимум C_n^2 .

2.2. Основные результаты измерений 2016 г.

Измерения параметров подкупольного астроклимата БТА при закрытом и открытом куполе проведены с 1.08 по 4.08.2016 г. [9]. Они были аналогичны осенним измерениям 2012 г. и осуществлялись в точках по всему объему подкупольного пространства БТА с использованием ультразвуковой метеостанции АМК-03, крепившейся на различных радиусах от центра вращения: на верхнем торце кабины наблюдателя [10] на рамке (длина рамки 1,2 м от торца кабины; высоты измерений $h = 16-31$ м; рис. 8) и на штанге телескопа ($h = 7-19$ м; рис. 6). При этом телескоп поворачивали по азимуту по четырем сторонам света и в четырех зенитных углах $z = 5, 25, 45, 70^\circ$ для каждого направления. Также для определения температуры и размеров конструкций телескопа и купола использовались лазерные термометр и дальномер. Одновременно с подкупольными измерениями состояние атмосферы вне телескопа контролировалось ультразвуковой метеосистемой «Метео-2», установленной на 20-метровой метеорологической вышке на площадке вблизи башни БТА.

Измерения показали, что средняя температура воздуха T растет от пола до верха купола на 2–3 °С (по высоте); структурная характеристика показателя преломления C_n^2 растет с высотой и к центру от $6,64 \cdot 10^{-16}$ до $1,1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$, а также в направлении на север вблизи щели купола. Скорость среднего ветра при закрытом куполе достигает 0,1 м/с. Все зарегистрированные спектры флуктуаций температуры при закрытом куполе соответствуют

когерентной турбулентности $W_T \sim f^{-8/3}$ ([2–6], рис. 4, 14).

По результатам измерений по всему подкупольному пространству БТА восстановлена экспериментальная картина движений воздушных потоков, подтверждено присутствие вихревой когерентной структуры. В целом зарегистрированные воздушные потоки образуют на измерительных высотах 7–19 м осесимметричный вихрь с вертикальной осью, вращающийся по часовой стрелке (при виде сверху) (рис. 5, 6). На этих высотах в центре подкупольного помещения воздух поднимается вверх, а ближе к стенкам купола закручивается вниз. Однако реальные движения во всем объеме подкупольного пространства высотой 31 м сложнее

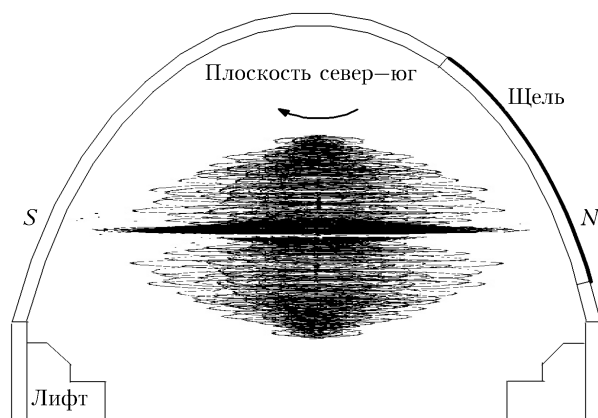


Рис. 5. Схематический вид вихревой структуры в подкупольном пространстве БТА, восстановленный из экспериментальных данных

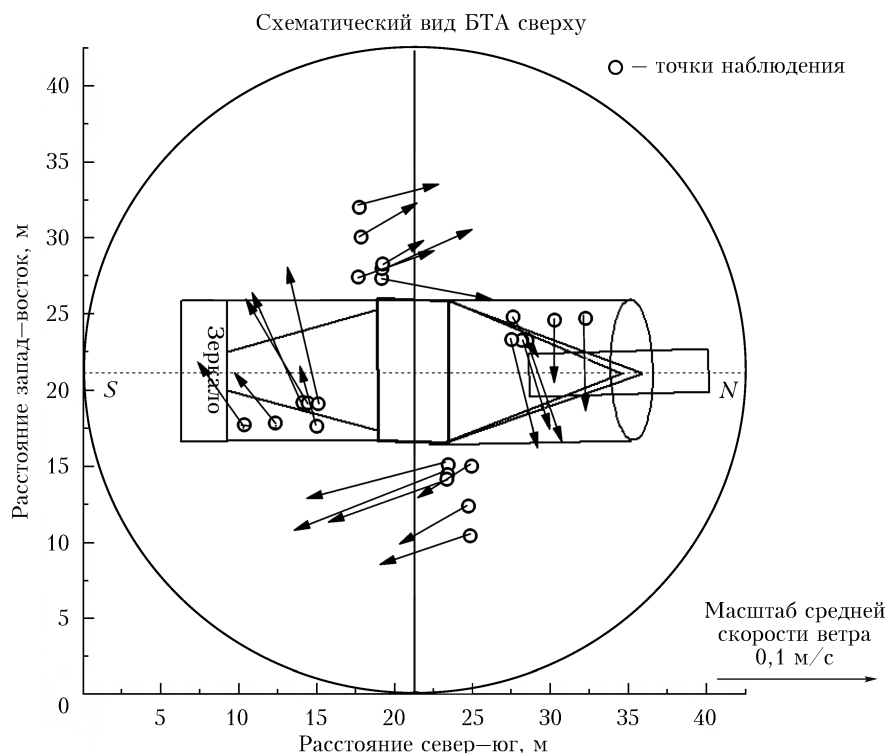


Рис. 6. Экспериментальное поле скоростей воздушных потоков в БТА на высотах 7–19 м при закрытом куполе 3.08.2016 г.

