

УДК 524.3:523.4

## EXPLANATION: ПРОЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ И ТРАНЗИЕНТНЫХ СОБЫТИЙ

© 2022 Г. Г. Валявин<sup>1\*</sup>, Г. М. Бескин<sup>1,2</sup>, А. Ф. Валеев<sup>1,3</sup>, Г. А. Галазутдинов<sup>3,1</sup>, С. Н. Фабрика<sup>1</sup>, В. Н. Аитов<sup>1</sup>, О. Я. Яковлев<sup>4,1</sup>, А. Е. Иванова<sup>4</sup>, Р. В. Балуев<sup>5</sup>, В. В. Власюк<sup>1</sup>, Инву Хан<sup>6</sup>, С. В. Карпов<sup>7,1,2</sup>, В. В. Сасюк<sup>2</sup>, А. В. Перков<sup>8</sup>, С. Ф. Бондарь<sup>8</sup>, Ф. А. Мусаев<sup>1</sup>, Э. Н. Емельянов<sup>1</sup>, Т. А. Фатхуллин<sup>1</sup>, С. В. Драбек<sup>1</sup>, В. С. Шергин<sup>1</sup>, Бьён-Чёл Ли<sup>6</sup>, Г. Ш. Митиани<sup>1</sup>, Т. Е. Бурлакова<sup>1,3</sup>, М. В. Юшкин<sup>1</sup>, Е. Г. Сендзикас<sup>1</sup>, Д. Р. Гадельшин<sup>1</sup>, Л. Г. Чмырева<sup>1</sup>, А. С. Бескакотов<sup>1,5</sup>, В. В. Дьяченко<sup>1</sup>, Д. А. Растегаев<sup>1</sup>, А. А. Митрофанова<sup>1</sup>, И. А. Якунин<sup>1,5</sup>, К. А. Антонюк<sup>3</sup>, В. Л. Плохотниченко<sup>1</sup>, А. Г. Гутаев<sup>1</sup>, Н. В. Ляпсина<sup>1</sup>, В. Н. Черненко<sup>1</sup>, А. В. Бирюков<sup>2,9</sup>, Е. А. Иванов<sup>1,8</sup>, А. А. Белинский<sup>9</sup>, Е. Н. Соков<sup>10,5</sup>, А. В. Тавров<sup>4</sup>, О. И. Кораблев<sup>4</sup>, Мьён-Гу Парк<sup>11</sup>, В. А. Столяров<sup>1,12</sup>, В. Д. Бычков<sup>1</sup>, С. Ю. Горда<sup>13</sup>, А. А. Попов<sup>13</sup>, А. М. Соболев<sup>13</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

<sup>3</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

<sup>4</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

<sup>5</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

<sup>6</sup>Корейский институт астрономии и наук о космосе, Тэджон, 34055 Республика Корея

<sup>7</sup>Центральноевропейский институт космологии и фундаментальной физики, Институт физики, Чешская академия наук, Прага, 18221 Республика Чехия

<sup>8</sup>АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, 111024 Россия

<sup>9</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

<sup>10</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

<sup>11</sup>Отделение астрономии и наук об атмосфере, Национальный университет Кёнбук, Тэгу 41566, Республика Корея

<sup>12</sup>Кавендишская лаборатория, Кембриджский университет, Кембридж CB3 0HE, Великобритания

<sup>13</sup>Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, 620000 Россия

Поступила в редакцию 29 августа 2022 года; после доработки 3 октября 2022 года; принята к публикации 4 октября 2022 года

Мы представляем краткое описание совместного российско-корейского проекта, сокращенно именуемого EXPLANATION (EXoPLANet And Transient events InvestigatiON). Цель проекта — массовый поиск нестационарных событий во Вселенной с помощью фотометрических, спеклинтерферометрических, спектральных и радиоболометрических методов наблюдений, а также изучение экзопланет. Ядро проекта составляют несколько 0.07–2.5-м оптических телескопов, 6-м телескоп БТА и 600-м радиотелескоп РАТАН-600 Специальной астрофизической обсерватории РАН, обсерватории Московского государственного университета, Коуровской обсерватории, Крымской астрофизической обсерватории, Корейского института астрономии и наук о космосе (Республика Корея). Мы обсуждаем философию проекта и его инструментарий, а также первые результаты. В данной статье мы сообщаем о фактах, связанных с обнаружением нескольких типов транзиентных событий и изучением экзопланет.

Ключевые слова: *методы: фотометрия — методы: спектроскопия — телескопы — звезды: планетные системы — транзиенты*

\*E-mail: gvalyavin@gmail.com

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В статье представлен проект единого автоматизированного комплекса мониторинга ночного неба с целью поиска экзопланет и изучения транзиентных явлений в ближнем и дальнем космосе. Проект осуществляется на базе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) при участии Института астрономии и космических наук (КАСИ, Республика Корея) и других обсерваторий. Среди последних к проекту, в частности, присоединились Крымская астрофизическая обсерватория (КрАО), Коуровская астрономическая обсерватория и Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ (КГО ГАИШ МГУ). План организации наблюдательного кластера такого масштаба был продиктован следующими соображениями.

За последние три десятилетия астрономия получила мощный импульс развития благодаря технологическим достижениям. Это привело к прорывным фундаментальным открытиям и дало новые знания о Вселенной. К числу таких открытий относится обнаружение экзопланет — планет, обращающихся вокруг других звезд. При поиске внесолнечных планет транзитные экзопланеты представляют особый интерес, поскольку их свойства могут быть изучены в мельчайших деталях и с высокой точностью. Наблюдения транзитов позволяют проводить массовый поиск экзопланет средствами фотометрии, а также изучать их свойства, в том числе радиусы, массы, плотности и химический состав их атмосфер. Благодаря усилиям космических миссий Kepler (Dupree 2009) и CoRoT (Baglin et al. 2007), а также в результате успешной работы различных наземных проектов фотометрических обзоров для поиска экзопланет, таких как знаменитый «Superwasp» (Street et al. 2003) или менее известный «Kourouka Planet Search» (Burdanov et al. 2016), теперь у нас есть список нескольких тысяч транзитных внесолнечных планет и кандидатов в экзопланеты. На основании этих исследований подтверждены основные параметры значительной части планет, такие как массы, радиусы, температуры, химический состав их атмосфер, размеры орбит и т.д. Теперь известно, что по параметрам экзопланеты занимают широкий диапазон масс, химического состава и расстояний от своих родительских звезд.

Несмотря на очевидный прогресс, статистика открытий новых экзопланет и кандидатов в экзопланеты растет гораздо быстрее, чем статистика надежно изученных и классифицированных экзопланет. Требуется больше космических и наземных проектов, направленных на исследование новых, а также уже открытых внесолнечных планет и кандидатов в такие планеты. По этой причине мы разработали проект EXPLANATION, направленный

на расширение сети наземных спектроскопических и фотометрических программ, посвященных изучению экзопланет. В частности, проект рассматривается в качестве наблюдательной базы для наземной поддержки предстоящих космических миссий PLATO (Heras et al. 2020) и Спектр-УФ (Sachkov et al. 2020). Также в рамках проекта будут выполняться собственные поисковые программы. На сегодняшний день все обсерватории, участвующие в ассоциации, располагают необходимыми инструментами для наземных исследований экзопланет. В статье описываются эти инструменты, их текущее состояние и первые результаты изучения внесолнечных планет.

Поиск и изучение транзиентных явлений включает в себя задачу развития универсального подхода к пониманию быстрых процессов преобразования различных форм энергии в астрономических явлениях при разных физических условиях. Эти процессы сопровождаются мощным оптическим и радиоизлучением, регистрируемым наземными телескопами. В рамках проекта будут каталогизированы и изучены разнообразные нестационарные события в ближнем (сгорание метеоров в атмосфере Земли, вариации яркости космического мусора, искусственных спутников, астероидов и комет) и глубоком космосе (вспышки переменных звезд, взрывы новых и сверхновых, гамма-всплески, импульсы гравитационных волн и т.д.).

Проблема поиска и исследования быстропротекающих космических событий, происходящих в источниках оптического излучения (транзиентных событий, или транзиентов), была впервые сформулирована Х. Бонди (см. Bondi (1970)). Для обнаружения и изучения таких источников необходимы широкоугольные инструменты с высокоэффективными детекторами по меньшей мере с субсекундным временным разрешением. Последнее требование обусловлено короткой продолжительностью (до 0.01 с) рассматриваемых явлений (гамма-всплески, ударные волны сверхновых и вспышки новых) и/или высокими скоростями, до десятков градусов в секунду (спутники, космический мусор, метеоры и болиды).

В последние годы возникла необходимость улучшить временное разрешение при мониторинге до миллисекунд в связи с появлением новой задачи поиска оптических транзиентных процессов, сопровождающих быстрые радиовсплески (Thornton et al. 2013) и импульсы гравитационных волн (Abbott et al. 2016), длительность которых лежит в миллисекундном диапазоне. Характеристики обзорных телескопов нашего проекта отвечают требованиям, необходимым для исследований в упомянутых направлениях. В данной статье мы приводим их, а также представляем некоторые из наиболее важных результатов, уже полученных с

использованием разработанного нами оборудования.

## 2. ИНСТРУМЕНТЫ

Инструментарий проекта для обеих задач (поиск и изучение экзопланет и транзиентных событий) организован по одной и той же трехуровневой схеме.

Основным оборудованием проекта на первом, базовом, уровне является многоканальный фотометрический комплекс малых роботизированных телескопов САО РАН с широкими полями зрения: это многоканальный телескоп ММТ-9 и комплекс 0.5-м телескопов. Основная задача, выполняемая с помощью этих инструментов, — отслеживание периодических изменений потока излучения звезд (обусловленных, например, транзитами экзопланет по дискам родительских звезд, затмениями переменных звезд) и нестационарных космических событий различной длительности, начиная от ста миллисекунд и более (микролинзирования экзопланетного происхождения, гамма-всплески и т.д.).

Второй уровень проекта представлен рядом 0.6–1.3-м телескопов САО РАН и других обсерваторий. Задачей, выполняемой с их помощью, является проведение детальных фотометрических исследований событий, обнаруженных обзорными телескопами первого уровня.

Наконец, ядро третьего — экспертного — уровня проекта включает в себя крупные российские оптические телескопы с апертурами от 2.5 до 6 м и радиотелескоп РАТАН-600 с кольцевой антенной диаметром 600 м. Задачей третьего уровня является проведение экспертных фотометрических, поляризационных, спектральных и спеклинтерферометрических исследований объектов, выбранных на предыдущих этапах. Кроме того, в задачу входит проверка объектов из других программ, в том числе космического базирования, как упоминалось выше.

