

Наблюдения астрофизических транзиентов и транзитов экзопланет на малых телескопах ИНАСАН и система их автоматического планирования

А.Н. Тарасенков^{1,2,*}

¹Институт астрономии Российской академии наук
Россия, 119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 48

²Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга
Россия, 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13

(Поступила в редакцию 31.05.2025; после доработки 01.10.2025; подписана в печать 18.03.2026)

В Институте астрономии РАН создается сеть роботизированных телескопов небольшого диаметра для исследования переменных звезд, опасных астероидов, космического мусора, экзопланет и астрофизических транзиентов. В настоящей работе описывается архитектура и принципы функционирования системы оперативного планирования фотометрических наблюдений на телескопах ИНАСАН. Приводится описание принципов построения базы данных объектов, методик приоритизации наблюдений объектов различных типов и расчета плана наблюдений. Также описываются результаты наблюдений астрофизических транзиентов различной природы и экзопланетных транзитов на малых телескопах ИНАСАН, полученные при помощи системы планирования наблюдений.

PACS: 95.75.Rs, 95.85.Kr, 95.55.Cs УДК: 520

Ключевые слова: планирование наблюдений, роботизированные телескопы, фотометрия, транзиенты, экзопланеты.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2620801](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2620801)

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря появлению матричных ПЗС-приемников излучения [1] и развитию технологий компьютерного управления, в конце XX века появилась возможность автоматизации астрономических инструментов [2]. Первый роботизированный телескоп был запущен в 1965 г. [3], и в 1990-е гг. уже функционировало большое число роботизированных инструментов, не нуждающихся в присутствии наблюдателя для работы [4]. Подобные телескопы могут эффективно применяться для широкого круга наблюдательных задач, таких как высокоточная фотометрия звезд [5, 6] или оперативные наблюдения за оптическим послесвечением гамма-всплесков [7, 8].

В России успешно работают несколько роботизированных обсерваторий. Одним из наиболее успешных проектов является сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ [9], функционирующая более 20 лет [12] и предназначенная для обнаружения различных астрофизических транзиентов [13, 14], наблюдений оптических двойников гамма-всплесков [15, 16], участия в многоволновых и многоканальных наблюдательных кампаниях [17–19], исследования опасных астероидов [20, 21] и других задач. В сети МАСТЕР используются идентичные сдвоенные 40-сантиметровые телескопы, установленные в нескольких локациях по всему миру и способные проводить наблюдения и их об-

работку в полностью автоматическом режиме [22, 23]. Несколько успешных проектов роботизированных телескопов реализовано в CAO РАН. Система Mini-MegaTORTORA [24, 25] позволяет проводить наблюдения сверхшироких площадок (100 и более квадратных градусов) с субсекундным временным разрешением. Она используется для наблюдений астрофизических транзиентов [29], метеоров [27, 28], ИСЗ [26] и переменных звезд [30, 31]. Дальнейшим развитием данной системы является проект широкопольной системы автоматического обзора неба SAINT [34]. Также в CAO РАН развернута система 50-сантиметровых автоматизированных телескопов, используемых для поиска экзопланет [32, 33]. Среди узкопольных инструментов стоит упомянуть RoboPhot [35, 58] — роботизированный 60-сантиметровый телескоп, оснащенный трехканальным фотометром для синхронной многоцветной фотометрии, установленный в Коуровской обсерватории.

1. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ ИНАСАН

С 2019 г. в ИНАСАН создается сеть роботизированных телескопов небольшого диаметра, способных выполнять наблюдения в удаленном и автоматическом режиме. Разработаны и установлены обзорные телескопы в Звенигородской обсерватории [36], на Терсколе [37, 38] и на Кубе (в составе Российско-Кубинской обсерватории) [39, 40]. Эти инструменты имеют небольшую апертуру (20–37 см) и большое поле зрения. Также введе-

