

Исследование атмосферной оптической турбулентности с целью разработки и использования методов высокого углового разрешения

Руководитель НИР: Сафонов Б.С.

Участники НИР: Будникова П.А., Горбунов И.А., Корнилов В.Г., Корнилов М.В., Купряков Ю.А., Семенихин Т.А., Страхов И.А., Сулбаев А.А., Черясов Д.В.

Автореферат

Эффективность наземных телескопов, особенно при реализации методов достижения дифракционного разрешения, критически зависит от атмосферных условий. Комплексные астроклиматические исследования, включающие мониторинг оптической турбулентности и развитие методов коррекции ее влияния, являются необходимым условием для раскрытия полного потенциала крупных инструментов, таких как 2.5-м телескоп Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ. Эти работы будут сохранять актуальность в контексте создания и эксплуатации других, более крупных наземных телескопов на протяжении еще длительного времени, поскольку создание больших апертур, а именно диаметр апертуры определяет дифракционное разрешение, на поверхности Земли более экономически оправдано чем в космосе.

За отчетный период (2021-2025 гг.) по теме получены следующие ключевые результаты. Астроклиматический монитор КГО продолжил непрерывные автоматические измерения, полный объем составил 5750 часов. Медианное качество изображения за период составило 1.18". Обеспечивалась оперативная осведомленность наблюдателей на 2.5-м телескопе о текущих астроклиматических условиях, что позволяло эффективно использовать время телескопа посредством динамического планирования.

Введён в эксплуатацию прибор *domesat* для изучения подкупольной турбулентности в башне 2.5-м телескопа. Установлено что основным фактором вызывающим подкупольную турбулентность является конвекция над главным зеркалом телескопа. Количественно оценен вклад подкупольной турбулентности в ухудшение качества изображения (медиана ухудшается с 0.90" до 1.12"). Установлено, что в рамках модели фон Кармана, подкупольной турбулентности соответствует внешний масштаб ~0.6 м. Обнаружена декорреляции подкупольной турбулентности на временах 30-70 мс.

Спектр-поляриметр. Проведена глубокая модернизация прибора (2022 г.), установлена низкошумящая CMOS-матрица Hamamatsu ORCA-Quest, существенно улучшена оптико-механическая стабильность и надежность работы моторизации. Развитие методики, включая применение опорных звёзд, коррекцию систематических эффектов (нелинейность детектора, дисторсия, ошибки коллимации) позволило существенно повысить точность измерений видности, и в свою очередь оценок разделения, позиционного угла и контраста двойных звезд. Стали возможны уверенные измерения для пар с субдифракционным разделением. В рамках международной программы поддержки миссии TESS выполнено более 3400 наблюдений, приведших к обнаружению сотен новых двойных систем и внесших вклад в десятки научных

публикаций, включая статистическую валидацию экзопланет и изучение планет в двойных и кратных звездных системах.

Создан и апробирован действующий макет датчика волнового фронта Шака-Гартмана с частотой работы до 800 Гц, заложивший основу для будущих исследований в области адаптивной оптики и гибридных методов коррекции изображения.

Введение

Угловое разрешение - это важнейшая характеристика телескопов, определяющая возможность различать детали объектов, влияющая на проникающую способность, спектральное разрешение спектрографов, возможность характеризовать слабые объекты вблизи ярких. На протяжении истории, начиная с изобретения телескопа, прогресс в технологии обеспечивал рост углового разрешения и связанные с этим открытия. По мере устранения таких препятствий, как аберрации оптических систем, неточности ведения монтировки, в качестве фактора, ограничивающего угловое разрешение, на первый план вышла атмосферная оптическая турбулентность.

С началом космической эры бескомпромиссным подходом к решению проблемы атмосферной оптической турбулентности стало выведение телескопов на орбиту. Однако параллельно развивались и другие подходы: тщательный выбор места установки телескопа, использование активных и пассивных методов коррекции атмосферных искажений. В то время как космические телескопы неоспоримо превосходят наземные в задачах где требуется регистрация и анализ излучения вне окон прозрачности атмосферы, стабильность, временное покрытие, именно при решении задач, требующих предельного углового разрешения, наземные телескопы остаются вне конкуренции. Это связано с тем что при равной стоимости наземный телескоп будет иметь намного большую (примерно в 10 раз) апертуру чем космический, а именно диаметр апертуры в конечном счете определяет предельное - дифракционное разрешение, возможность и методы достижения которого при наблюдении через турбулентную атмосферу становятся критически важны.

В этой связи специальные астроклиматические исследования, проводящиеся с первой половины двадцатого века, в последние 30-40 лет интенсифицировались. Были предложены и реализованы новые методы измерения профиля атмосферной оптической турбулентности: SCIDAR, DIMM, MASS, SHIMM, LuSci и т.д. В ГАИШ астроклиматические исследования проводятся уже более 50 лет. При участии сотрудников ГАИШ был обнаружен и изучен высокий астроклиматический потенциал средней азии, а именно предгорий Памира. Широко используемый в настоящее время прибор MASS, основанный на измерении амплитуды мерцаний в нескольких концентрических апертурах, в значительной степени спроектирован и создан в ГАИШ. В контексте эффективной эксплуатации существующих крупных и строящихся новых сверхбольших телескопов (E-ELT, TMT, GMT), астроклиматические исследования остаются весьма актуальными. Признана актуальность измерений оптической турбулентности в непосредственной близости от телескопа - под его куполом, где решающую роль начинают влиять неравномерный прогрев конструкции телескопа, его обтекание ветром.