В следующем разделе мы представляем подробное описание тех телескопов и инструментов, которые так или иначе используются в проекте.

### 2.1. ММТ-9

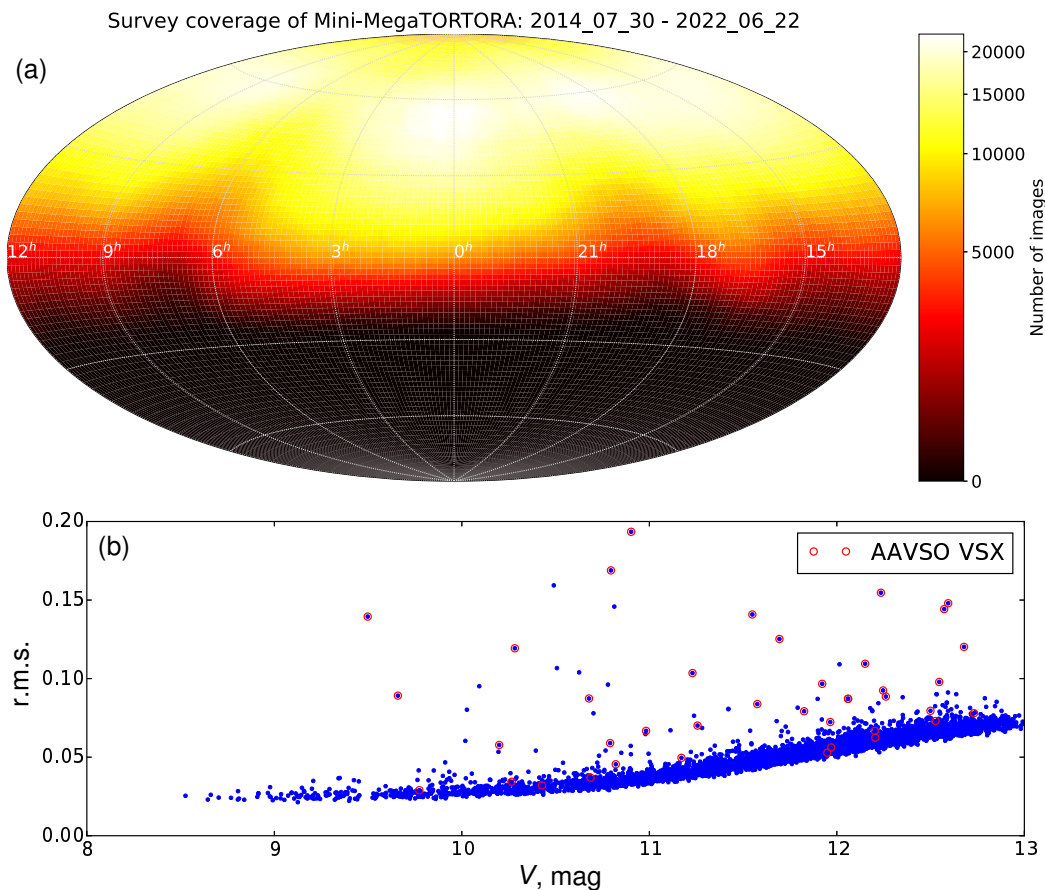
Мини-МегатОРТОРА (ММТ-9) — это широкоугольная оптическая система мониторинга с высоким временным разрешением (Beskin et al. 2017), созданная за счет средств Казанского федерального университета и принадлежащая ему; эксплуатируется с 2014 года в соответствии с соглашением между Казанским федеральным университетом и Специальной астрофизической обсерваторией РАН.

Mini-MegaTORTORA (ММТ-9 или ММТ для краткости) является преемником более простых одноканальных камер FAVOR (Beskin et al. 2005) и TORTORA (Beskin et al. 2010), которые эксплуатировались в период с 2004 по 2014 год. Основной целью исследований, проводимых с помощью этих инструментов, был непрерывный поиск оптических транзиентов, сопровождающих гамма-всплески. Он привел к успеху — открытию с помощью камеры TORTORA яркого и быстро меняющегося источника оптического излучения GRB 080319B (Beskin et al. 2010). ММТ-9 сконструирована с учетом этого результата — в ней существенно увеличено поле зрения, несколько улучшено временное разрешение и реализована возможность одновременных измерений цветовых и поляризационных параметров обнаруженного объекта.

Эти характеристики обеспечены благодаря особенностям конструкции ММТ, состоящей из девяти отдельных каналов, размещенных попарно на пяти экваториальных монтировках. На каждом канале перед объективом Canon EF85/1.2 установлено целостатное зеркало для быстрого (за время около 1 секунды) изменения положения поля зрения объектива в диапазоне  $\pm 10^\circ$  в двух направлениях. Это позволяет либо создавать мозаику с большим полем зрения, либо перенаводить все каналы в одном направлении. При работе в последнем режиме используется набор цветных (*B*, *V* или *R* системы Джонсона) и поляриметрических (три разные направления) фильтров, которые могут размещаться перед объективом, для того чтобы получить максимум информации о наблюдаемой области неба, выполняя как трехцветную фотометрию, так и поляриметрию.

Высокое временное разрешение реализуется за счет использования детекторов Andor Neo sCMOS размером  $2560 \times 2160$  пикселей по 6.4 мкм каждый, что обеспечивает поле зрения  $9^\circ \times 11^\circ$  для каждого канала и позволяет работать со временем экспозиции всего 0.1 с.

Прибор в целом позволяет одновременно наблюдать область неба размером до  $30^\circ \times 30^\circ$ . Как правило, мониторинг проводится с экспозицией 0.1 с (10 кадров в секунду с эффективным пределом обнаружения около  $V = 11^m$ ). В таком режиме в каждом канале в реальном времени проводится сравнение нового кадра с усредненным по ста предыдущим, что позволяет выделить и классифицировать (отнести к метеорам, искусственным спутникам или неподвижным транзиентам) все вновь появившиеся объекты в течение нескольких секунд. После этого система переходит в режим детальных исследований таких источников, фотометрических и/или поляризационных, и передает данные о них в сеть. За восемь лет работы



**Рис. 1.** Панель (a) — охват неба обзором Mini-MegaTORTORA Sky Survey, то есть количество кадров съемки, покрывающих данную позицию на небе. Панель (b) — характерные средние значения уклонений от кривых блеска в данных обзора в зависимости от средней величины. Красными кружками отмечены известные переменные звезды из базы данных AAVSO VSX.

ММТ-9 были успешно обнаружены и каталогизированы более 300 000 метеорных событий<sup>1</sup> (Кагров et al. 2016a) и более 300 000 прохождений 10 000 различных искусственных спутников<sup>2</sup> (Кагров et al. 2016b), зарегистрирована и исследована оптическая вспышка, сопровождавшая гамма-всплеск GRB 160625B (Zhang et al. 2018). Были также обнаружены около 10 000 субсекундных вспышек, большая часть которых, по-видимому, является солнечными бликами от подвижных элементов спутников (Кагров et al. 2019).

Помимо мониторинга с высоким временным разрешением, с помощью ММТ-9 выполняется обычный фотометрический обзор неба с пределом около 13<sup>m</sup>5 в V-полосе. В этом режиме с экспозицией от 20 до 60 с было получено более 1.7 мил-

лионов изображений, покрывающих каждую точку северного неба 5000–20 000 раз.

Все эти изображения каталогизируются, а также анализируются с помощью специального пакета потоковой обработки, который приводит их к V-полосе Джонсона, определяя фотометрическое уравнение для каждого отдельного изображения, а затем строя статистическую регрессию для цветов отдельных объектов, в предположении об отсутствии корреляции изменения их яркости с изменениями атмосферных условий. В базе данных хранятся около 30 миллиардов фотометрических измерений, которые можно извлечь в виде кривой блеска, сделав запрос по положению любого объекта из обнаруженных ММТ-9<sup>3</sup>.

Точность фотометрических измерений, достигаемая на ММТ-9, определяется особенностями объективов и детекторов, выбор которых был

<sup>1</sup>База данных метеоров, найденных с помощью ММТ-9, находится в открытом доступе по адресу <http://mmt.favor2.info/meteors/>

<sup>2</sup>База данных фотометрических характеристик спутников, полученных на ММТ-9, доступна по адресу <http://mmt.favor2.info/satellites/>

<sup>3</sup>База данных изображений и фотометрические измерения в Mini-MegaTORTORA Sky Survey находятся в открытом доступе по адресу <http://survey.favor2.info/>

ориентирован на достижение максимальных размеров поля зрения камеры: быстрые объективы  $f/1.2$  обеспечивают умеренное качество изображения с широкими крыльями функции рассеяния точки (PSF), а использование микролинзового раstra, покрывающего CMOS-чип детекторов, приводит к сильным субпиксельным перепадам чувствительности. В конечном итоге максимальная точность фотометрии для достаточно ярких объектов составляет около  $0^m02$ .

На рис. 1 показан охват неба (количество кадров, покрывающих любую заданную позицию) обзора Mini-MegaTORTORA Sky Survey, а также характерный разброс оценок блеска для отдельных звезд в зависимости от их средней звездной величины.

## 2.2. Комплекс 0.5-м телескопов

В дополнение к ММТ-9 первый уровень проекта — обзорный — представлен комплексом, состоящим из нескольких роботизированных 0.5-м телескопов. Работа комплекса организована аналогично ММТ-9 и началась в CAO РАН в 2019 году, когда был создан первый телескоп AS 500, за которым последовали второй и третий (осень 2021 года). Кроме того, мы планируем установить еще три (и более) телескопа с теми же апертурами в течение следующих нескольких лет. В настоящее время уже работают три полностью автоматизированных телескопа.

Используемые 0.5-м телескопы спроектированы и изготовлены компанией «Астросиб» (Новосибирск). Это телескопы системы Ричи—Кретьена с главным зеркалом диаметром 0.5 м. Данный элемент остается неизменным для всех телескопов комплекса. Небольшие различия заключаются в следующем: телескопы № 1 и № 2 оснащены роботизированными монтировками (10 Micron Mount GM 4000 HPS), сделанными в Италии. Телескоп № 3 снабжен монтировкой, изготовленной компанией «Астросиб».