по сравнению с экспериментально зарегистрированной картиной потоков на указанных высотах (см. также результаты численного моделирования, разд. 3). Зарегистрированная летом 2016 г. картина подкупольных движений воздуха отличается от картины осени 2012 г. из-за различных метеоситуаций во время этих измерений.

При открытой щели купола измерения проведены с закрепленной на верхнем торце кабины наблюдателя метеосистемой АМК-03 в направлениях на щель и с обеих сторон от щели (на север и запад, рис. 7). На рис. 7 цифрами показана температура воздуха T в точках измерений. Если при закрытом куполе температура росла с увеличением высоты (на 2–3 °С от пола до купола), то при открытом выравнивалась по высоте ($T \approx 19$ °С). После полного открытия купола значения C_n^2 на оптической оси телескопа резко (на порядок) выросли в верхних точках измерений ($h = 28–30$ м). Скорость ветра под куполом после открытия щели также выросла, достигнув в отдельных точках 0,8 м/с. Во время переходного процесса (выравнивания внешней и подкупольной температуры воздуха) зарегистрированные спектры флуктуаций температуры при измерениях вблизи открытой щели оказались колмогоровскими. Это соответствует теоретическим представлениям о перемешивании разных когерентных структур [2, 3], которое дает колмогоровскую турбулентность. В точках ближе к центру купола и зеркалу спектры остались соответствующими когерентной турбулентности. В измерениях 2012 г., проведенных уже после завершения переходного про-

цесса выравнивания температуры, колмогоровская турбулентность зарегистрирована только в одной точке в верхней части открытой щели купола.

Определены вертикальные профили параметров астроклимата в закрытом подкупольном помещении до высоты 27 м (см. рис. 8, цифрами показана температура воздуха в точках измерений). Измерительная головка метеостанции АМК-03 была закреплена на кран-балке, способной перемещать АМК-03 по высоте в противоположной щели половине подкупольного пространства и непосредственно над зеркалом. При измерениях вертикального профиля купол был развернут в положение для регламентных (ремонтных) работ так, что щель купола находилась в направлении между севером и западом (под 45° от обоих). Телескоп имел направление на технологический балкон на куполе. Зарегистрированная температура воздуха в точках над зеркалом телескопа в среднем на 0,5 °С выше, чем над контрольной точкой на 5 м юго-восточнее. Значения структурной характеристики C_n^2 в точках измерений вблизи зеркала и над ним сравнимы по величине с максимальными значениями C_n^2 вне купола. Интенсивность турбулентности C_n^2 на высотах $h = 16–22$ м в измерениях над зеркалом (и на высотах $h = 8,5–14,5$ м юго-восточнее зеркала) в 2 раза больше ($\langle C_n^2 \rangle = 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$), чем на высотах ниже и выше. Это подтверждает наличие «шахматной структуры» распределения средней температуры и структурной характеристики C_n^2 по объему купола БТА, подобной зарегистрированной в наших измерениях в БТА в 2012 г.