Проектирование и использование адаптивной оптики - метода измерения и исправления атмосферных искажений в реальном времени - базируется на физической модели распространения излучения через турбулентную атмосферу и астроклиматических измерениях. Важнейшая роль адаптивной оптики в раскрытии потенциала крупных наземных оптических телескопов неоспорима. Однако с развитием технологий детекторов - EMCCD и CMOS - в последние 25 лет переживают ренессанс пассивные методы достижения дифракционного разрешения, работающие с сериями короткоэкспозиционных изображений объекта, искаженных атмосферой. Примером такого метода служит спектр-интерферометрия, активнейшим образом применяемая для исследования двойственности звезд, фотометрии в плотном поле. Преимущество спектр-интерферометрии заключается в более высоком темпе наблюдений, возможности использования коротковолновых полос, где работа адаптивной оптики невозможна.

В данную тему входит ряд проектов, выполняемых нами на базе Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ и объединенных общей идеей развития методов измерения и исправления негативных эффектов атмосферной оптической турбулентности на изображения, регистрируемые на крупном наземном телескопе: 1. Астроклиматический монитор - комплекс измерительной аппаратуры для сбора статистики и обеспечения текущей осведомленности об атмосферной турбулентности, экстинкции, фоне неба, метеопараметрах. 2. Domescam - прибор для измерения интенсивности оптической турбулентности на луче зрения 2.5-м телескопа внутри купола телескопа. 3. Спектр-поляриметр - штатный прибор 2.5-м телескопа для достижения дифракционного разрешения. 4. Исследование перспективных методов измерения и коррекции эффектов атмосферной турбулентности, основанных на датчиках волнового фронта. Основная часть и заключение, следующие ниже, представляют описание работ и полученных результатов по этим пунктам.

Основная часть

1. ASM

Продолжил свою работу астроклиматический монитор (АСМ) КГО ГАИШ МГУ. Измерения выполнялись в полностью автоматическом режиме. Основным инструментом АСМ является MASS-DIMM (Многоапertureный датчик мерцаний и монитор дифференциальных дрожаний - Multiaperture Scintillation Sensor Differential Image Motion Monitor) [Kornilov2007]. В качестве питающей оптики используется глубоко переработанный нами 35-см любительский телескоп Meade RCX400. В состав комплекса также входит автоматическое укрытие и метеостанция. АСМ выполняет измерения профиля интенсивности турбулентности, профиля скорости ветра, экстинкции, фона неба, т.е. основных параметров астроклиматата, актуальных для наблюдений в оптическом диапазоне.

В 2021-2025 гг проводились текущие работы по поддержанию комплекса АСМ в работоспособном состоянии:

1. Чистка оптики телескопа - коррекционной пластины и главного зеркала.
2. Юстировка прибора относительно телескопа.
3. Юстировка центровочной камеры относительно телескопа.

4. Измерение параметров ФЭУ канала MASS, необходимых для корректной обработки измерений оптической атмосферной турбулентности.
5. В управляющем программном обеспечении был исправлен ряд ошибок, что уменьшило время простоя.
6. Обновлялась информационная инфраструктура комплекса.

Объем полученных данных и медианное качество изображения по годам: 2021 год - 1195 часов, 1.14"; 2022 год - 1163 часов, 1.30"; 2023 год - 1214 часов, 1.18"; 2024 год - 1072 часов, 1.07"; 2025 год - 1106 часов, 1.25". Полный объем полученных данных в 2021-2025 гг составил 5750 часов, по 1150 часов в среднем в год, что соответствует многолетнему среднему количеству ясного ночного времени. Медианное качество изображения оказалось 1.18 угловой секунды - это значительно хуже чем в предыдущие годы (2007-2021). Данные АСМ, такие как качество изображения, прозрачность, фон неба были доступны наблюдателям на 2.5-м и 60-см телескопах КГО практически в реальном времени (с задержкой 1 минута).

2. Domecam

Подкупольная ОТ часто вносит существенный вклад в ухудшение качества изображения, получаемого на крупном телескопе. Она может возникать в силу ряда факторов: при значительной разнице температур между наружным воздухом и элементами конструкции телескопа, при обтекании ветром купола и телескопа. Эти факторы поддаются контролю. Для 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ минимизация подкупольной ОТ особенно актуальна, т.к. собственное качество оптики телескопа, точность слежения приводов и условия во внешней атмосфере позволяют достигать качества изображения порядка 0.5 секунды дуги.

Для измерения подкупольной ОТ предлагается ряд методов, как оптических, так и ультразвуковых. Наиболее точные данные предоставляют оптические методы, использующие пучок от телескопа. Их недостатком является необходимость использования наблюдательного времени телескопа. В рамках данной темы мы создали прибор, реализующий метод оценки подкупольной ОТ из анализа мерцаний, регистрируемых от апертуры телескопа: domecam (DC). В методе DC анализ пространственно-временной корреляции мерцаний позволяет выделить медленную компоненту турбулентности, которая приписывается подкупольному пространству.