Существуют также некоторые различия в конструкции «all-sky»-куполов: телескоп № 1 оснащен куполом производства «Baader» (Германия), купола телескопов № 2 и № 3 также изготовлены компанией «Астросиб».

Изначально мы выбрали такую оптическую конструкцию для телескопов, которая обеспечивает максимальное поле зрения диаметром около  $1^\circ5$ , что подразумевает использование корректора поля зрения объектива и установку детектора света в первичном фокусе, где реализовано отношение апертуры  $F/2.7$ . В будущем для ряда телескопов детекторы будут установлены в положении, обычно

используемом в системе Ричи—Кретьена — в фокусе Кассегрена  $F/8$ . Цель такого перемещения — улучшение масштаба изображения для выполнения задач, требующих большей точности.

Фокусировка телескопов осуществляется с помощью стандартных устройств. Широкоформатные камеры изготовлены фирмой FingerLake Instrumentation (США) на базе ПЗС-устройств с матрицами  $4096 \times 4096$  с фронтальной подсветкой KAF 16803 и размером пикселя 9 мкм. Фотометрическая система представлена широкополосными фильтрами системы Джонсона, которые устанавливаются на турели с пятью позициями диаметром 50 мм. Данные наблюдений записываются в стандартные  $4152 \times 4128$  16-разрядные FITS-файлы.

В настоящее время телескопы работают независимо от фотометрического комплекса ММТ-9 и в основном задействованы при поиске новых кандидатов в экзопланеты (первые результаты изложены ниже). Однако в ближайшем будущем 0.5-м телескопы вместе с ММТ-9 станут частью единого роботизированного фотометрического комплекса, управляемого общим программным пакетом.

## 2.3. Фотометрические телескопы метрового класса

Следующий уровень в иерархии проекта — это группа фотометрических телескопов с апертурами в диапазоне от 0.6 до 1.25 м. Наиболее значимые из них перечислены ниже.

*Телескоп Цейсс-1000* CAO РАН с главным зеркалом диаметром 1 м — классический оптический телескоп с фокусным расстоянием  $F/13$ . Ширина невиньетированного поля составляет  $45'$ , характерное качество изображений в погодных условиях Северного Кавказа — около  $1''5$ . Прибор оснащен полным набором фотометрического/поляриметрического оборудования для экспертной оценки характеристик транзитных событий и кандидатов в экзопланеты, обнаруженных в ходе описанного выше обзорного поиска.

*Астрономический телескоп-рефлектор AZT-11* Крымской астрофизической обсерватории. Это 1.25-м рефлектор системы Ричи—Кретьена с фокусным расстоянием 16 м, двумя фокусами и всем необходимым фотометрическим/поляриметрическим оборудованием: 5-канальный фотопляриметр, разработанный В. Пиирола и установленный в главном фокусе, и ПЗС-фотометр во вспомогательном фокусе. Телескоп используется в основном для фотометрических и поляриметрических наблюдений различных космических объектов: переменных звезд разных типов, активных ядер галактик, экзопланет, астероидов, комет и т.д.

*0.6-м телескоп RC600* Кавказской горной обсерватории Московского государственного университета (КГО ГАИШ МГУ). Это телескоп системы Ричи–Кретьена с главным зеркалом диаметром 600 мм и фокусным расстоянием 4200 мм производства ASA (Австрия). Прибор установлен на немецкой параллактической монтировке, снабженной двигателем с прямым приводом ASA DDM160 и датчиками положения; укрытием служит щелевой купол ScopeDome 55M. RC600 используется для точных фотометрических наблюдений транзитов экзопланет. Фотометрический блок оснащен двойным колесом FLI CenterLine для установки восьми фильтров  $50 \times 50$  мм. Доступен следующий набор фотометрических фильтров, изготовленных с использованием интерференционной технологии:  $U$ ,  $B$ ,  $V$ ,  $Rc$ ,  $Ic$ ,  $g'$ ,  $r'$ ,  $i'$  и прозрачное стекло. Приемник — ПЗС-камера Andor iKON-L BV форматом  $2048 \times 2048$  пикселей с размером пикселя 13.5 мкм.

Кроме того, в фотометрической части проекта используются несколько телескопов 1-м класса Коуровской обсерватория и Корейского института астрономии и космических наук. Эти инструменты оборудованы всем необходимым для проведения высокоточных фотометрических исследований отождествленных транзитных событий и транзитов экзопланет, включая суперземли (см., например, наблюдение суперземли HD 219134 b, проведенное недавно с помощью 1-м телескопа САО РАН (Valyavin et al. 2018)).

#### 2.4. Телескопы диаметром 1.8, 2.5 и 6 м

Верхний, экспертный уровень проекта составляют следующие оптические инструменты: 1.8-м телескоп астрономической обсерватории Бохьонсан Корейского института астрономии и космических наук, 2.5-м телескоп Кавказской горной обсерватории Московского государственного университета (КГО ГАИШ МГУ) и 6-м БТА САО РАН.

*1.8-м телескоп* оснащен всеми необходимыми приборами для проведения широкого спектра классических фотометрических и спектральных исследований. В контексте нашего проекта наиболее важным инструментом является эшелле-спектрограф-спектрополяриметр высокого разрешения BOES (Kim et al. 2007). Он оснащен йодной ячейкой для точного измерения лучевых скоростей и поляриметрической оптикой для определения величины магнитных полей звезд. Типичная точность измерения лучевых скоростей с BOES составляет  $3\text{--}7 \text{ мс}^{-1}$ . Обработка данных, а также оценки значений магнитных полей и лучевых скоростей подробно описаны Han et al. (2007; 2018), Kang et al. (2005; 2006), Kim et al. (2007) и Lee et al. (2018).

*2.5-м рефлектор Ричи–Кретьена* — основной телескоп обсерватории КГО ГАИШ МГУ с главным зеркалом диаметром 2500 мм и фокусным расстоянием 20 000 мм (Potanin et al. 2017). Он снабжен следующим приемным оборудованием: ПЗС-камера NBI  $2 \times 2K \times 4K$ , спектрограф низкого разрешения TDS, инфракрасная камера-спектрограф ASTRONIRCAM на базе матрицы HAWAII-2RG  $2048 \times 2048$  HgCdTe и спекл-поляриметр (SPP), представляющий собой комбинацию спекл-интерферометра и двухлучевого поляриметра. SPP и ASTRONIRCAM используются в нашей программе исследования экзопланет.

ASTRONIRCAM — это камера с криогенным охлаждением и щелевой спектрограф для диапазона длин волн 1–2.5 мкм, установленный в фокусе Нэсмита 2.5-м телескопа. В фотометрическом режиме ASTRONIRCAM позволяет получать изображения астрономических объектов в поле зрения  $4'6 \times 4'6$  в масштабе  $0''.269/\text{пиксель}$  в стандартных фотометрических диапазонах  $Y$ ,  $J$ ,  $H$ ,  $K$  и  $Ks$ , а также в узкополосных фильтрах  $\text{CH}_4$ ,  $[\text{Fe II}]$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Br}\gamma$  и  $\text{CO}$ . В спектроскопическом режиме на ASTRONIRCAM можно получить спектры протяженных или точечных источников со спектральным разрешением  $R = \lambda/\Delta\lambda \leq 1200$ . Чувствительность ASTRONIRCAM 2.5-м телескопа характеризуется предельными величинами  $J = 20$ ,  $K = 19$ , измеренными с точностью 10%, и временем интегрирования 15 минут при атмосферных условиях качества изображения  $1''$  (Nadjip et al. 2017).

ASTRONIRCAM использовался для фотометрических наблюдений транзитов экзопланет, выполняемых одновременно с оптическими измерениями на RC600. В 2020 году была проведена серия транзитных наблюдений красных карликовых звезд-хозяев в системе TRAPPIST-1 и в нескольких других системах.

Спекл-интерферометрический режим SPP применяется для изучения двойственности звезд с экзопланетами (Safonov et al. 2017). SPP базируется на ПЗС-матрице Andor iXon 897 с быстрым умножением электронов. Размер чувствительной области в пикселях составляет  $512 \times 512$ , а угловой масштаб — 20.6 мсек. дуги/пиксель. Детектор одновременно получает два изображения объекта, соответствующие двум ортогональным поляризациям. Таким образом, номинальное поле зрения прибора прямоугольное,  $5''.16 \times 10''.56$ . Точные углы положения и угловые масштабы определяются из наблюдений широких пар, для которых доступны данные каталога Gaia DR2.

SPP оснащен компенсатором атмосферной дисперсии, который позволяет нам наблюдать слабые объекты в относительно широкой полосе  $I_c$ . Для

наблюдения более ярких мы используем интерферометрические фильтры, центрированные на 625 и 880 нм, шириной 50 и 80 нм соответственно. Обычно мы регистрируем серию из 4000 кадров со скоростью 35 кадров в секунду. Полученный ряд затем обрабатывается с помощью стандартного метода спекл-интерферометрии: вычисление среднего спектра мощности и его последующая аппроксимация в рамках модели двойной звезды. Если ни один из компонентов не обнаружен, мы устанавливаем ограничения на контраст. Подробная информация о конструкции SPP, калибровке и спекл-интерферометрической обработке приведена в статье Safonov et al. (2017).

С помощью SPP уже было изучено более 600 TOI<sup>4</sup>. У 64 из них был обнаружен звездный компаньон. Например, наши наблюдения были использованы при анализе родительской звезды горячего Юпитера TOI-1518b (Cabot et al. 2021).

*6-м Большой Телескоп Альт-азимутальный (БТА) САО РАН* — крупнейший в Евразии оптический телескоп. Он оснащен обширным набором наблюдательного оборудования, необходимого для астрофизических исследований в оптической, ближней ультрафиолетовой и инфракрасной областях электромагнитного спектра. Телескоп расположен недалеко от горы Пастухова, на высоте 2070 м над уровнем моря. 6-метровое главное зеркало имеет параболическую форму и фокусное расстояние 24 м. Тесты показали, что 90% энергии сосредоточено внутри окружности диаметром 0".8. Типичные для кавказского региона погодные условия и атмосфера внутри купола обеспечивают качество изображения около 1".5. Оптическая схема телескопа допускает наблюдения в главном фокусе ( $f/4$ ) и в двух фокусах Нэсмита ( $f/30$ ). Время, необходимое для переключения луча с одного фокуса на другой, составляет 3–4 минуты, что позволяет проводить наблюдения с различными фокусными расстояниями в течение одной ночи.