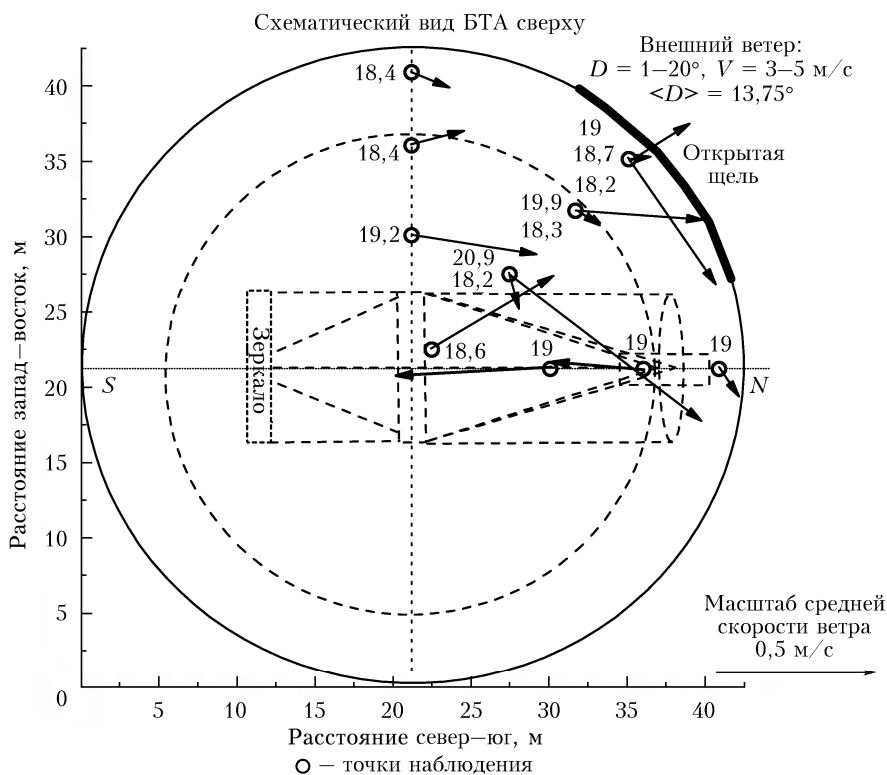


Рис. 7. Схема измерений на кабине наблюдателя при открытом куполе. Поле скоростей воздушных потоков внутри купола БТА 4.08.2016 г.

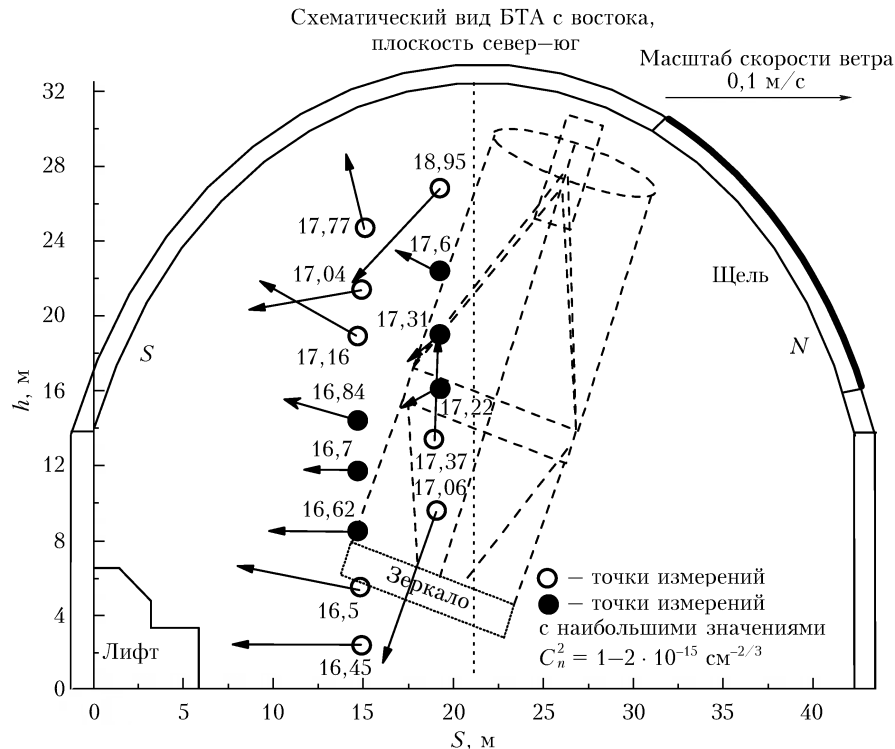


Рис. 8. Измерения на кран-балке вертикальных профилей полей температуры и скорости воздушных потоков в БТА 4.08.2016 г.

3. Численное моделирование движения воздуха под куполом БТА

Для теоретического исследования структуры турбулентных движений воздушных масс в замкнутом помещении подкупольного пространства БТА (без обмена веществом среды через границы) и анализа влияния температурного режима купола и конструкций телескопа на движение среды в дополнение к экспериментальным исследованиям проведено численное моделирование движений воздушных масс. Оно осуществлялось путем численного решения краевых задач для уравнений гидродинамики (уравнений Навье–Стокса) с граничными и начальными условиями из экспериментально измеренных данных для дневных измерений 3.08.2016 г., аналогично выполненным работам [11–14].

Масштабная программно-численная модель подкупольного пространства БТА (рис. 9) включает в себя следующие компоненты [10]: в верхней части — купол (полусфера сверху и цилиндр снизу); в средней части — многоуровневый кольцевой балкон; в нижней части — внешние контуры специализированных встроенных помещений (подготовительное, алюминирования, грузоподъемника, ЦПУ и т.д.). В центральной части модели воспроизведена конструкция самого оптического инструмента, состоящая из монтировки телескопа (платформа, стойки, лифты, балконы с кабинами) и трубы телескопа (средний, трубчатые конструкции из стрелней-штанг, верхнее кольцо, кабина наблюдателя и стакан первичного фокуса без растяжек, главное зеркало с закрытыми крышками в оправе на нижнем кольце). Указанные

компоненты модели исполнены в масштабе аналитически и реализованы программно с использованием методов конструктивной геометрии: сложные объекты образованы совокупностью простых объектов с помощью булевых операций над ними (соединение, пересечение, разность) и преобразований поворота. Программно управляемая реализация модели позволяет независимо варьировать как азимутальный угол положения монтировки телескопа в диапазоне $0-360^\circ$, так и зенитный угол наведения трубы телескопа в пределах $0-90^\circ$, что в совокупности делает возможным воспроизведение требуемого положения конструкции телескопа.