Прибор domecam представляет собой быструю ПЗС-матрицу, установленную в выходной зрачок, сопряженный с виртуальным входным зрачком располагающимся на высоте -2 км. Используемые экспозиции 2-4 мс, скорость получения кадров 100 кадров в секунду. Длительность накопления 60 сек. domecam располагается в фокусе Нэсмит-2 в промежутке между спекл-поляриметром и фланцем телескопа. Свет в прибор отводится дихроичным зеркалом, отражающим излучение с длиной волны больше 600 нм. Более коротковолновое излучение проходит в спекл-поляриметр. Возможность одновременных измерений с domecam и СПП позволяет выполнять центровку и удержание звезды в диафрагме DC с помощью камеры подсмотра СПП, что значительно повышает удобство измерений, поскольку DC не имеет собственного канала изображения. Регистрация изображения на СПП во время измерений с DC позволяет получать независимую оценку полного атмосферного качества изображения.

В статье [Kornilov2021] мы показали что данные измерений потока, регистрируемые панорамным детектором, удобно обрабатывать используя преобразование Фурье. В 2024 году был разработан метод, который позволяет по данным domecam вычислять индекс мерцаний для произвольного апертурного фильтра, т.е. для апертуры произвольной формы, имеющей размер больше величины шага сетки и меньшей чем полный диаметр питающей апертуры. Используя этот метод для измерений выполненных с domecam мы выполнили оценки ожидаемых индексов мерцаний при регистрации с прибором MASS (Multi-Aperture Scintillation Sensor). Индексы мерцаний MASS, рассчитанные по измерениям domecam, были сопоставлены с реальными индексами мерцаний MASS. Для этого сравнения мы использовали 23 измерения в которых 2.5-м телескоп и телескоп ACM отслеживали одну звезду. Как для обычных индексов мерцаний, так и для дифференциальных индексов мерцаний было получено весьма точное совпадение. Коэффициент корреляции Пирсона составил 0.95-0.99. Учитывая то что методика MASS была многократно верифицирована относительно других методов измерения профиля турбулентности, этот результат свидетельствует о корректности методологии измерений флюктуаций потока, выполняемых с domecam.

Всего в период с 2022 по 2025 с domecam было получено 88 измерений в различных условиях, распределенных по временам года. Были исследованы корреляции интенсивности подкупольной турбулентности с различными параметрами: температурами воздуха снаружи и внутри купола, температурой зеркала, скоростью и направлением ветра, высотой точки на которую направлен телескоп. Наиболее надежная корреляция была зафиксирована между интенсивностью подкупольной турбулентности и разностью температур воздуха внутри башни и температурой главного зеркала. Эта зависимость вполне ожидаема, поскольку при значительном отклонении температуры зеркала от температуры окружающего воздуха в последнем развивается конвекция, генерирующая оптическую турбулентность.

Проведен сравнительный анализ одновременных измерений качества изображения, измеряемого спекл-поляриметром и предсказываемого domecam. Хорошее согласие достигается в предположении что внешний масштаб подкупольной турбулентности составляет 0.6 м, что гораздо меньше чем типичный внешний масштаб турбулентности в свободной атмосфере. Это обстоятельство также говорит в пользу того что подкупольная турбулентность локализована вблизи главного зеркала и возникает за счет конвекции. Гипотеза генерации подкупольной турбулентности за счет обтекания башни потоком ветра не подтвердилась, т.к. не было зафиксировано корреляции между интенсивностью первой и скоростью/направлением второго.

Используя зависимость интенсивности подкупольной турбулентности от разности температур главного зеркала и воздуха, распределение этой разности, а также оценку внешнего масштаба турбулентности, мы оцениваем что медианное качество изображения в 2.5-м телескопе ухудшается с 0.9" до 1.12" за счет влияния подкупольной турбулентности.

Было обнаружено явление нарушения гипотезы замороженности Тэйлора для подкупольной турбулентности, проявляющееся как декорреляция картины мерцаний от слоя, соответствующего подкупольной турбулентности. Характерное время декорреляции

составило 30-70 мс, это время меньше когда скорость ветра больше и при большой разности температур главного зеркала и подкупольного воздуха.

Оценки внешнего масштаба и времен декорреляции могут быть использованы для более точного моделирования влияния эффектов оптической турбулентности на изображения в телескопе. Итоги измерений с domecam опубликованы в статье [Kornilov2025].

3. Спекл-поляриметр.

Спекл-поляриметр - это штатный прибор 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ для достижения дифракционного разрешения в видимом диапазоне, созданный нами в 2015 г. Прибор реализует методы, базирующиеся на обработке большого количества короткоэкспозиционных изображений объекта с целью подавления влияния атмосферной оптической турбулентности, размывающего изображение: спекл-интерферометрия, дифференциальная спекл-поляриметрия.

В 2021-2025 гг продолжалось развитие методики спекл-интерферометрии, в 2022 году была проведена глубокая модернизация прибора, выполнялась поддержка текущих наблюдений.