Среди наблюдательных приборов, используемых в нашем проекте, наиболее важными являются стандартный спекл-интерферометр (Maksimov et al. 2009) с полем зрения  $4".5 \times 4".5$ , оснащенный набором широкополосных фильтров, центрированных на разные длины волн, и новый планетный спектрограф с высоким разрешением. Последний инструмент заслуживает некоторого дополнительного пояснения.

<sup>4</sup>TOI относится к космической миссии TESS и является аббревиатурой названия «Transiting exoplanet survey satellite Object of Interest».

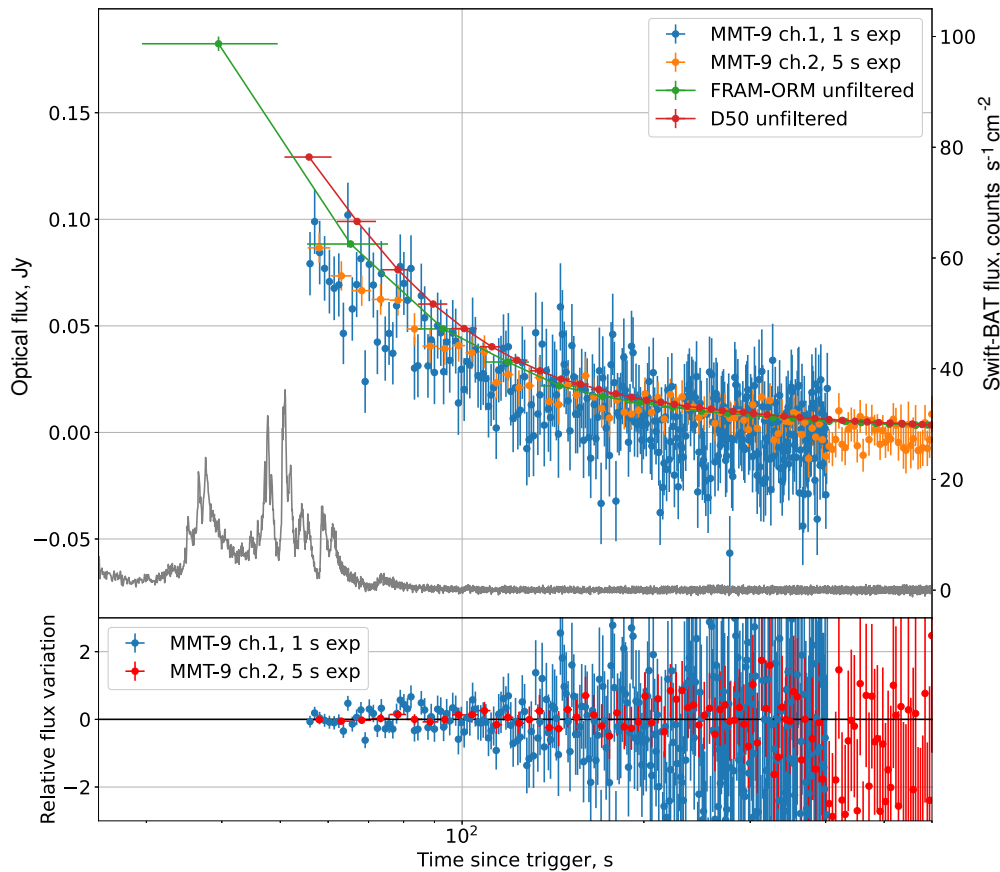
Волоконный спектрограф с высоким разрешением ( $R 50\,000$ – $R 100\,000$ ) для БТА был сконструирован недавно для повышения эффективности ряда наблюдательных программ, включая высокоточную спектроскопию. Оптическая конфигурация спектроскопического блока (Valyavin et al. 2014; 2015; 2020) повторяет классический дизайн, известный как «белый зрачок». (Dekker et al. 2000). В отличие от традиционных схем, в схеме «белый зрачок» используются два внеосевых коллиматора. Один из коллиматоров работает с решеткой эшелле в режиме автоколлимации, в то время как другой коллиматор формирует плоскость зрачка в фокусе, создавая там недисперсное изображение решетки эшелле. Именно здесь размещается блок перекрестной дисперсии, а затем фокусирующая оптика с ПЗС-матрицей. Эта конструкция имеет ряд преимуществ (Dekker et al. 2000, Valyavin et al. 2014; 2015; 2020) и отличную репутацию среди высокоточных спектрографов с высоким разрешением. В настоящее время прибор находится на стадии тестовых наблюдений. В данной статье мы представляем полученные с помощью этого спектрографа первые результаты наблюдений эффекта Росситера–Маклафлина, проявляющегося при транзите экзопланеты по диску Kelt-2b.

## 2.5. Радиотелескоп РАТАН-600

И последний экспертный инструмент проекта — радиотелескоп РАТАН-600 САО РАН, расположенный в Карачаево-Черкесии, недалеко от станции Зеленчукской, на высоте 970 м над уровнем моря. Это один из крупнейших в мире радиотелескопов с отражающим зеркалом диаметром около 600 м. Основными преимуществами РАТАН-600 являются его высокая чувствительность по яркостной температуре и многочастотность (подробнее о РАТАН-600 и его приборах см., например, Mufakharov et al. (2021)).

В нашем проекте РАТАН-600 используется для поиска и изучения радиотранзиентных событий во Вселенной. В настоящее время инструмент сканирует выбранную область неба в режиме дрейфа (без наведения, антенна телескопа неподвижна, центрирована в меридиане). В ближайшем будущем в этот режим будет дополнительно включен оптический телескоп, работающий синхронно с радиотелескопом. Основная идея этого режима заключается в поиске и изучении транзитных радиособытий одновременно в радио- и оптическом диапазонах длин волн.





**Рис. 2.** Оптические кривые блеска, полученные на ММТ-9 (каналы с временным разрешением 1 с и 5 с), а также на двух роботизированных телескопах: D50 (экспозиция 10 с) и FRAME-ORM (экспозиция 20 с). Серой сплошной линией показана кривая гамма-излучения, полученная с помощью инструмента Swift-BAT. На нижней панели приведены отклонения потока по измерениям на ММТ-9 от гладкой кривой, интерполированной по точкам D50, для выявления возможной тонкой временной структуры кривой блеска.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе мы приводим примеры недавних подтверждений детектирования исследуемых явлений и новые результаты, касающиеся транзиентов, переменных звезд и экзопланет, полученные с помощью средств наблюдения обзора EXPLANATION.

#### 3.1. Оптический «двойник» чрезвычайно яркого гамма-всплеска GRB 210619B

Оптическая вспышка, сопровождавшая гамма-всплеск GRB 210619B (D'Avanzo et al. 2021, Poolakkil et al. 2021, Svinikin et al. 2021, Zhao et al. 2021), была обнаружена в процессе автоматического мониторинга небесной сферы в июне 2021 года группой телескопов, включая ММТ-9. Оптический источник был зарегистрирован ММТ-9 спустя 55 секунд после того, как несколько космических телескопов одновременно наблюдали мощное гамма-излучение. После получения оповещения от GRB Coordinates Network с координатами

события система ММТ-9 перестроилась и нацелилась на область, где находился источник гамма-излучения. Наблюдения проводились синхронно в четырех каналах с временным разрешением 1, 5, 10 и 30 с в полосах *B*, *V* и в белом свете. Оптический транзиент достиг максимальной величины  $10^m 5$ , по наблюдениям на телескопах D50<sup>5</sup> и FRAME-ORM<sup>6</sup>, через 30 с после начала гамма-всплеска (см. рис. 2).

Прежде всего, мы должны заметить, что описанные выше наблюдения на ММТ-9 были вторым случаем, когда оптический компаньон гамма-всплеска был зарегистрирован с высоким временным разрешением до прекращения гамма-излучения. Такого рода наблюдения впервые

<sup>5</sup>D50 — 50-см телескоп, расположенный в обсерватории Ondřejov Астрономического Института Академии Наук Чехии (Jelinek et al. 2021, Nekola et al. 2010).

<sup>6</sup>FRAM-ORM — 25-см i/6.3 телескоп, который находится в Обсерватории del Roque de los Muchachos, Ла Пальма, Испания (Japeček et al. 2021).



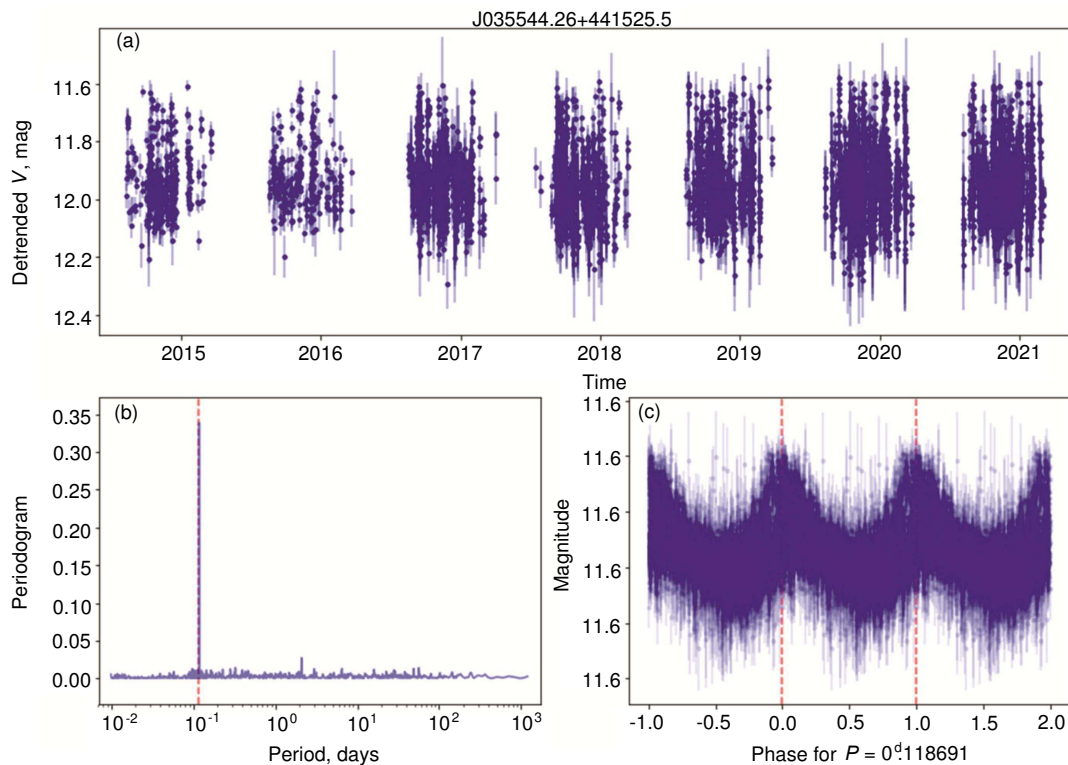


Рис. 3. Пример пульсирующей переменной из базы данных Mini-MegaTORTORA Sky Survey.