Модель подкупольного пространства БТА создана на основании данных натуральных измерений габаритов помещения подкупольного пространства, встроенных специализированных помещений, конструкций телескопа и оборудования с помощью лазерного дальномера и с использованием сборочных чертежей. Дополнительно проведены измерения температуры внутренних поверхностей купола, чистого пола, внешних поверхностей встроенных спецпомещений и конструкций самого телескопа с помощью лазерного инфракрасного термометра.

Для проведения численного моделирования структуры движений воздуха в подкупольном пространстве сформулирована следующая краевая задача. Размер модели замкнутого помещения подкупольного пространства (рис. 9): радиус внутренней полусферической части купола 21,6 м, внутренняя высота помещения от уровня «отметки чистого пола» 31 м. В нижней части подкупольного пространства встроены спецпомещения сложной геометрии.

Граничные и начальные условия Дирихле: температуры поверхностей и конструкций — использованы экспериментально измеренные значения; нулевые скорости на границах твердых тел; давление — использованы экспериментально измеренные значения. Помещение подкупольного пространства заполнено подобной воздуху средой. В помещении присутствуют конструкции телескопа с варьируемыми азимутальными и зенитными углами наведения. Для численного решения краевой задачи использовано свободное программное обеспечение в открытых исходных кодах для решения уравнений Навье—Стокса [15].

В результате решения поставленной краевой задачи получена картина движения воздушной среды в модели помещения подкупольного пространства

в параметрах векторного поля скорости и скалярных полей температуры и давления (рис. 10–13).

На рис. 10, *а* представлен общий вид вихревой структуры в модели БТА: линии тока в форме веретенообразного вихря визуализируют поле скоростей воздушных масс во всем объеме модели. Рис. 10, *б* детализирует структуру поля скоростей, указывая направления движений воздушных потоков: на выбранной высоте воздушные массы двигаются по часовой стрелке при виде сверху. Рис. 11 отображает распределение скоростей воздушных потоков в плоскости горизонтального сечения на выбранной высоте: более темные оттенки соответствуют большим значениям скорости. Можно отметить, что скорость движения близка к минимальной в центре вихревой структуры («глаз» вихря), далее она

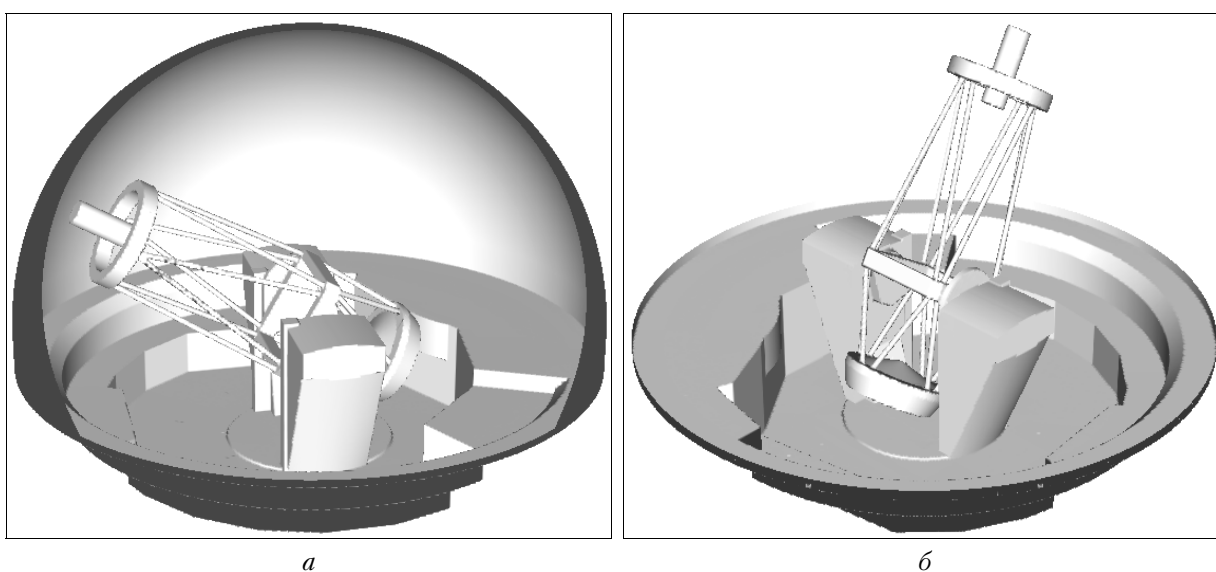


Рис. 9. Объемная масштабная модель помещения подкупольного пространства БТА, купол показан частично: *а* — азимутальный угол монтажа телескопа 270° (на запад), зенитный угол трубы телескопа 60° , вид с юга; *б* — азимутальный угол 225° (на юго-запад), зенитный угол 30° , вид с северо-запада