* E-mail: tarasenkov@inasan.ru

ны в строй более крупные инструменты, созданные на основе 50-сантиметровых телескопов системы Ричи–Кретьена Astrosib RC500: телескоп на Терсколе [41] и 2 инструмента в новой Кисловодской обсерватории ИНАСАН — фотометрический комплекс для исследования экзопланет [42] и многофункциональный телескоп для Российско–Кубинской сети наблюдательных пунктов, оснащенный эшелле-спектрографом и фотометром [43]. Все телескопы оборудованы идентичным комплексом управляющих программ для выполнения фотометрических наблюдений. Система управления позволяет отслеживать погодные условия и качество изображения, принимать сообщения об алертах и выполнять наблюдения объектов по заранее заданному плану. Система управления способна собирать основные погодные параметры (температура, влажность, наличие облачности, скорость и направление ветра) с метеопоста обсерватории и прерывать выполнение наблюдений, закрывая купол, в случае наступления непригодных для наблюдений погодных условий (повышение влажности до 100%, сплошная облачность, дождь, сильный ветер) или отказе критических узлов телескопа. Поскольку программа управления работает локально на каждом из серверов телескопов, то она способна управлять наблюдениями даже без выхода в интернет, используя лишь данные о состоянии телескопа и метеоданные из локальной сети (каждая из обсерваторий ИНАСАН оснащена коммерческой метеостанцией и All-sky камерой). Качество изображений отслеживается по нескольким последним кадрам методом бегущего среднего, и изменение FWHM из-за теплового дрейфа фокуса может компенсироваться изменением позиции фокусера в автоматическом режиме. Система управления формирует логи наблюдений во время каждого сеанса, что позволяет отследить результаты работы и ошибки. Автоматическое сохранение полученных кадров на серверах происходит в строго определенном порядке: для каждой даты создается отдельная папка, а внутри нее — папки для отдельных наблюдавшихся объектов. Названия кадров включают название объекта, фильтр и экспозицию. Краткое описание системы управления представлено в работах [37, 54, 55]. Автоматизация наблюдений позволяет решать большое количество задач наблюдательной астрономии, связанных с исследованиями переменных звезд различных типов, подтверждением транзитных экзопланет, оперативной классификацией галактических астрофизических транзиентов, наблюдением оптического послесвечения гамма-всплесков, наблюдениями сверхновых и рядом других направлений [44].

2. СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Существующая система управления имеет один существенный недостаток, затрудняющий оперативные наблюдения: план наблюдений должен

быть составлен вручную заранее перед загрузкой в систему. Из-за этого некоторые короткоживущие транзиенты могут быть пропущены, а распределение наблюдательного времени между разными задачами может быть неоптимальным. Для решения этой проблемы разработана система оперативного планирования наблюдений для использования на малых роботизированных телескопах ИНАСАН. Данная система позволяет автоматически готовить план наблюдений, учитывая условия наблюдения и приоритет программных объектов. Система состоит из трех основных узлов: базы банных объектов, набора программных инструментов для управления базой данных и планировщика наблюдений.

2.1. База данных

База данных содержит название и координаты объектов, их тип и приоритет, а также информацию о фильтрах, в которых необходимо производить наблюдения, и стратегии проведения наблюдений (длительность экспозиций, число кадров, время наблюдений), а также имя наблюдательной программы и комментарии. База данных находится на центральном сервере в ИНАСАН и может использоваться для планирования наблюдений для всех малых фотометрических телескопов. Объекты в базе данных разделены по четырем типам:

- «normal» — требуется получить определенное количество кадров объекта в определенных фотометрических полосах. Применяется для того, чтобы выполнять регулярные оценки блеска медленнопеременных объектов в разных полосах или проверять, произошло ли изменение блеска объекта;
- «monitor» — необходимо вести наблюдения объекта (в одной или в нескольких полосах) до его захода или до наступления сумерек. Используется для проведения фотометрического мониторинга быстропеременных объектов, если наблюдения не привязаны к определенному времени;
- «alert» — аналогично предыдущему режиму, но с менее жесткими ограничениями на минимальную высоту объекта и сумерки. Используется для наблюдений алертных объектов, например, астрофизических транзиентов;
- «transit» — для объектов, требующих начала и окончания наблюдений в определенные моменты времени, например при наблюдении транзитов экзопланет, затменных переменных звезд.

Помимо типа, каждый объект имеет приоритет от 1 до 3: 1 — наивысший, 3 — низший. Для объектов типа «normal» в базе также содержится число кадров в каждой полосе, а для объектов типа «transit» — время начала и конца наблюдений.