были осуществлены в нашем исследовании Naked Eye Burst (GRB 080319B) с помощью камеры TORTORA с временным разрешением 0.13 с (Beskin et al. 2010, Racusin et al. 2008). Высокое временное разрешение данных, полученных в ходе текущих наблюдений, позволило сравнить кривые блеска в оптическом и гамма-диапазонах. Поскольку оптические вариации определенно отсутствовали на временах секунды, а гамма-излучение состояло из ряда всплесков длительностью в несколько секунд, кванты разной энергии, вероятно, генерировались разными механизмами. Кроме того, наблюдения в трех спектральных диапазонах: в белом свете (D50 и FRAM-ORM) и в полосах  $B$ ,  $V$  (ММТ-9), позволили нам проследить эволюцию оптического спектра во время гамма-всплеска.

В итоге комбинированный анализ результатов наблюдений в оптической, гамма- и рентгеновской областях спектра (миссии Swift и Fermi) показал, что проявления обратной ударной волны, индуцированной в сильно намагниченной узкой струе, были впервые обнаружены в очень мощном всплеске с  $z = 1.937$ . Струя распространяется в локальной межзвездной среде довольно низкой плотности (около  $10^{-5} \text{ см}^{-3}$ ) (Oganessian et al. 2021).

### 3.2. Обнаружение переменных звезд

На рис. 3 приведен пример пульсирующей переменной, обнаруженной в Mini-MegaTORTORA Sky Survey. Панель (a) демонстрирует набор фотометрических данных J035544.26+441525.5 (ATO J058.9344+44.2570) из базы данных ММТ-9 в период с 2014 по 2021 гг. На нижних графиках, панели (b) и (c), приведены периодограмма и фазовая кривая изменения блеска звезды, свернутая с единственным обнаруженным периодом  $P = 0^d.118691$ . Звезда также была идентифицирована как переменная в базе данных АТО (Heinze et al. 2018). Она входит в число переменных, обнаруженных при проведении обзора ASAS-SN Университетом штата Огайо (Jayasinghe et al. 2020). В данной статье мы приводим этот результат для того, чтобы уточнить период переменности звезды и показать, что в обзорном режиме возможно обнаружение и исследование переменных звезд с блеском вплоть до  $12^m.5$  при точности фотометрии около  $0^m.03$ . Эти ограничения делают ММТ-9 эффективным инструментом при наблюдениях быстрых переходных событий микролинзирования и глубоких транзитов экзопланет в карликовых звездах. В контексте изучения обычных транзитов или колебаний звезд с амплитудами менее  $0^m.01$  ММТ-9 не может быть использована. Однако ком-

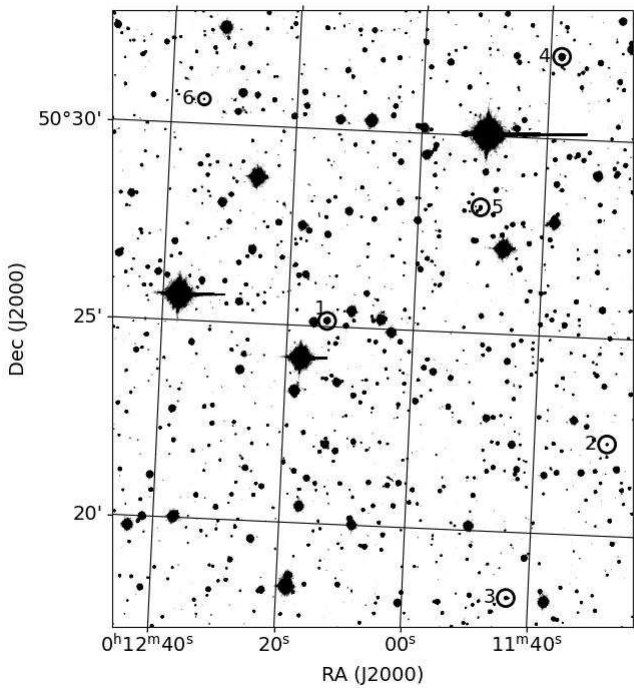


Рис. 4. Карта расположения обнаруженных переменных звезд.

бинация ММТ-9 с комплексом 0.5-м телескопов решает эту проблему.

Источник *Gaia* 395244159258089472 (#2 на рис. 4) — это объект, идентифицированный в *Gaia* как переменная неизвестной природы. Здесь мы впервые показываем вариации его потока, характер которых типичен для короткопериодических классических цефеид.

На рис. 4 и 5 приведены примеры еще шести переменных звезд, найденных с помощью комплекса 0.5-м телескопов примерно за десять ночей наблюдений. Координаты обнаруженных переменных (отмечены на рис. 4 кружками) приведены в таблице 1. Две из этих звезд были детектированы и в других обзорах. Четыре звезды — это новые переменные, обнаруженные на момент подготовки публикации только в нашем исследовании. Кривые блеска всех объектов с разрешением по фазе, их идентификационные номера в соответствии с *Gaia* и найденные периоды переменности потока проиллюстрированы на рис. 5 и подробно описаны ниже.

Источник *Gaia* 395234439752169344 (#1 на рис. 4). Это хорошо изученный WD 0009+501 (LHS 1038,  $V = 14^m4$ ) — магнитный белый карлик типа DA с известным периодом вращения (Valyavin et al. 2005) и очень слабыми вариациями блеска (Valeev et al. 2017, Valyavin et al. 2005), которые коррелируют с модулированными вращениями вариациями его наблюдаемого магнитного поля, их полумплитуда составляет около  $0^m004$ . Мы выбрали

Таблица 1. Координаты переменных звезд, обнаруженных с помощью сети 0.5-м телескопов проекта (см. рис. 4)

Star	RA (J2000)	Dec (J2000)
1	0 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> .9968	50°25'12"19
2	0 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 28 <sup>s</sup> .4584	50°22'19"73
3	0 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 43 <sup>s</sup> .4763	50°18'20"03
4	0 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 38 <sup>s</sup> .2537	50°32'05"37
5	0 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> .1695	50°28'11"53
6	0 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 34 <sup>s</sup> .8796	50°30'37"03

эту звезду для того, чтобы проверить характерную чувствительность наших 0.5-м телескопов при обнаружении слабых периодических изменений потока. Как следует из их фазовой кривой (рис. 5а), погрешности наблюдений в свернутых ячейках данных (бары ошибок на сегментах черной линии усредненных значений) обычно находятся в интервале от  $0^m0005$  до  $0^m001$ . В контексте поиска новых транзитных экзопланет этот результат позволяет обнаруживать планеты многих типов и разных радиусов, включая большие суперземли. Другие объекты — *Gaia* 395243716881546496 (#3 на рис. 4), *Gaia* 395252856571889280 и *Gaia* 395241513558355968 (#4 и #6 на рис. 4) — являются новыми переменными неизвестной природы. Судя по кривой блеска (см. рис. 5е), *Gaia* 395246534380053760 (#5 на рис. 4) может быть затменной типа Алголя. Мы предлагаем заинтересованным читателям выполнить собственные исследования этих объектов.

### 3.3. Поиск кандидатов в экзопланеты

К результатам поиска и изучения нестационарных явлений в рамках проекта также можно отнести первые обнаружения транзитов новых кандидатов в экзопланеты. На момент написания этой статьи насчитывалось уже около дюжины таких кандидатов, найденных в ходе выполнения проекта. Эти данные будут опубликованы после их проверки с помощью 1–2-м и 6-м телескопов. Здесь мы ограничимся демонстрацией только одного из них.

На рис. 6 и 7 показаны идентификационная карта и фазовая кривая периодического транзитного события для оранжевого/красного карлика 18-й звездной величины. Согласно показателю цвета  $B - V = 1^m26$ , что примерно соответствует эффективной температуре звезды около 4200 К и  $R_* = 0.56R_\odot$ , уменьшение яркости в белом свете во время транзита предполагает наличие экзопланеты массой  $1.83J_{\text{Ур}}$ . Между тем, мы еще раз