В ходе модернизации 2022 года основной детектор был заменен на CMOS Hamamatsu ORCA-quest C15550-20UP. Мы выполнили подробное исследование основных характеристик детектора. Было показано что детектор соответствует спецификациям, шум считывания оказался равен 0.48 и 0.27 е при скорости считывания 120 и 5 кадров в секунду, соответственно. Также была исследована нелинейность отклика, которая оказалась весьма значительной. Без коррекции в области низких потоков нелинейность достигает 20%. Был найден закон, позволяющий корректировать нелинейность с точностью 2%.

Нами было выполнено сравнение эффективности применения CMOS и EMCCD в качестве детектора для спекл-интерферометрии с помощью численного моделирования. Показано что эти детекторы практически эквивалентны. Шум считывания Hamamatsu ORCA-quest достаточно мал чтобы им пренебречь для задач спекл-интерферометрии. Применение скользящего затвора может препятствовать надежному определению контраста в спекл-интерферометрии, однако мы показали что в нашем случае этим эффектом можно пренебречь.

Также в рамках работ по модернизации прибора был перепроектирован предфокальный узел. Значительно улучшена стабильность и простота юстировки последнего. Заменена вспомогательная камера, используемая для точного наведения прибора в тех случаях когда ошибка наведения превышает 15 угловых секунд. Новая вспомогательная камера позволяет центрировать телескоп для объектов на 3 величины более слабых чем предыдущая вспомогательная камера. В блоке камеры мы используем в качестве лучерасщепляющего элемента поляризационный светоделительный кубик вместо призмы Волластона. Также реализован режим работы без лучерасщепления и с дифференциальной дефокусировкой. Последний используется для точной и быстрой автоматической фокусировки прибора.

Был изучен и учтен ряд тонких эффектов, что позволило улучшить точность спекл-интерферометрических оценок параметров двойных звезд: разделения, позиционного угла и контраста. В частности:

1. Межпиксельные вариации нелинейности CMOS. Эффект, приводящий к ослаблению контраста полос, и завышению разности блеска компонент двойной.
2. Дисторсия, вносимая призмами компенсатора атмосферной дисперсии - искажает астрометрические параметры двойной звезды.
3. Ошибка коллимации телескопа - неперпендикулярность оптической оси телескопа и оси высоты монтировки - искажает позиционный угол двойной звезды.

Для улучшения точности оценки спектра мощности научной звезды мы применяем измерения опорных звезд, выполняемых незадолго до и вскоре после наблюдения научной звезды. Использование опорных звезд в случае 2.5-м телескопа оказывается весьма эффективно благодаря высокой скорости и точности наведения. Так, переход между опорной и научной звездами находящимися на расстоянии 1 градус занимает примерно 4 секунды. Этот метод позволяет ослабить влияние дрожаний монтировки, остаточной дисперсии и аберраций телескопа на спектр мощности. Применение опорных звезд позволило улучшить точность определения контраста двойных звезд.

В 2025 году нами был внедрен и протестирован режим, в котором детектор непрерывно получает серию кадров, в то время как телескоп поочередно наводится на научный и опорный объекты с периодом 15 секунд. Такой подход позволяет еще лучше устранять вклад медленно меняющихся систематических искажений - аберраций, дрожаний и остаточной дисперсии. Прецизионные измерения видности открыли путь к астрометрическим измерениям двойных с разделением меньшим чем критерий Релея разрешения телескопа 1.22 λ/D .

Для снятия неопределенности в 180 градусов при определении позиционного угла, присущей классической спекл-интерферометрии, а также для восстановления изображений, необходимо иметь возможность оценивать не только амплитуду, но и фазу видности. В 2021-2025 гг нами были реализовано два алгоритма оценки фазы - биспектральное восстановление и многокадровая слепая деконволюция.

Важным фактором конкурентоспособности спекл-поляриметра является активное использование оптимальных условий - периодов хорошего качества изображения. Это становится возможным благодаря некоторым обстоятельствам.

1. Спекл-поляриметр находится в постоянной готовности к работе когда он установлен на телескопе, т.е. примерно 85% времени (в остальные 15% времени фокус Нэсмит-2 занят другим прибором).
2. Наблюдения на спекл-поляриметре высоко автоматизированы. С 2015 года, в том числе и в период с 2021 по 2025 год, мы постоянно улучшаем и отлаживаем методику наблюдений, следя принципам повышения эффективности использования времени телескопа и исключения человеческого фактора. Последнее позволяет дежурному наблюдателю (всего дежурных наблюдателей около 20 человек) за минимальное время освоить управление прибором, а также снижает когнитивную нагрузку (что важно для эффективных и безопасных длительных наблюдений).

3. Астроклиматический монитор обеспечивает осведомленность наблюдателя о астроклиматических параметрах, в том числе динамике их изменения.
4. Механизированное третичное зеркало 2.5-м телескопа обеспечивает переключение между приборами в течение 2 минут.

Суммарное время накопления по годам: 2021 год - 116 часов, 2022 год - 78 часов, 2023 год - 112 часов, 2024 год - 105 часов, 2025 год - 97 часов. Всего 509 часов.