2.2. Заполнение объектами базы данных

Пополнение базы данных выполняется с помощью набора скриптов, исполняемых на центральном сервере ИНАСАН автоматически или вручную в зависимости от типов объектов и источника данных, которые они обрабатывают. Скрипты написаны на языке программирования *Python* с использованием библиотеки *sqlite3* и содержат специальные функции, которые извлекают данные об объектах и заполняют или обновляют все необходимые поля базы данных, получив имя объекта, его тип и приоритет, фильтры, в которых требуется наблюдать, и комментарии. Обращение к агрегаторам транзиентов (*Astro-COLIBRI* [56, 57], *СВАТ*) производится автоматически регулярно, подходящие транзиты экзопланет извлекаются по команде на заданную дату, программные объекты вносятся вручную передачей скрипту всех необходимых параметров. Данный набор инструментов обозначен как «Менеджер БД» на рис. 1.

2.2.1. Транзиты экзопланет

Для внесения в базу данных транзитов экзопланет по программе поддержки *TESS* [10] предусмотрен специальный инструмент, который автоматически выбирает транзиты, подходящие для наблюдения, и заносит их в базу данных. При обработке анализируется звездная величина звезды, глубина транзита, внутренний приоритет программы поддержки *TESS* (TFoP), учитываются требования к фильтрам и условиям наблюдения. Сначала с учетом географических координат обсерватории запрашивается список транзитов на заданную ночь с помощью инструмента *Тариг* [45]. Система *ЕхoСlock* [49] предлагает аналогичный *Тариг* инструмент подбора транзитов, предоставляющий идентичный набор параметров (координаты, звездная величина, моменты начала и конца транзита, глубина транзита). Затем производится фильтрация: с учетом зависимости надежно детектируемой глубины транзита от звездной величины звезды отбираются достаточно яркие цели с достаточно глубокими транзитами. Данная зависимость определена путем анализа проведенных наблюдений и представляет из себя кусочно-линейную функцию. В частности, для звезды $13^m.5$ минимальная глубина транзита, отбираемого алгоритмом, составляет 5 ppt, что позволяет детектировать транзит (среднеквадратичное отклонение остатков модели транзита для такой звезды составляет около 3.5 ppt [42], а рассчитываемые программой ошибки индивидуальных измерений блеска 2–3 ppt). Те объекты, которые нельзя наблюдать в течение минимум 45 мин до начала и после конца транзита (из-за сумерек или высоты), отбрасываются, поскольку нужно надежно определить уровень блеска звезды вне транзита. Хотя Луна не оказывает значительного влияния на фон

неба на угловых расстояниях более 40° [46], она может оказывать негативное влияние в случае особо прецизионной фотометрии, поэтому выбираются только объекты, которые находятся дальше определенного расстояния до Луны (25° при новолунии, 90° при полной Луне, зависимость минимального расстояния до Луны от ее фазы описывается линейным законом). Далее для транзитов, которые требуется наблюдать в тех фильтрах, которые установлены на 0.5-метровых телескопах (*UBVRI*), все необходимые параметры заносятся в базу данных. Данные ограничения жестко вшиты в код для автоматического отбора транзитов и основаны на опыте обработки фотометрических данных с телескопов ИНАСАН.

2.2.2. Астрофизические транзиенты и программные объекты

Также реализована возможность добавлять объекты вручную и из специализированных каталогов транзиентов. При ручном добавлении объекта есть возможность извлечь его координаты и блеск из базы *SIMBAD* [47] или ввести вручную при запуске соответствующего скрипта в случае отсутствия в базе *SIMBAD*. Ручной режим добавления объектов применяется к большинству программных объектов, которые наблюдаются по заявкам. Это позволяет задать набор фильтров, количество экспозиций и длительность сеанса наблюдений в соответствии с требованиями заявителя. Добавление транзиентных объектов (в первую очередь различных галактических транзиентов — вспышек карликовых новых, симбиотических систем, полярных, новых, микрокварзов и т.д.) производится путем регулярного обращения к агрегаторам транзиентов (*Astro-COLIBRI*, *СВАТ*) в автоматическом режиме. Извлечение объектов производится либо парсингом страницы, либо подключением к серверам, дающим машиночитаемые списки транзиентов. Далее производится отбор объектов ярче определенного порога (обычно это 17^m для катаклизмических переменных) и их занесение в базу данных. Быстрые транзиенты, например оптические послесвечения гамма-всплесков, в базу данных не попадают — они передаются напрямую на телескопы менеджера алертного режима.