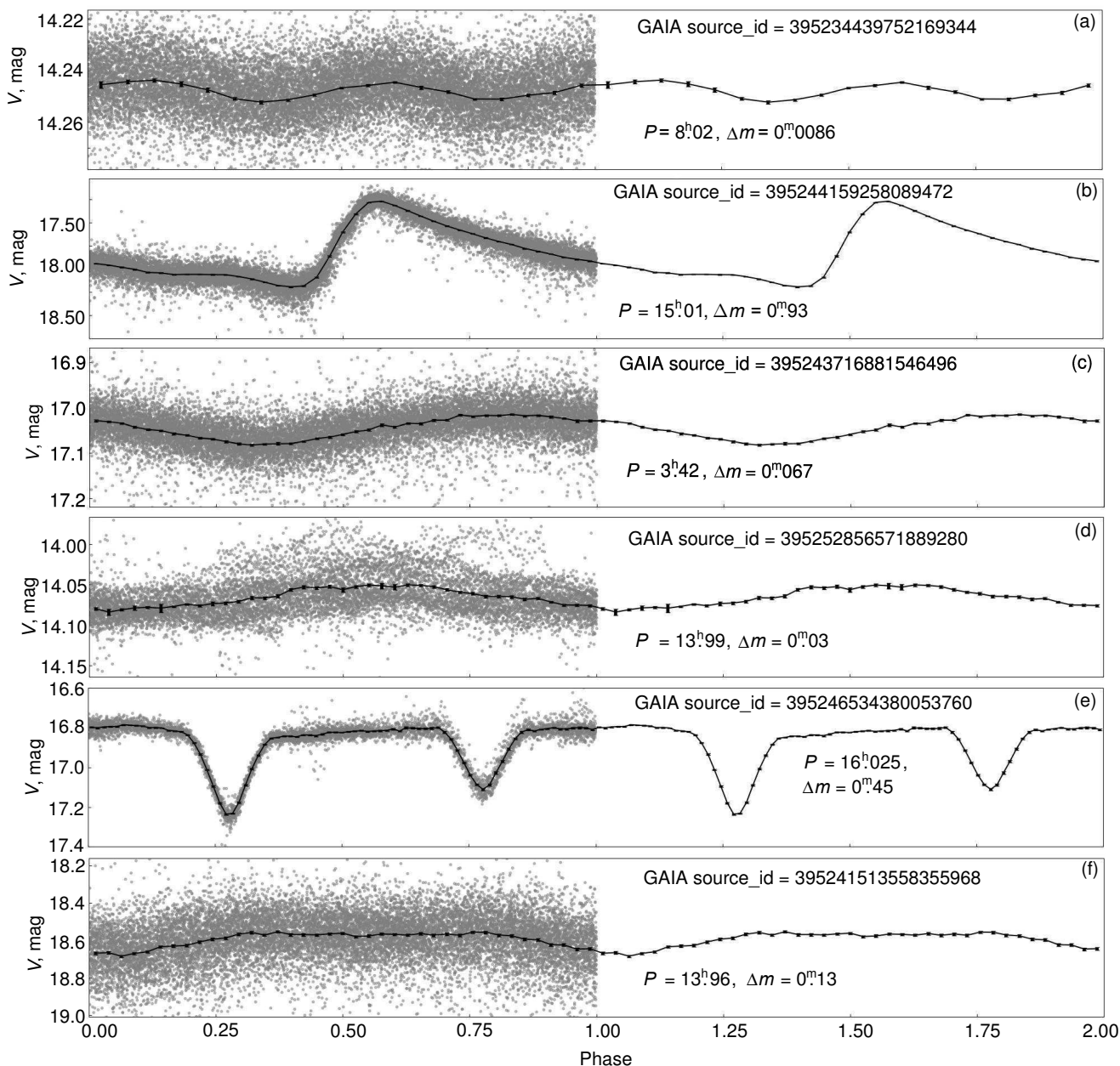


Рис. 5. Кривые блеска переменных звезд, обнаруженных с помощью комплекса 0.5-м телескопов.

отмечаем, что представленный результат пока еще не прошел проверку другими методами, поэтому его следует рассматривать только как предварительный.

#### 3.4. Спектроскопические наблюдения аномалии Росситера–Маклафлина у экзопланеты Kelt-2A

Kelt-2A имеет транзитную экзопланету, обнаруженную Beatty et al. (2012). Результатов более поздних фотометрических или высокоточных доплеровских наблюдений, включая измерения эффекта Росситера–Маклафлина (RM), нет. Вероятно, это объясняется довольно малой глубиной

транзита данного объекта, порядка 6 mmag, что затрудняет его отслеживание.

Мы наблюдали одиночный транзит Kelt-2A с помощью спектрографа БТА САО РАН (Valyavin et al. 2014; 2015; 2020) 1 января 2021 года. В общей сложности было выполнено 25 доплеровских измерений, однако на последнее повлияли облака, поэтому мы получили только 24 достоверные оценки. Эти данные выявили характерную форму RM-эффекта (рис. 8, верхняя панель). Однако при ближайшем рассмотрении оказалось, что продолжительность RM-эффекта значительно короче, чем продолжительность транзита, о ко-

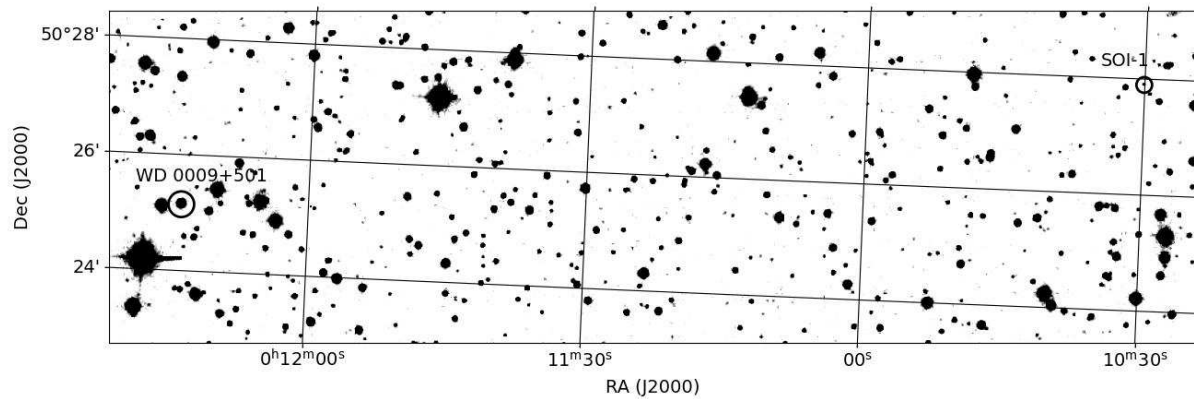


Рис. 6. Карта отождествления для кандидата в экзопланеты. SOI-1:  $\alpha = 0^{\text{h}}10^{\text{m}}30^{\text{s}}.0734$ ,  $\delta = 50^{\text{h}}27^{\text{m}}53^{\text{s}}.94$ ).

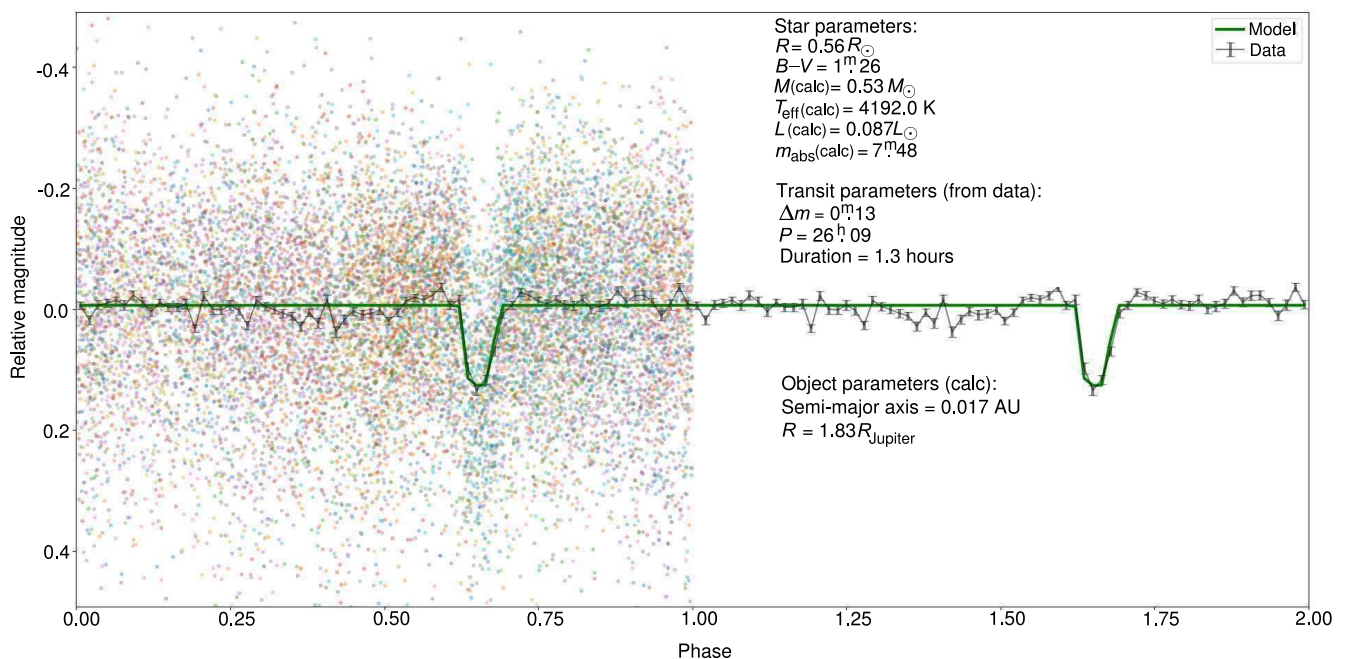


Рис. 7. Первый кандидат в экзопланеты, найденный с помощью комплекса 0.5-м телескопов.

торой сообщает Beatty et al. (2012), а именно: около 200 минут вместо ожидаемых 300. Такое большое расхождение парадоксально и не может быть объяснено доплеровской неопределенностью или неточностями закона потемнения к краю.

Первоначально мы предположили, что имел место дрейф плоскости орбиты планеты в течение примерно девяти лет, прошедших с момента открытия, например, из-за гравитационных возмущений от неизвестных тел в системе. Если бы орбита планеты сместилась от плоскости экватора звезды, параметр воздействия транзита мог бы тогда увеличиться, в то время как его продолжительность уменьшилась бы, что объяснило бы результаты наших доплеровских наблюдений. Для проверки

справедливости такой гипотезы мы начали активные наблюдения транзитов Kelt-2A в рамках всемирной сети EXPANSION (Sokov et al. 2018). На момент написания этой статьи наблюдательная кампания все еще продолжается, но, похоже, возможное уменьшение длительности транзита не подтверждается. Кривые блеска наилучшего качества согласуются с продолжительностью прохождения около 300 мин.

Наша вторая попытка состояла в том, чтобы описать RM-эффект обычной моделью с постоянной планетной орбитой, но предполагая, что значения лучевых скоростей могут содержать остаточные систематические вариации. Мы объединили результаты новых измерений, выполненных на



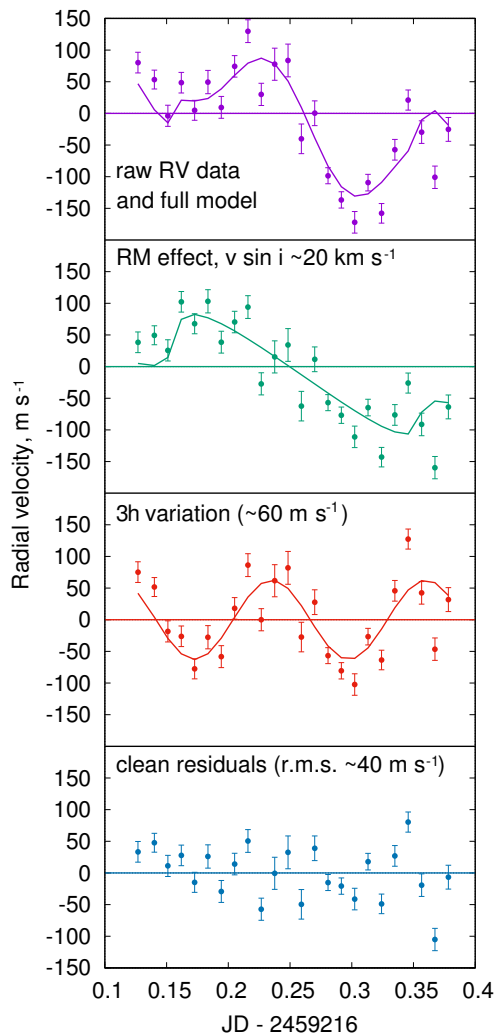


Рис. 8. Вариации лучевой скорости Kelt-2A, возникающие в результате эффекта Росситера–Маклафлина.