В 2021-2025 годах выполнялись спектр-интерферометрические наблюдения звезд с экзопланетами в рамках международной программы наземной поддержки космического аппарата (КА) TESS. Спектр-интерферометрия позволяет обнаруживать звездные компоненты в диапазоне разделений 0.08-0.5", недоступном КА Gaia. Наличие компонента у звезды необходимо учитывать при определении параметров экзопланеты по глубине транзита. Также исследование корреляции двойственности и наличия планетной системы позволяет наложить ограничения на параметры процесса планетообразования. Всего по этой программе было выполнено 3464 (422) наблюдения 2024 (177) объектов. Из них 361 (19) объект оказался двойным/кратным. Эти измерения были использованы в 52 (15) статьях. В скобках приведены числа для 2025 года.

Приведем некоторые примеры опубликованных результатов. В работе [GomezBarrientos2025] наблюдения 10 звезд, выполненные на спектр-поляриметре, были использованы в модели статистической валидации экзопланет TRICERATOPS+. Последняя позволяет исключать случаи когда сигнал транзита генерируется фоновым источником, например, затменной переменной звездой. Подтвержден горячий юпитер TOI-3523Ab с периодом 2.3 дня в тройной системе, где мы со спектр-поляриметром разрешили внутреннюю пару с угловым разделением 0.67" [Yee2025].

Найдена двойственность у сравнительно близкой ($d = 22$ пк) звезды G 222-3 с расстоянием между компонентами 8 а.е. [ZunigaFernandez2025]. По нашим данным угловое разделение уменьшилось с 0.408" до 0.324" за 3.8 года. При этом позиционный угол практически не изменился, что говорит о наклонении орбиты, близком к 90 градусам. У этой же звезды найдены две теплые экзопланеты земной группы транзитным методом. Таким образом в данном случае орбиты планет и двойной звезды близки к компланарным. Система является представителем класса объектов где компактная планетная система образовалась в двойной звездной системе с довольно малым разделением. Такие системы помогают накладывать ограничения на теории планетообразования. Также представляет интерес динамическая эволюция, приведшая к наблюдаемой взаимной ориентации орбит планет и двойной звезды.

Выполнен обзор 420 членов рассеянного скопления Плеяды на предмет двойственности. Несмотря на то что Плеяды - это одно из наиболее изученных рассеянных скоплений, нам удалось найти 20 новых двойных звезд, таким образом существенно дополнив статистику двойственности в этом скоплении [Chulkov2025], что стало возможным благодаря упомянутым выше улучшениям методики прецизионных измерений видности. Проведен спектр-интерферометрический обзор 733 звезд в области звездообразования Телец-Возничий. Полное количество наблюдений составило 933. Всего у 225 звезд была обнаружена двойственность. Большая часть из этих систем известны, поскольку область звездообразования Телец-Возничий хорошо изучена. Однако есть и новые открытия среди слабых звезд, которые труднодоступны системам

адаптивной оптики. Проведен обзор 270 звезд скопления Гиады, выполнено 400 наблюдений. У 100 звезд обнаружена двойственность. Проводится анализ.

4. Макет датчика волнового фронта Шака-Гартмана

Выполнялась отработка элементов адаптивной оптики - датчика волнового фронта Шака-Гартмана. Студентами астрономического отделения физического факультета МГУ был спроектирован и собран макет Шака-Гартмана. Макет включает в себя имитатор турбулентности - вращающийся стеклянный диск с нанесенным на него неравномерным покрытием лака. Исследовалась технология изготовления имитатора турбулентности методом полимерной 3D печати. Макет оснащен также внутренним лазерным источником света, с которым измерения будут выполняться через имитатор атмосферной турбулентности. В качестве детектора используется CMOS матрица с шумом считывания 1 е. В ходе работы над макетом было продемонстрировано измерение гартманограмм с частотой до 800 Гц, что соответствует типичным частотам применяемым в астрономической адаптивной оптике..

Были проведены пробные измерения на 70-см телескопе АЗТ-2 на Воробьевых горах. Макет обеспечивает возможность одновременной регистрации прямого изображения и гартманограммы, что в будущем позволит выполнять отрабатывать восстановление волнового фронта, а также оценку функции рассеяния точки с последующим использованием ее для восстановления изображения методом деконволюции. Интерес представляет возможное использование одновременных измерений с датчиком волнового фронта для уточнения измерений видности методом спектр-интерферометрии.

Заключение

1. Астроклиматический монитор (АСМ). За отчетный период 2021-2025 гг. астроклиматический монитор Кавказской Горной Обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ продолжил работу в полностью автоматическом режиме, обеспечив непрерывный сбор статистически значимых данных. Было получено в общей сложности 5750 часов измерений профилей оптической турбулентности и скорости ветра, экстинкции и фона неба, что соответствует многолетней норме ясного времени. Медианное качество изображения (seeing) за этот период составило 1.18", что несколько хуже показателей предыдущих лет. Данные АСМ в режиме, близком к реальному времени (с задержкой ~1 минута), использовались для оптимизации наблюдений на 2.5-м и 60-см телескопах обсерватории.