Экспозиция вычисляется при внесении в базу данных встроенным калькулятором экспозиций на основе эмпирических зависимостей количества отсчетов на матрице от блеска объекта и длительности экспозиции. Для расчета зависимостей был использован набор *UBVRI*-кадров стандартных площадок в скоплении *M67*, снятых вблизи верхней кульминации с различными экспозициями в хороших погодных условиях (*FWHM* $1''$, слабый ветер, отсутствие облачности и аэрозоля). На основе этих кадров получались зависимости экспозиции от звездной величины объекта в разных фильтрах при условии, что объект должен иметь 20000–40000 от-

счетов на кадре для получения оптимального SNR и минимизации случайного перекопления. Поскольку система управления телескопом автоматически регулирует фокус так, чтобы объект имел FWHM 1–1.5", перекопление из-за резкого улучшения качества изображений практически невозможно.

2.3. Планирование наблюдений

Алгоритм планирования извлекает из базы данных объекты, начиная с высшего приоритета, и заканчивая низшим. При планировании наблюдений для каждого объекта рассчитывается его «мгновенный вес» с учетом его первичного приоритета в базе данных, высоты над горизонтом и типа объекта. Последовательность извлечения на одном уровне приоритета: «alert», «transit», «normal», «monitor» — продиктована спецификой научных задач, поставленных перед телескопами. В окончательный план отправляется объект, имеющий наивысший вычисленный «мгновенный вес», после чего он помечается как наблюдаемый. Планирование происходит последовательно: веса объектов рассчитываются для моментов времени окончания наблюдений предыдущего объекта. При расчете плана учитывается мертвое время телескопа и время на наведение и привязку системы координат. В качестве времени начала наблюдений обычно выбирается момент наступления астрономических сумерек.

План представляет из себя последовательность заданий для телескопа, каждое из которых содержит имя объекта, его координаты, фильтры, в которых необходимо снимать, длительность и количество экспозиций. Также план содержит служебные задания (например, привязку координат). После выполнения задания производится перенаведение на координаты следующего задания или запускается алгоритм завершения наблюдений (если задание было последним). Последовательность команд для одного объекта обычно содержит несколько последовательных заданий (каждое на 10–30 мин), а также команд на привязку системы координат перед началом наблюдения объекта и каждые 1–2 ч во время его наблюдений. Такая схема позволяет эффективно бороться с ошибками ведения монтировки. План форматируется таким образом, чтобы он мог быть передан программе управления телескопом.

Все основные элементы системы планирования установлены на центральном сервере в ИНАСАН, и генерируемые ей планы наблюдений передаются на сервера всех телескопов. Поскольку локальные системы управления всех телескопов идентичны, то система планирования является универсальной, и различия между различными телескопами проявляются лишь при вычислении длительности экспозиции. Планирование осуществляется последовательно для всех доступных телескопов таким образом, чтобы наиболее приоритетные объекты были отправлены на наиболее мощные телескопы (два

полуметровых телескопа в Кисловодске и полуметровый телескоп на Терсколе), а менее крупные инструменты (0.2-метровый телескоп на Кубе, телескоп в Звенигородской обсерватории) нагружаются заданиями по остаточному принципу. Наблюдения транзитов экзопланет осуществляются на 0.5-м телескопах в Кисловодске и на Терсколе, которые имеют схожую чувствительность и оснащены фильтрами UBVR1.

Менеджер алертного режима для наблюдения быстрых транзиентных событий (гамма-всплески, нейтринные события, гравитационно-волновые события) не связан с основной системой планирования, работает на основном сервере независимо и соединяется с локальными системами управления телескопами напрямую. При его срабатывании задания на наблюдения срочного алерта добавляется в план после того задания, которое выполняется сейчас, а невыполненные задания системы планирования аннулируются. Принципиальная схема системы представлена на рис. 1.