БТА, с ранее полученными величинами лучевых скоростей по оценкам Beatty et al. (2012) и с лучшими из имеющихся фотометрическими данными (Beatty et al. 2012 и новые кривые блеска транзитов проекта EXPANSION). Наилучшая самосогласованная подгонка «транзит + лучевая скорость» была сделана с применением программного обеспечения PlanetPack (Baluev 2013; 2018), в котором используются аналитические модели RM-эффекта из работы Baluev and Shaidulin, (2015). Затем мы исследовали возможные вариации невязок лучевых скоростей для наблюдений, выполненных на БТА.

Оказалось, что хорошее совпадение можно получить, используя комбинацию RM-эффекта и переменности, описываемой простой синусоидой (рис. 8). При наличии RM-эффекта  $v \sin i = 20 \pm 8 \text{ км с}^{-1}$ ; это согласуется с предварительными оценками по уширению спектральных

линий, что также соответствует выровненной орбитальной конфигурации, хотя угол наклона орбиты планеты к плоскости экватора звезды определяется с низкой точностью. Синусоидальное изменение имеет период 3 часа (фиксированный) и амплитуду  $63 \pm 13 \text{ м с}^{-1}$ , поэтому его величина становится сравнима с RM-эффектом. Невязки лучевых скоростей, получающиеся после вычитания нашей двухкомпонентной модели, не выявляют какой-либо еще переменности, их среднее арифметическое составляет около  $40 \text{ м с}^{-1}$ .

Предположительная трехчасовая вариация озадачивает, потому что мы не смогли определить ее возможный источник и до сих пор даже не уверены, относится ли она к инструментальным эффектам или представляет собой какое-то астрофизическое явление. Мы также рассмотрели в качестве вероятного объяснения аномальный закон потемнения к краю, который может проявляться в спектральных линиях, в основном предоставляющих доплеровскую информацию. Однако исследование Czesla et al. (2015) не подтверждает возможности таким образом объяснить столь сильное отклонение от модели. Заметим, что в нашем моделировании мы применили квадратичный закон потемнения к краю с коэффициентами, взятыми из Claret and Bloemen (2011), с последующей корректировкой небольшим эмпирическим отклонением из работы Baluev et al. (2019). Для нахождения RM-эффекта мы использовали болометрические версии коэффициентов.

Мы продолжаем наблюдения Kelt-2A, для того чтобы получить больше фотометрических и доплеровских данных, которые могли бы пролить свет на природу этого интригующего объекта.

### 3.5. Поиск оптических вспышек у источника повторяющихся быстрых радиовсплесков FRB 121112 в радиоспокойном состоянии

В январе 2020 года мы провели серию оптических наблюдений на 6-м телескопе с микросекундным временным разрешением области локализации FRB 121102 — источника периодически повторяющихся быстрых радиовсплесков (Nicastro et al. 2021), — по поиску его оптических вспышек миллисекундной длительности близкой к таковой у радиовсплесков. Наблюдения охватывали промежутки в 5 часов, когда источник находился в радиоспокойном состоянии, и были выполнены с помощью многоканального панорамного фотопляриметра MPPP (Plokhhotnichenko et al. 2021) в панорамном режиме при использовании двух каналов с чувствительностью в красном ( $5600 \text{ \AA}$ ) и синем ( $4200 \text{ \AA}$ ) диапазонах длин волн соответственно. Во время наблюдений зафиксировались

Таблица 2. Наблюдения на MPPP источника быстрых радиовсплесков FRB 121112 в радиоспокойном состоянии

Дата	UT	$T_{\text{exp}}$ , с	Верхний предел, мЯн с <sup>-1</sup>	
			«красный» канал	«синий» канал
3 января 2020 г.	00:37:23	2402	32.18	24.37
3 января 2020 г.	01:17:29	2396	24.62	31.90
3 января 2020 г.	01:57:27	731	31.05	37.93
3 января 2020 г.	18:49:51	1839	43.85	44.12
3 января 2020 г.	19:20:35	1982	45.78	30.71
3 января 2020 г.	19:57:51	1897	72.38	24.32
3 января 2020 г.	20:29:33	1328	40.38	43.73
3 января 2020 г.	20:51:43	1830	34.33	39.64
5 января 2020 г.	00:02:31	1802	40.25	24.13
5 января 2020 г.	00:32:37	1658	45.09	29.53

координаты и время прихода всех оптических фотонов в области 1' вокруг источника. Затем мы выполнили слепой поиск стохастических вспышек в пределах апертуры 5", центрированной на позицию источника, с эффективным временным разрешением порядка миллисекунд, соответствующим характерной продолжительности радиовспышек от FRB 121102 (Nicastro et al. 2021). Для калибровки потока мы использовали ближайшую звезду — Gaia DR2 3449068234312862336. Мы не обнаружили каких-либо значимых вспышек с амплитудами, превышающими ожидаемые из чисто пуассоновской статистики фотонов с уровнем значимости 1%. Детали наблюдений и результаты приведены в таблице 2.

Таким образом, характерные верхние пределы мгновенной яркости, полученные по нашим наблюдениям, составляют около 30–40 мЯн в обоих диапазонах длин волн по отдельности (20–25 мЯн — при рассмотрении каналов в сумме) на временном масштабе 1 миллисекунда, что в несколько раз лучше пределов, полученных Hardy et al. (2017) и сопоставимо с пределом по данным MAGIC Collaboration (2018). Мы планируем провести одновременные оптические и радионаблюдения FRB 121112.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы кратко описали новый совместный российско-корейский проект EXPLANATION, его цели, философию, инструментальную базу и представили первые результаты. В основном проект состоит из двух больших блоков: телескопов для

радио- и фотометрических обзоров и группы наблюдательных средств и методов для детального изучения объектов, обнаруженных в ходе обзоров. В отличие от второго блока, инструментарий для которого уже определен и в ближайшие десять лет его менять не планируется, фотометрическая составляющая обзорного блока заслуживает более подробного обсуждения.

Конфигурация фотометрических приборов, описанная в статье, будет доработана с целью создания более полной сети телескопов с малыми и средними апертурами. В связи с этим мы хотели бы озвучить здесь одну из идей по обновлению приборной базы. Идея уже была представлена некоторыми авторами этой статьи (Beskin et al. 2013) в рамках фотометрического проекта SAINT.

Автоматизированная сеть телескопов SAINT (Small Aperture Imaging Network Telescope) станет естественным расширением концепции многоканальных систем мониторинга с высоким временным разрешением (Beskin et al. 2013). Инструмент предназначен для обнаружения и изучения быстрых транзиентных событий и объектов, в том числе искусственного (внеземного) происхождения. Основным режимом наблюдения является широкополосный оптический мониторинг небесной сферы с высоким временным разрешением.

Предполагается, что SAINT будет состоять из нескольких десятков–сотен небольших телескопов диаметром от 30 до 100 см и полем зрения каждого телескопа около 2–5 ° (100–2500 ° в целом) и временным разрешением 0.05–0.1 с. Каждый телескоп оснащается набором фотометрических и

поляризационных фильтров, а также диспергирующим устройством низкого спектрального разрешения, и размещен на высокоскоростной экваториальной монтировке. В качестве детектора должна использоваться широкоформатная матрица типа EMCCD или CMOS с низким уровнем шума и высокой скоростью считывания (более 10 кадров в секунду). Скорость считывания может быть увеличена за счет уменьшения размера кадра. В режиме мониторинга телескоп накапливает данные обо всех стационарных и транзиентных (во времени и пространстве) источниках оптического излучения, локализованных в области 25–100% небесной полусферы ( $20\,000 \square^\circ$ ) до величин  $20^m$ – $22^m$  за одну ночь наблюдений. Каждое поле размером 100–2500  $\square^\circ$  просматривается один раз за ночь в течение получаса.

При начальной экспозиции 0.1 с каждый кадр сравнивается в реальном времени со средним значением из набора 10–100 предыдущих кадров, что позволяет выделить новые (транзиентные) события, определить их яркость и за десятые доли секунды классифицировать их, в частности, как спутники, метеоры, стационарные явления или шум. При обнаружении стационарного (длящегося по крайней мере десятые доли секунды) оптического транзиента все телескопы сети перенаводятся на область его обнаружения для детального исследования (поляризационного, фотометрического, спектрального) за время от секунд до десятков секунд. Режим исследования, а также временное разрешение выбираются в зависимости от типа источника и его величины. Разные телескопы могут работать в различных режимах. В этом (исследовательском) режиме SAINT эквивалентен телескопу диаметром в несколько метров и может использоваться для выполнения всех стандартных астрофизических задач.

Процедуры накопления, обработки в реальном времени и архивации данных работают в автоматическом режиме, как и вся сеть. По сути, SAINT — это интеллектуальная автономная система, способная выбирать режимы исследования и изменять их стратегию на основе полученных данных. Главная цель мониторинга — обнаружение новых и изучение уже известных нестационарных объектов различной природы и разной локализации. Впервые в истории можно будет получить постоянно обновляющуюся динамическую картину как ближнего, так и дальнего космоса с временным разрешением лучше секунды.