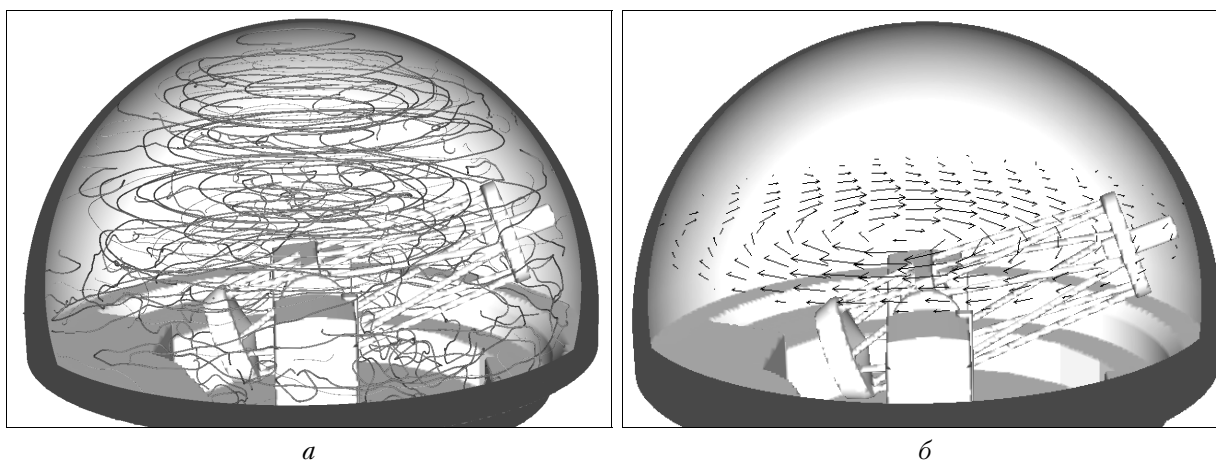


Рис. 10. Вихревая структура под куполом БТА. Момент времени моделирования 01:56:13. Азимутальный угол монтажа 270° , зенитный угол трубы телескопа 70° . Ближняя часть купола не показана, вид с севера: *а* — линии тока; *б* — горизонтальное сечение поля скоростей воздушных потоков на высоте 17 м

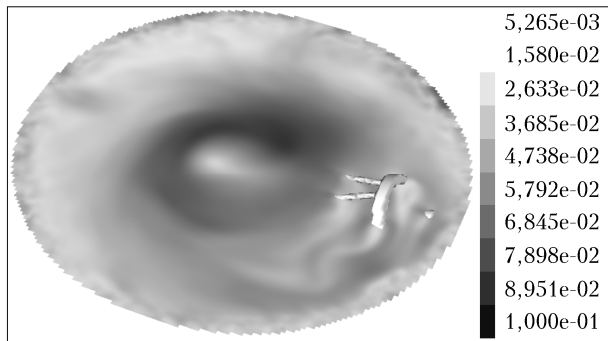


Рис. 11. Горизонтальное сечение поля скоростей воздушных потоков, м/с. Момент времени моделирования 01:48:53. Сечение на высоте 17 м. Зенитный угол трубы телескопа 70°. Показаны фрагменты верхнего кольца, штанг и кабины наблюдателя, вид с северо-запада

достаточно быстро нарастает до максимальных значений («стена» вихря) и постепенно спадает к периферии области.

Рис. 12 и 13 иллюстрируют структуру поля завихренности воздушных потоков в подкупольном пространстве БТА. Под завихренностью течения жидкости в данной ее точке понимается [16] вектор $rot\mathbf{U}$, где $\mathbf{U} = (U_x, U_y, U_z)$ – вектор скорости течения жидкости; тогда вертикальная компонента завихренности – скаляр $(rot\mathbf{U})_y = \partial U_x / \partial z - \partial U_z / \partial x$ (здесь ось OY направлена вертикально вверх). Горизонтальное сечение поля вертикальной компоненты завихренности на рис. 12 дает возможность оценить влияние различных конструктивных элементов на движение воздушных масс, а также направления вращений в горизонтальной плоскости несущего вихря и локальных возмущений на выбранной высоте. Изоскалярная поверхность модуля завихренности воздушных потоков на рис. 13 позволяет увидеть вихревой след от элементов конструкций телескопа в объеме и динамике.