В ходе выполнения плана наблюдений кадры сохраняются на серверах телескопов в строго структурированном порядке — они отсортированы по датам и объектам для удобства учета и последующей обработки. На утро после окончания наблюдений дежурный наблюдатель подключается к серверам телескопов и проверяет логи, полученные данные и возможные ошибки. Если объект не был снят по каким-либо причинам (ухудшение погоды, ошибка системы управления), то путем запуска специального скрипта он активируется в базе данных, чтобы планировщик мог дать команду на пересъемку. Также активируются объекты, которые требуют регулярных наблюдений. Кроме того, инструменты активации и деактивации объектов в базе данных позволяют отключить некоторые объекты, требующие хороших условий наблюдения, если прогноз неблагоприятный. Стоит отметить, что алгоритм планирования на данный момент не может учесть изменения качества изображения, и FWHM звезд на кадре регулируется локальными системами управления телескопов. Однако случаи, когда резкое ухудшение атмосферного качества изображений приводило к получению фотометрических данных неприемлемо низкого качества, крайне редки, что делает оправданным применение описанных выше алгоритмов планирования и организации наблюдений.

3. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием системы автоматического планирования наблюдений регулярно проводятся наблюдения по всем основным направлениям работы обсерваторий: наземная наблюдательная поддержка TESS, наблюдения катаклизмических переменных, сверхновых и других транзиентных объектов, исследование переменных звезд.

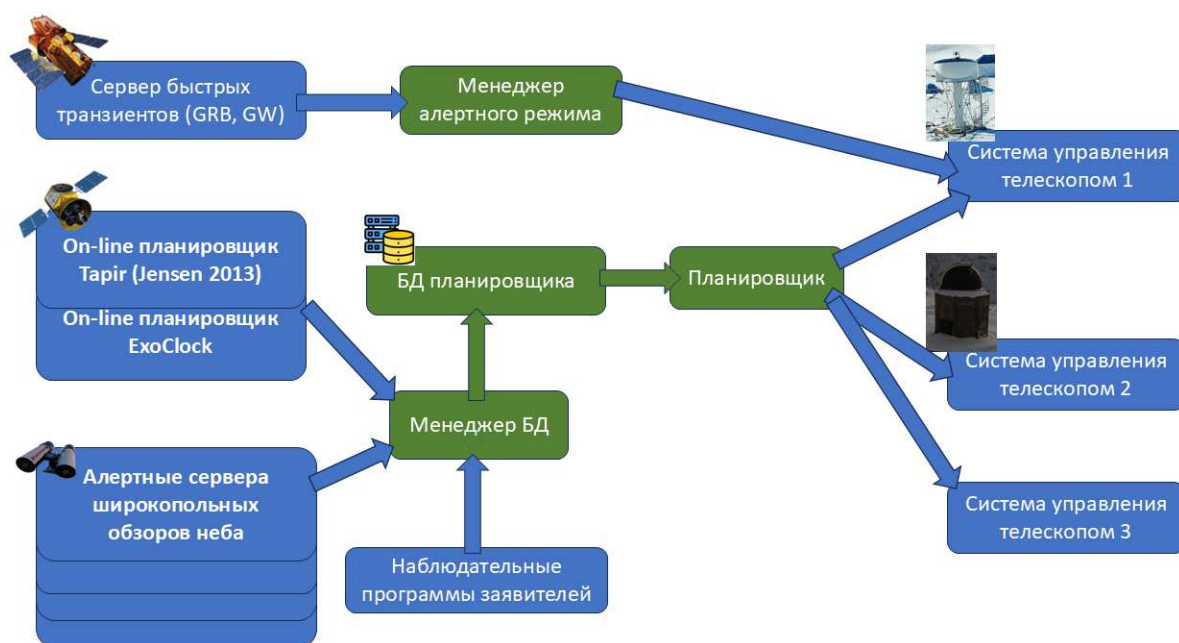


Рис. 1. Схема системы планирования. Зеленым обозначены элементы, находящиеся на центральном сервере