Описанная выше группа телескопов диаметром 50 см является в некотором смысле прототипом сети SAINT, так же, как и система Мини-МегаТОРТОРА. Практический опыт, полученный

при наблюдениях с помощью этих приборов, естественно, будет использован при разработке комплекса SAINT. Отметим, что работа SAINT может стартовать с запуска небольшого количества каналов (6–12), число которых будет постепенно увеличиваться в зависимости от размеров финансирования. Минимальная конфигурация может состоять из шести телескопов, которые будут установлены в течение нескольких лет.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Проект был поддержан Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2020-780.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al., *Physical Review Lett.* **116**, id. 241103 (2016).
2. P. D'Avanzo, M. G. Bernardini, A. Y. Lien, et al., *GRB Coordinates Network, Circular Service*, No. 30261 (2021).
3. A. Baglin, M. Auvergne, P. Barge, et al., *AIP Conf. Proc.* **895**, 201 (2007).
4. R. V. Baluev, *Astronomy and Computing* **2**, 18 (2013).
5. R. V. Baluev, *Astronomy and Computing* **25**, 221 (2018).
6. R. V. Baluev, E. N. Sokov, H. R. A. Jones, et al. *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **490**, 1294 (2019).
7. R. V. Baluev and V. S. Shaidulin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **454**, 4379 (2015).
8. T. G. Beatty, J. Pepper, R. J. Siverd, et al., *Astrophys. J.* **756**, article id. L39 (2012).
9. G. Beskin, V. Bad'in, A. Biryukov, et al., *Il Nuovo Cimento C* **28** (4), 751 (2005).
10. G. Beskin, S. Bondar, S. Karpov, et al., *Advances in Astronomy*, **2010**, article id. 171569 (2010).
11. G. Beskin, S. Karpov, S. Bondar, et al., *Astrophys. J.* **719**, L10 (2010).
12. G. M. Beskin, S. V. Karpov, A. V. Biryukov, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 81 (2017).
13. G. M. Beskin, S. V. Karpov, V. L. Plokhotnichenko, et al., *Physics Uspekhi* **56**, 836 (2013).
14. H. Bondi, *Quarterly J. Royal Astron. Soc.*, **11**, 443 (1970).
15. A. Y. Burdanov, P. Benni, V. V. Krushinsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **461**, 3854 (2016).
16. S. H. C. Cabot, A. Bello-Arufe, J. M. Mendonça, et al., *Astron. J.* **162**, id. 218, (2021).
17. A. Claret and S. Bloemen, *Astron. and Astrophys.* **529**, id. A75 (2011).



18. S. Czesla, T. Klocová, S. Khalafinejad, et al., *Astron. and Astrophys.* **582**, id. A51 (2015).
19. H. Dekker, S. D'Odorico, A. Kaufer, et al., *SPIE Conf. Proc.* **4008**, 534 (2000).
20. A. Dupree, in *Proc. Joint Fall 2009 Meet. of the New England Section of the APS and AAPT, Durham, USA, 2009*, abstract id. F1.002 (2009).
21. I. Han, K.-M. Kim, B.-Ch. Lee, and G. Valyavin, *Publ. Korean Astron. Soc.* **22**, 75 (2007).
22. I. Han, G. Valyavin, G. Galazutdinov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479**, 1427 (2018).
23. L. K. Hardy, V. S. Dhillon, L. G. Spitler, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472**, 2800 (2017).
24. A. N. Heinze, J. L. Tonry, L. Denneau, et al., *Astron. J.* **156**, article id. 241 (2018).
25. A. M. Heras, H. Rauer, C. Aerts, et al., in *Proc. 14th Europlanet Science Congress 2020*, <https://www.epsc2020.eu/> (2020).
26. P. Janeček, J. Ebr, J. Juryšek, et al. in *Proc. EPJ Web Conf. on Atmospheric Monitoring for High Energy Astroparticle Detectors, Anacapri, Italy, 2018*, Ed. by L. Valore, R. Colalillo, F. Guarino, **197**, id. 02008 (2019).
27. T. Jayasinghe, K. Z. Stanek, C. S. Kochanek, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (3), 4186 (2020).
28. M. Jelinek, J. Strobl, R. Hudec, et al., *GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30263* (2021).
29. D.-I. Kang, H.-S. Park, I. Han, et al., *Publ. Korean Astron. Soc.* **20**, 97 (2005).
30. D.-I. Kang, H.-S. Park, I. Han, et al., *Publ. Korean Astron. Soc.* **21**, 101 (2006).
31. S. Karpov, N. Orekhova, G. Beskin, et al., *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)* **48**, 97 (2016a).
32. S. Karpov, E. Katkova, G. Beskin, et al., *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)* **48**, 112 (2016b).
33. S. Karpov, G. Beskin, A. Biryukov, et al., *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)* **51**, 30 (2019).
34. K.-M. Kim, I. Han, G. Valyavin, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **119**, 1052 (2007).
35. B.-Ch. Lee, D. Gadelshin, I. Han, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **473**, L41 (2018).
36. MAGIC Collab., V. A. Acciari, S. Ansoldi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **481**, 2479 (2018).
37. A. F. Maksimov, Y. Y. Balega, V. V. Dyachenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **64**, 296 (2009).
38. T. Mufakharov, A. Mikhailov, Yu. Sotnikova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **503**, 4662 (2021).
39. A. E. Nadjip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 349 (2017).
40. M. Nekola, R. Hudec, M. Jelinek, et al., *Experimental Astronomy*, **28** (1), 79 (2010).
41. L. Nicastro, C. Guidorzi, E. Palazzi, et al., *Universe*, **7**, 76 (2021).
42. G. Oganessian, S. Karpov, M. Jelínek, et al., eprint arXiv:2109.00010 (2021).
43. S. Poolakkil, C. Meegan, and Fermi GBM Team, *GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30279* (2021).
44. S. A. Potanin, I. A. Gorbunov, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Reports* **61**, 715 (2017).
45. V. L. Plokhotnichenko, G. M. Beskin, V. G. de Boer, et al., *Astrophysical Bulletin* **76**, 472 (2021).
46. J. L. Racusin, S. V. Karpov, M. Sokolowski, et al., *Nature*, **455**, 183 (2008).
47. M. Sachkov, A. I. Gómez de Castro, and B. Shustov, *SPIE Conf. Proc.* **11444**, id. 1144473 (2020).
48. B. S. Safonov, P. A. Lysenko, and A. V. Dodin, *Astronomy Letters* **43**, 344 (2017).
49. E. N. Sokov, I. A. Sokova, V. V. Dyachenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **480**, 291 (2018).
50. R. A. Street, D. L. Pollaco, A. Fitzsimmons, et al., *ASP Conf. Ser.* **294**, 405 (2003).
51. D. Svinkin, S. Golenetskii, D. Frederiks, et al., *GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30276* (2021).
52. D. Thornton, B. Stappers, M. Bailes, et al., *Science* **341**, 53 (2013).
53. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 44 (2017).
54. J. A. Valenti, R. P. Butler, and G. W. Marcy, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 966 (1995).
55. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).
56. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 305 (2015).
57. G. G. Valyavin, F. A. Musaev, A. V. Perkov, et al., *Astrophysical Bulletin* **75**, 191 (2020).
58. G. G. Valyavin, S. Bagnulo, D. Monin, et al., *Astron. and Astrophys.* **439**, 1099 (2005).
59. G. Valyavin, K. Antonyuk, S. Plachinda, et al., *Astrophys. J.* **734**, article id. 17 (2011).
60. G. G. Valyavin, D. R. Gadelshin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **73**, 225 (2018).
61. B.-B. Zhang, B. Zhang, A. J. Castro-Tirado, et al., *Nature Astronomy* **2**, 69 (2018).
62. Y. Zhao, S. L. Xiong, Y. Huang, et al., *GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30264* (2021).

## EXPLANATION: Exoplanet and Transient Events Investigation Project

G. Valyavin<sup>1</sup>, G. Beskin<sup>1,2</sup>, A. Valeev<sup>1,3</sup>, G. Galazutdinov<sup>3,1</sup>, S. Fabrika<sup>1</sup>, V. Aitov<sup>1</sup>, O. Yakovlev<sup>4,1</sup>, A. Ivanova<sup>4</sup>, R. Baluev<sup>5</sup>, V. Vlasyuk<sup>1</sup>, Inwoo Han<sup>6</sup>, S. Karpov<sup>7,1,2</sup>, V. Sasyuk<sup>2</sup>, A. Perkov<sup>8</sup>, S. Bondar<sup>†8</sup>, F. Musaev<sup>†1</sup>, E. Emelianov<sup>1</sup>, T. Fatkhullin<sup>1</sup>, S. Drabek<sup>1</sup>, V. Shergin<sup>1</sup>, Byeong-Cheol Lee<sup>6</sup>, G. Mitiani<sup>1</sup>, T. Burlakova<sup>1,3</sup>, M. Yushkin<sup>1</sup>, E. Sendzikas<sup>1</sup>, D. Gadelshin<sup>1</sup>, L. Chmyreva<sup>1</sup>, A. Beskakotov<sup>1,5</sup>, V. Dyachenko<sup>1</sup>, D. Rastegaev<sup>1</sup>, A. Mitrofanova<sup>1</sup>, I. Yakunin<sup>1,5</sup>, K. Antonyuk<sup>3</sup>, V. Plokhhotnichenko<sup>1</sup>, A. Gutaev<sup>1</sup>, N. Lyapsina<sup>1</sup>, V. Chernenkov<sup>1</sup>, A. Biryukov<sup>2,9</sup>, E. Ivanov<sup>1,8</sup>, A. Belinsky<sup>9</sup>, E. Sokov<sup>10,5</sup>, A. Tavrov<sup>4</sup>, O. Korablev<sup>4</sup>, Myeong-Gu Park<sup>11</sup>, V. Stolyarov<sup>1,12</sup>, V. Bychkov<sup>1</sup>, S. Gorda<sup>13</sup>, A. Popov<sup>13</sup>, and A. Sobolev<sup>13</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

<sup>3</sup>Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

<sup>4</sup>Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

<sup>5</sup>St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia

<sup>6</sup>Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Republic of Korea

<sup>7</sup>Central European Institute for Cosmology and Fundamental Physics, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague, 18221 Czech Republic

<sup>8</sup>Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Moscow, 111024 Russia

<sup>9</sup>Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

<sup>10</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

<sup>11</sup>Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea

<sup>12</sup>Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB3 0HE, UK

<sup>13</sup>Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, 620000 Russia

We present a brief description of a joint Russian-Korean project abbreviated as EXPLANATION (EXoPLANet And Transient events InvestigatiON). The project is aimed at a massive photometric, speckle-interferometric, spectral, and radio bolometric search for non-stationary events in the Universe, as well as the study of exoplanets. The core of the project consists of several 0.07–2.5-m optical telescopes, 6-m telescope BTA and a six-hundred-meter radio telescope RATAN-600 of the Special Astrophysical Observatory of RAS (Russia), Moscow State University observatory (Russia), Kourovka Observatory (Russia), Crimean Astrophysical Observatory (Crimea), Korea Astronomy and Space Science Institute (Republic of Korea). We discuss the philosophy of the project and its instrumentation, as well as the first obtained results. In this paper we report the results related to the detection of several types of transient events and the study of exoplanets.

Keywords: *techniques: photometric—techniques: spectroscopic—telescopes—stars: planetary systems—transients*