2. Прибор Domecam. Запущен в эксплуатацию и успешно использован для детального исследования подкупольной турбулентности на 2.5-м телескопе КГО. На основе 88 измерений была обнаружена зависимость интенсивности подкупольной турбулентности от разности температур главного зеркала и воздуха внутри башни, что подтверждает её конвекционную природу. Вклад подкупольной турбулентности в ухудшение медианного качества изображения в 2.5-м телескопе оценен в 0.22" (с 0.9" до 1.12"). Также были

определенены важные параметры для моделирования методов высокого разрешения: малый внешний масштаб турбулентности (~0.6 м) и характерные времена декорреляции (30-70 мс), указывающие на нарушение гипотезы Тэйлора. Корректность методики измерений прибором *Domesat* была независимо подтверждена путем сравнения с данными прибора *MASS*.

3. Спектрополяриметр. Проведена глубокая модернизация прибора (2022 г.), установлена низкошумящая CMOS-матрица Hamamatsu ORCA-Quest, существенно улучшена оптико-механическая стабильность и надежность работы моторизации. Развитие методики, включая применение опорных звезд, коррекцию систематических эффектов (нелинейность детектора, дисторсия, ошибки коллимации) позволило существенно повысить точность измерений видности, и в свою очередь оценок разделения, позиционного угла и контраста двойных звезд. Стали возможны уверенные измерения для пар с субдифракционным разделением. В рамках международной программы поддержки миссии *TESS* выполнено более 3400 наблюдений, приведших к обнаружению сотен новых двойных систем и внесших вклад в десятки научных публикаций, включая статистическую валидацию экзопланет и изучение планет в двойных и кратных звездных системах.

4. Макет датчика волнового фронта Шака-Гартмана. В рамках учебно-исследовательской работы создан функциональный макет датчика волнового фронта Шака-Гартмана, включающий имитатор турбулентности. На макете продемонстрирована регистрация гартманограмм с частотой до 800 Гц, что соответствует требованиям адаптивной оптики. Проведены пробные наблюдения на 70-см телескопе АЗТ-2, подтвердившие работоспособность схемы. Данная разработка закладывает основу для будущих исследований по восстановлению волнового фронта, деконволюции изображений и комбинированию методов адаптивной оптики со спектр-интерферометрией. В качестве альтернативы разработке микро-DIMM был выбран путь создания датчика Шака-Гартмана, так как этот метод предоставляет более богатую информацию о волновом фронте, которая может быть использована не только для измерения интегрального seeing, но и для решения задач адаптивной оптики и уточнения данных спектр-интерферометрии.

Список статей в 2025 году

1. TOI-1846 b: a super-Earth in the radius valley orbiting a nearby M dwarf. Soubkiou, Abderahmane... Safonov Boris, Strakhov Ivan, ... et al в журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, издательство *Oxford Journals, Oxford University Press (Oxford, UK, England)*, том 541, № 4, с. 3249-3268
2. A Swarm of WASP Planets: Nine Giant Planets Identified by the WASP Survey'; Schanche N.,Budnikova P.A., Strakhov I.A., et al в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 169, № 6, с. 334
3. Characterization of seven transiting systems, including four warm Jupiters from SOPHIE and TESS. Heidari N., ... Safonov B., et al в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 694, № 2, с. A36-A36

4. TOI-5108 b and TOI 5786 b: Two transiting sub-Saturns detected and characterized with TESS, MaHPS, and SOPHIE. Thomas Luis, ... Belinski Alexander A., Strakhov Ivan A. et al в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 694, № 1, с. A143-A167.
5. Giant Outer Transiting Exoplanet Mass (GOT 'EM) Survey. VI. Confirmation of a Long-period Giant Planet Discovered with a Single TESS Transit. Essack Zahra, ... Strakhov Ivan A., et al в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 170, № 1, с. 41.
6. Investigating the eccentricity distribution of transiting, long-period giant planets. Alqasim Ahlam, ... Strakhov Ivan A., et al. в журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, издательство *Oxford Journals, Oxford University Press (Oxford, UK, England)*, том 539, № 1, с. 307-329.
7. A Pair of Dynamically Interacting Sub-Neptunes around TOI-6054. Kroft Maxwell A., ... Goliguzova Maria V., Safonov Boris S., et al. в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 170, № 3, с. 150-167.
8. Three hot Jupiters transiting K-dwarfs with significant heavy element masses. Frensch Y.G.C., ... Strakhov I.A. et al. в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 700, с. A118.
9. Two warm Earth-sized exoplanets and an Earth-sized candidate in the M5V-M6V binary system TOI-2267. Zúñiga-Fernández S., ... Strakhov I.A., et al в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 702, с. A85.
10. Migration and Evolution of giant ExoPlanets (MEEP). II. Super-Jupiters and Lithium-rich host stars. Schulte Jack, ... Strakhov Ivan A., et al. в журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, издательство *Oxford Journals, Oxford University Press (Oxford, UK, England)*, том 543, № 1, с. 292-313.
11. Validation of TESS Planet Candidates with Multicolor Transit Photometry and TRICERATOPS+. Gomez Barrientos Jonathan, ..., Budnikova Polina A., Cheryasov Dmitry V., в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 170, № 3, с. 148.
12. Eleven New Transiting Brown Dwarfs and Very-low-mass Stars from TESS. Vowell Noah, ... Strakhov Ivan A., et al в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 170, № 2, с. 68.
13. TOI-1743 b, TOI-5799 b, TOI-5799 c, and TOI-6223 b: TESS discovery and validation of four super-Earth to Neptune-sized planets around M dwarfs. Yalçinkaya S., ... Strakhov I.A., et al. в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 702, с. A209.
14. A New Brown Dwarf Orbiting an M Star and an Investigation of the Eccentricity Distribution of Transiting Long-period Brown Dwarfs. Gan Tianjun, ... Strakhov Ivan A. et в журнале *Astrophysical Journal Letters*, том 988, № 2, с. L78.
15. The TESS Grand Unified Hot Jupiter Survey. III. Thirty More Giant Planets. Yee Samuel W., ... Belinski Alexander A., ... Maslennikova Natalia A., ... Safonov Boris S. et al в журнале *Astrophysical Journal, Supplement Series*, издательство *University of Chicago Press (United States)*, том 280, № 1, с. 1-41.