3.1. Наблюдения транзитов экзопланет

На телескопах ИНАСАН проводятся наблюдения транзитов экзопланет в рамках двух крупных международных проектов: программы поддержки TESS (TFoP [48]) и программы уточнения эфемерид EchoClock [49]. Возможности 0.5-метровых телескопов позволяют проводить фотометрию транзитов глубиной 0.5 – 1% у звезд 13–13.5^m с точностью 0.003–0.004^m в полосах *BVRI* [42], поэтому большинство целей из данных программ доступны для наблюдений. За время работы 0.5-метровых телескопов в Кисловодске (с осени 2023 г.) и на Терсколе было получено более 30 кривых блеска транзитов экзопланет, которые затем были отправлены в базы данных TFoP и EchoClock для последующего анализа. Пример кривой блеска транзита, полученной на телескопе в Кисловодске в рамках программы поддержки TESS, показан на рис. 2.

3.2. Наблюдения астрофизических транзитов

На телескопах ИНАСАН обрабатываются алгоритмы автоматических наблюдений галактических астрофизических транзитов с целью их классификации и исследования. В качестве пилотного проекта запущена программа фотометрической поддержки проекта New Milky Way (NMW Survey [50]). Проект NMW проводит обзор области диска Галактики с помощью сверхширокопольных камер малой апертуры и детектирует оптические транзиты ярче 14^m с помощью специ-

ального программного инструмента Vast [51]. Сообщения об обнаружении транзитов оперативно публикуются и рассылаются по обсерваториям. Телескопы ИНАСАН наблюдают эти объекты в алертном режиме, проводя длительный фотометрический мониторинг каждую ночь. Стратегия получения длинных непрерывных рядов наблюдений выбрана исходя из природы транзитов: многие из них являются вспышками карликовых новых и других тесных двойных систем с аккрецией, поэтому для их исследования важно зафиксировать их быструю переменность. В ходе программы исследована ранее неизвестная карликовая новая типа WZ Sge TCP J18173469+1803499, определен период сверхгорбов во время вспышки и их эволюция [52]. Благодаря наблюдениям на телескопах ИНАСАН также выяснена природа другого объекта — TCP J07222683+6220548, AM CVn-системы длительным вспышечным циклом, демонстрирующей повторные поярчания после основной вспышки [53].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана и испытана система оперативного планирования наблюдений для малых роботизированных телескопов ИНАСАН. Благодаря унификации программ управления она может применяться на всех малых роботизированных телескопах ИНАСАН. Испытания системы показали, что она позволяет увеличить время наблюдений на каждом телескопе в среднем на 20–40 мин за каждую наблюдательную ночь благодаря исключению субъ-