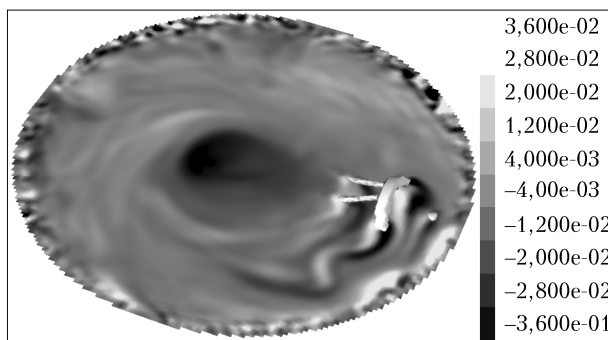


Рис. 12. Горизонтальное сечение поля вертикальной компоненты завихренности воздушной среды $(rot\mathbf{U})_y$, c^{-1} . Описание см. на рис. 11

На рис. 12 и 13 можно наблюдать вихревой след от элементов конструкций трубы телескопа. Как видно из обоих рисунков, усиление завихренности наблюдается между верхними штангами, а также в области верхнего кольца, стакана первичного фокуса и кабины наблюдателя. Более темные оттенки

на рис. 12 соответствуют отрицательным значениям и вращению по часовой стрелке при виде сверху; светлые оттенки – положительным значениям и вращению против часовой стрелки. На рис. 12 можно отметить «дорожку Кармана», как вихревой след от верхнего кольца трубы телескопа в набегающем воздушном потоке: поочередно отрывающиеся вихри противоположных направлений вращения формируют по обе стороны за конструкцией кольца две цепочки, увлекаемые доминирующим несущим вихрем.

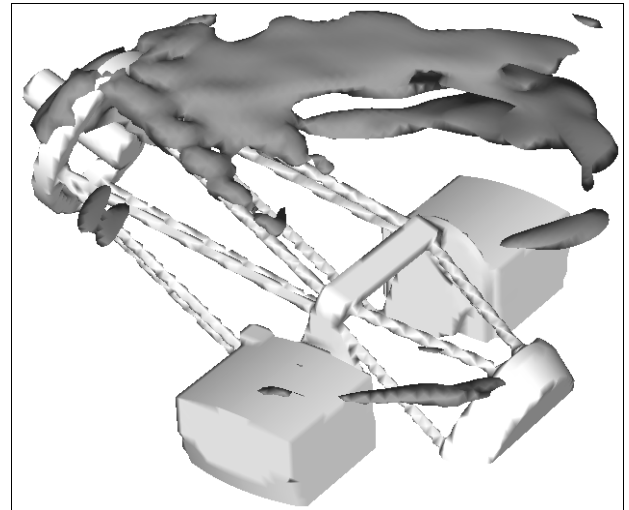


Рис. 13. Изоскалярная поверхность модуля завихренности $|rot\mathbf{U}|$ воздушной среды в области верхнего кольца и верхних штанг. Момент времени моделирования 01:08:20. Зенитный угол трубы телескопа 70°, конструкции телескопа снизу не показаны, вид с юго-востока сверху

Из рис. 10–13 видно, что под куполом БТА формируется веретенообразная вихревая структура с вертикальной осью вращения. При меньших зенитных углах, на которых обычно проводится наблюдение, влияние вихревого следа конструкций телескопа распространится в том числе и на оптическую трассу.

Сравнение данных рис. 5, 6 и 10, 11 позволяет сделать вывод, что картина движения воздушной среды, полученная в результате численного моделирования (см. рис. 10, 11), практически совпадает с экспериментально зарегистрированной нами приближенной картиной осредненных движений воздуха в подкупольном пространстве БТА (см. рис. 5, 6).

Результаты численного моделирования подтверждают зафиксированное в эксперименте возникновение под куполом БТА вихревой структуры с вертикальной осью вращения [9, 11]. Причинами ее появления являются температурные градиенты поверхностей купола, встроенных спецпомещений и конструкций телескопа, которые обусловлены неравномерностью их нагрева. Веретенообразная форма и положение оси вращения вихревой структуры совместно определены геометрией помещения подкупольного пространства, задающей границы для движения воздушных масс, и расположением участков нагрева на границах объема.

На рис. 14 представлены нормированные временные частотные спектры флуктуаций температуры $G(E) = fW_T(f)/\sigma_T^2$, где f – частота; $W_T(f)$ – временной частотный спектр флуктуаций температуры T ; σ_T^2 – дисперсия флуктуаций температуры; $E = f/f_0$ – нормированная частота, f_0 – характеристическая частота, соответствующая главному энергонесущему вихрю. Экспериментальный спектр соответствует кривой 1, а спектр численного моделирования – кривой 2. Результаты моделирования спектра флуктуаций удовлетворительно согласуются с экспериментом. В соответствующем эксперименту спектре наблюдается протяженный инерционный интервал с $5/3$ -степенной зависимостью, что соответствует $8/3$ -зависимости обычного ненормированного спектра W_T . Подобная зависимость характеризует когерентную турбулентность. В теоретическом спектре начальный участок инерционного интервала также описывается аналогичной зависимостью. Дальнейший более быстрый спад теоретического спектра обусловлен размером численной расчетной сетки (фактической фильтрацией сверхвысокочастотных компонент).