16. Dynamical Analysis of the HD 169142 Planet-forming Disk: Twelve Years of High-contrast Polarimetry. Lucas Miles, ... Safonov Boris et al. в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 170, № 5, с. 278
17. Resolving Pleiades Binary Stars with Gaia and Speckle Interferometric Observations. Chulkov Dmitry, Strakhov Ivan, Safonov Boris в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 169, № 3, с. 145.

Список статей в 2024 году

1. Discovery and characterization of a dense sub-Saturn TOI-6651b. Baliwal Sanjay, ..., Safonov Boris S., Strakhov Ivan A., ... в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство Springer Verlag (Germany), том 691
2. TOI-1173 A b: The First Inflated Super-Neptune in a Wide Binary System. Galarza Jhon Yana, ... Safonov Boris в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 168, № 2, с. 91.
3. The GAPS programme at TNG. LVII. TOI-5076b: A warm sub-Neptune planet orbiting a thin-to-thick-disk transition star in a wide binary system. Montalto M., ... Safonov B.S., ... Strakhov I.A., в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство Springer Verlag (Germany), том 687 DOI
4. The TESS-Keck Survey. XX. 15 New TESS Planets and a Uniform RV Analysis of All Survey Targets. Polanski Alex S., ... Ershova Irina O., Cheryasov Dmitry V., Safonov Boris, ... в журнале *Astrophysical Journal, Supplement Series*, издательство University of Chicago Press (United States), том 272, № 2, с. 32
5. The Discovery and Follow-up of Four Transiting Short-period Sub-Neptunes Orbiting M Dwarfs. Hori Yasunori, ... Safonov Boris S., Strakhov Ivan A., ... в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 167, № 6, с. 289
6. TOI-1135 b: A young hot Saturn-size planet orbiting a solar-type star Mallorquín M., ... Safonov B., Strakhov I.A., ... в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство Springer Verlag (Germany), том 685
7. VaTEST III: Validation of eight potential super-earths from TESS data. Mistry Priyashkumar, ... Safonov Boris S., ... в журнале *Publications of the Astronomical Society of Australia*, издательство Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Publishing (Australia), том 41, с. e030
8. The GAPS programme at TNG. XLIX. TOI-5398, the youngest compact multi-planet system composed of an inner sub-Neptune and an outer warm Saturn. Mantovan G., ..., Cheryasov D., Strakhov I., ... в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство Springer Verlag (Germany), том 682.
9. Migration and Evolution of giant ExoPlanets (MEEP). I. Nine Newly Confirmed Hot Jupiters from the TESS Mission. Schulte Jack, ... Strakhov Ivan A., ... Gerasimov Ivan S., ... в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 168, № 1, с. 32
10. Visible-light High-contrast Imaging and Polarimetry with SCExAO/VAMPIRES. Lucas Miles, ... Safonov Boris, ... в журнале *Publications of the Astronomical Society of the*

Pacific, издательство University of Chicago Press (United States), том 136, № 11, с. 114504

11. TOI-5126: A hot super-Neptune and warm Neptune pair discovered by TESS and CHEOPS Fairnington Tyler R., ... Belinski Alexandre A., ... Safonov Boris S., ... в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, издательство Oxford Journals, Oxford University Press (Oxford, UK, England), том 527, № 3, с. 8768-8783