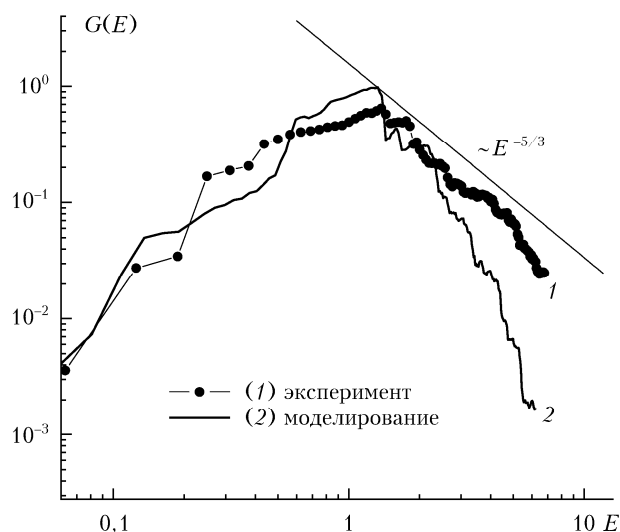


Рис. 14. Временной частотный спектр флуктуаций температуры W_T в подкупольном пространстве БТА в моделировании

Результаты проведенного нами ранее численно-го моделирования с использованием данных измерений 2012 г. показали [11], что в замкнутом воздушном объеме БТА наблюдаются два крупных вихря с вертикальными осями вращения (когерентные структуры, топологические солитоны), когерентный распад которых порождает когерентную турбулентность. Итоговая картина подкупольных движений воздуха лета 2016 г. отличается от картины осени 2012 г. из-за различных метеоситуаций, сопутствовавших экспериментам. В то же время в развитии картин движения 2012 и 2016 г. можно отметить некоторые общие черты, а именно появление в определенный момент времени двух вихрей с вер-

тикальными осями противоположных направлений вращения. При этом осенняя метеоситуация 2012 г. стабилизировала картину в виде двух вихревых структур, в то время как летняя метеоситуация 2016 г. привела к дальнейшему развитию картины, где одна вихревая структура, являясь доминирующей модой, поглощает энергию второй, приводя в дальнейшем к ее вырождению.

Процесс поглощения второй вихревой структуры с противоположным доминирующей моде направлением вращения можно заметить, наблюдая за эволюцией вихревых структур под куполом БТА путем численного моделирования с данными измерений 2016 г. На рис. 15 изображено горизонтальное сечение поля вертикальной компоненты завихренности в момент времени моделирования, предшествующий моменту картины движения на рис. 12.

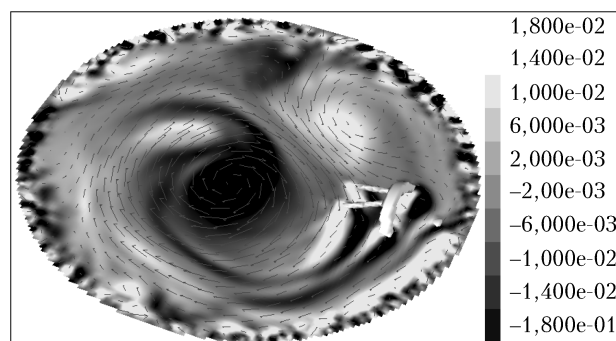


Рис. 15. То же, что и на рис. 12, $(rot U)_y$, c^{-1} . Момент времени моделирования 01:23:20. Стрелки – горизонтальное сечение поля скоростей. Масштаб цветовой шкалы изменен для усиления контрастности

Как видно из рис. 15, под куполом еще присутствуют оба конкурирующих вихря с вертикальными осями противоположных направлений вращения: ближе к центру рисунка наблюдается доминирующий вихрь с вращением по часовой стрелке при виде сверху, в то время как вихрь с обратным направлением вращения, теряя энергию, вытесняется на периферию. На рис. 12 второй вихрь уже отсутствует.

Таким образом, результаты решения краевой задачи с граничными условиями из экспериментально измеренных данных подтверждают существование в воздухе под куполом БТА когерентной структуры и согласуются с результатами экспериментов 2016 г.

Заключение

В ходе исследований 2012 и 2016 г. получены следующие результаты:

1. Общий уровень зарегистрированной интенсивности турбулентности в ночное наблюдательное время на площадке БТА в среднем низок (пониженные значения C_n^2), что обеспечивает хорошее качество астрономических изображений в наблюдениях на БТА.

2. Установлено присутствие над территорией САО РАН когерентной турбулентности, в которой улучшается качество изображений телескопов.

3. Выяснено, как влияют тип подстилающей поверхности и направления скорости ветра на режим возникновения когерентной турбулентности в районе БТА. Причины ее появления — неравномерность нагрева поверхности и ущелья, имеющие протяженность поперек Кавказского хребта и создающие «русло» для воздушных масс.

4. Исследовано распределение скоростей движений воздуха в объеме подкупольного пространства БТА и восстановлена экспериментальная картина воздушных подкупольных потоков. Выявлено присутствие вихревой когерентной структуры, возникающей вследствие градиента температуры в 2–3 °С по высоте.

5. При закрытом куполе зарегистрирована интенсивность турбулентности, сравнимая с наружной. Установлено наличие «шахматной структуры» распределения параметров турбулентности под куполом.

6. Результаты численного моделирования структуры турбулентных движений воздушных масс под куполом БТА с использованием экспериментальных данных подтверждают зарегистрированную в эксперименте картину движений воздуха в подкупольном пространстве — возникновение вихревой структуры с вертикальной осью вращения. Причинами ее появления являются температурные градиенты подкупольных поверхностей, обусловленные неравномерностью их нагрева, в то время как ее форма и положение оси вращения совместно определяются геометрией подкупольного пространства и местоположением нагрева поверхностей.

7. Численное решение краевых задач с граничными и начальными условиями из экспериментальных данных позволяет восстановить распределение параметров турбулентности на рабочих участках подкупольного помещения, а также проанализировать влияния форм купольных конструкций, заполнения подкупольного пространства сложной геометрии, конструктивных особенностей самих астрономических телескопов, температурных режимов оптических элементов телескопа и подкупольного пространства (в том числе учесть суточный и сезонный ход температур) на качество формируемых телескопом изображений. В совокупности это позволяет тестировать в стационарных условиях оптические характеристики как уже действующих, так и проектируемых телескопов, включая минимизацию влияния внешней и подкупольной турбулентности.

Авторы считают своей приятной обязанностью выразить искреннюю признательность Stéphane Porinet за его значительный бескорыстный вклад в развитие науки в виде разработанного им свободного программного обеспечения [15], что позволило

авторам сосредоточить свои усилия на исследовании законов гидродинамики.

Выражаем благодарность сотрудникам БТА САО РАН Д.С. Миленко, Н.Н. Шинкаренко, В.М. Кравченко за помощь в проведении экспериментальных научных исследований на БТА.

1. Панчук В.Е., Афанасьев В.Л. Астроклимат Северного Кавказа — мифы и реальность // Астрофиз. бюл. 2011. Т. 66, № 2. С. 253–274.
2. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Оптические свойства турбулентности в горном пограничном слое атмосферы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 153 с.
3. 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.
4. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Структура турбулентности на специализированных оптических трассах в астрономических телескопах // Изв. вуз. Физика. 2016. Т. 59, № 12/2. С. 134–137.
5. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Дрожание астрономических изображений в когерентной турбулентности // Тр. XXV Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Распространение радиоволн», посвященной 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 2016. Т. 2. С. 35–38.
6. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Структура турбулентности в обсерваториях юга Сибири // Материалы IV Всерос. науч. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» / под ред. Пенькова. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. С. 272–275.
7. Stull R.B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 1988. 670 p.
8. Google Earth V.7.1.8.3036 (17.01.2017). Нижний Архыз. Кавказ. 43°39'54,33" с.ш., 41°15'20,85" в.д., обзор с высоты 13,75 км. DigitalGlobe 2016.
9. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Экспериментальные исследования астроклимата в Специальной астрофизической обсерватории РАН // Актуальные проблемы радиофизики 2017: сб. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф. Томск: STT, 2017. С. 151–155.
10. Большой Азимутальный телескоп (БТА). Техническое описание. ЛОМО «Телескоп, труба телескопа». 77 с. URL: http://w0.sao.ru/hq/sekhta/Tex_doc/Book1_view.pdf (дата обращения: 15.07.2016).
11. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентные структуры в подкупольном пространстве Большого телескопа азимутального. Численные решения // Актуальные проблемы радиофизики 2017: сб. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф. Томск: STT, 2017. С. 147–150.
12. 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.

13. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Структура турбулентных движений воздуха в шахте главного зеркала Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН. Эксперимент и численное моделирование // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 905–910.
14. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Turbulence and heat exchange inside the dome room of lidar station. Experiment and simulation // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 754, N 2. P. 134–137.
15. *Popinet S.* The Gerris Flow Solver. A free, open source, general-purpose fluid mechanics code. 2001–2015. URL: <http://gfs.sf.net> (last access: 25.02.2018).
16. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

V.V. Nosov, V.P. Lukin, E.V. Nosov, A.V. Torgaev, V.L. Afanas'ev, Yu.U. Balega, V.V. Vlasyuk, V.E. Panchuk, G.V. Yakorov. **Researches of the astroclimate in the Special Astrophysical Observatory of RAS.**

The results of the astroclimate characteristics measurements in the Special Astrophysical Observatory of RAS (SAO, North Caucasus) in 2012 and 2016 are presented. The experimental results are obtained from long-term observation series of the day and night astroclimate in SAO. The presence of non-Kolmogorov coherent turbulence was detected over SAO territory, in which the quality of telescope images improves. The influence of an underlying surface type and a wind speed direction on the formation mode of coherent turbulence is explained. It was found that the causes for coherent turbulence formation are the mountainous terrain and the uneven heating of underlying surface. The airflow velocity distribution inside the dome room of the Big Telescope Alt-azimuth (BTA) had been experimentally researched. Numerical simulation of the air mass motions inside the BTA dome room had been performed to analyze the influence of a temperature regime and a form of constructions. The solutions of the boundary value problem confirm the existence of the experimentally registered vortex structure with a vertical rotation axis. The causes for its formation are the temperature gradients of the dome surfaces.