Список статей в 2023 году

1. Another shipment of six short-period giant planets from TESS Rodriguez, J. and 133 co-authors, including Safonov, B.S., Belinski, A.A., Goliguzova, M.V., MNRAS, Volume 521, Issue 2, pp.2765-2785.
2. Two Warm Neptunes transiting HD 12572 revealed by TESS & Cheops, Osborn, H.P. and 129 co-authors, including Goliguzova, M.V., Belinski, A.A. MNRAS, Volume 523, Issue 2, pp.3069-3089.
3. TESS Giants Transiting Giants. III. An Eccentric Warm Jupiter Supports a Period-Eccentricity Relation for Giant Planets Transiting Evolved Stars, Grunblatt, S. and 30 co-authors, including Safonov, B.S., Strakhov, I.A. AJ, Volume 165, Issue 2, id.44, 15 pp.
4. The TESS Grand Unified Hot Jupiter Survey. II. Twenty Hot Jupiters, Yee, S. and 87 co-authors, including Safonov B.S., Belinski, A.A., ApJSS, Volume 265, Issue 1, id.1, 32 pp.
5. Three Short-Period Large Exoplanets with a Long-Period Super-Jupiter Companion Orbiting TOI-4010. Kunimoto, M. and 56 co-authors, including Safonov B.S., Goliguzova, M.V., AJ, Volume 166, Issue 1, id.7, 22 pp.
6. Two super-Earths at the edge of the habitable zone of the nearby M dwarf TOI-2095. Murgas, F. and 44 co-authors, including Safonov, B.S., Strakhov, I.A., Astronomy & Astrophysics, Volume 677, id.A182, 28 pp.
7. TOI-1695 b: A Keystone Water World Elucidating Radius Valley Emergence Mechanisms Around Early M Dwarfs, Cherubim, C. and 42 co-authors, including Safonov, B.S. ..., AJ, Volume 165, Issue 4, id.167, 17 pp.
8. Two Warm Super-Earths Transiting the Nearby M Dwarf TOI-2095. Quintana, E. and 59 co-authors, including Safonov B.S., AJ, Volume 166, Issue 5, id.195, 15 pp.
9. VaTEST. II. Statistical Validation of 11 TESS-detected Exoplanets Orbiting K-type Stars, Mistry, P. and 51 co-authors, including Goliguzova, M.V., Strakhov, I.A., AJ, Volume 166, Issue 1, id.9, 21 pp.
10. TOI-5126: A hot super-Neptune and warm Neptune pair discovered by TESS and CHEOPS, Fairnington, T., and 36 co-authors, including Safonov, B., Belinski, A., MNRAS, Oct 2023.

11. TESS Spots a Super-puff: The Remarkably Low Density of TOI-1420b, Yoshida, S. and 54 co-authors, including Safonov, B.S., Goliguzova, M.V., Strakhov, I.A., The Astronomical Journal, Volume 166, Issue 5, id.181, 12 pp.
12. A Mini-Neptune Orbiting the Metal-poor K Dwarf BD+29 2654, Dai, F. and 51 co-authors, including Belinski, A. The Astronomical Journal, Volume 166, Issue 2, id.49, 14 pp.
13. TOI 4201 b and TOI 5344 b: Discovery of Two Transiting Giant Planets around M-dwarf Stars and Revised Parameters for Three Others, Hartman, J. and 65 co-authors, including Goliguzova, M., Tatarnikov, A., The Astronomical Journal, Volume 166, Issue 4, id.163, 23 pp.
14. Избранные активные ядра галактик из обзора СРГ/eROSITA: оптические и ИК-наблюдения на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ в 2021 и 2022 годах
Белинский А.А., Додин А.В., Желтоухов С.Г., Постнов К.А., Потанин С.А., Татарников А.М., Тарабенков А.Н., Шатский Н.И., Медведев П.С., Хорунжев Г.А., Мещеряков А.В., Сазонов С.Ю., Гильфанов М.Р. в журнале Астрофизический бюллетень, издательство САО РАН (Нижний Архыз), том 78, № 3, с. 294-304.

Список статей в 2022 году

1. Validation of 13 Hot and Potentially Terrestrial TESS Planets, Giacalone S., ... Safonov, B.S., Strakhov, I.A. et al, в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 163, № 2, с. 99
2. The TESS-Keck Survey. XI. Mass Measurements for Four Transiting Sub-Neptunes Orbiting K Dwarf TOI-1246, Turtelboom Emma V., ... Safonov B.S., et al, в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 163, № 6, с. 293.
3. The TESS Grand Unified Hot Jupiter Survey. I. Ten TESS Planets, Yee Samuel W., ... Safonov B.S., Strakhov I.A., et al, в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 164, № 2, с. 70.
4. TOI-2285b: A 1.7 Earth-radius planet near the habitable zone around a nearby M dwarf, Fukui A.,... Belinskii, A., Safonov B.S., Strakhov, I.A., ... et al в журнале *Publications of the Astronomical Society of Japan*, издательство *Astronomical Society of Japan (Japan)*, том 74, № 1, с. L1-L8.
5. TOI-2257 b: A highly eccentric long-period sub-Neptune transiting a nearby M dwarf, Schanche N., ... Belinskii, A., Safonov B.S., Strakhov, I.A., ... et al, в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 657, с. A45.
6. Confirmation and characterisation of three giant planets detected by TESS from the FIES/NOT and Tull/McDonald spectrographs, Knudstrup E. ... Belinskii, A., Safonov

B.S., Strakhov, I.A., ... et al в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 667, с. A22.

Список статей в 2021 году

1. Useful relations for the analysis of stellar scintillation at the entrance pupil of a telescope. Kornilov Victor, Safonov Boris, Kornilov Matwey в журнале *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, издательство *Optical Society of America (United States)*, том 38, № 9, с. 1284-1292
2. TOI-1518b: A Misaligned Ultra-hot Jupiter with Iron in Its Atmosphere. Cabot Samuel H.C., ... Belinski Alexander A., Safonov Boris S., Strakhov Ivan A., et al в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 162, № 5, с. 218