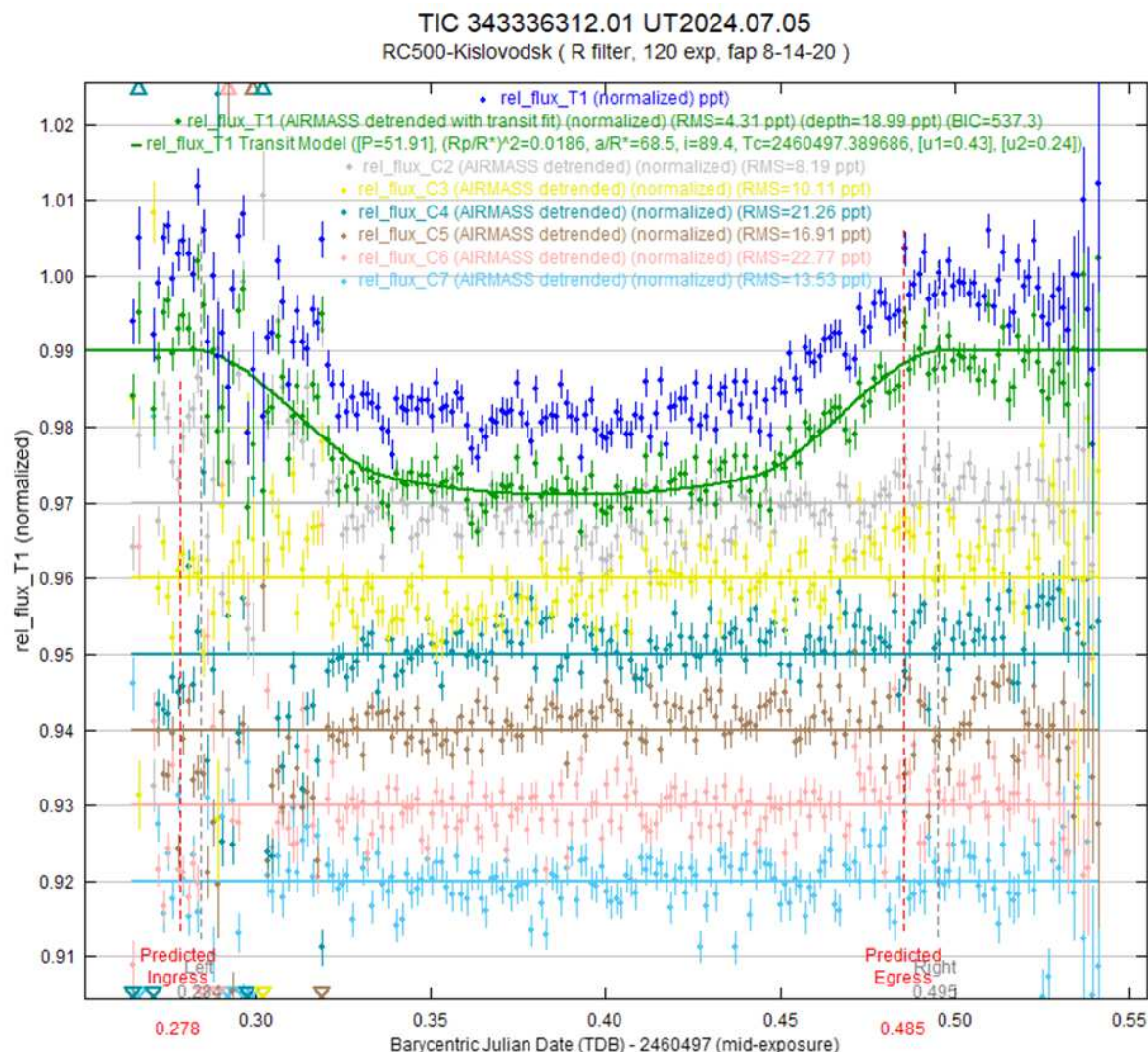


Рис. 2. Кривая блеска транзита так называемого «теплого юпитера» (орбитальный период около 52 сут.), полученная на телескопе Astrosib RC500 в Кисловодске (готовится к публикации в рамках программы TFoP). Синие точки — данные фотометрии, зеленая кривая — результат фитирования моделью. Также показаны кривые блеска звезд сравнения. Анализ фотометрии выполнен в программе AstroimageJ [11]

етивных ошибок расчета плана, а также оптимизировать порядок и продолжительность наблюдения объектов. Несмотря на малый размер апертур телескопов, автоматизация наблюдений позволяет применять их для решения таких важных задач современной астрофизики, как наблюдения транзитов экзопланет и астрофизических транзиентов. Подобная система имеет высокий потенциал интеграции в международные проекты и уже успешно работает в некоторых из них.

Автор выражает признательность В. Давыдову за ценные замечания и советы, К. Соколовскому, С. Короткому, А. Вольновой за помощь в организации совместных наблюдательных программ. Автор благодарит рецензента за внимательное прочтение

статьи и подробный отзыв, который помог улучшить статью.

А. Тарасенков выражает благодарность за поддержку Фонду развития теоретической физики и математики БАЗИС (проект 25-2-1-39-1). Работа выполнена на оборудовании, входящем в Центр коллективного пользования «Терскольская обсерватория» Института астрономии Российской академии наук. При подготовке статьи использовалась база данных NASA ADS. Данная работа не получала внешнего финансирования, была выполнена за счет средств госзадания ИНАСАН.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

[1] Boyle W., Smith G. // *Bell System Technical Journal*. **49**, 587 (1970).

[2] Baruch J.E.F. // *Vistas in Astronomy*. **35**, 399 (1992).

- [3] *Code A.D.* // *Robotic Telescopes in the 1990s, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, **103**, 3 (1992).
- [4] *Richmond M., Treffers R.R., Filippenko A.V.* // *PASP*. **105**, 1164 (1993).
- [5] *Young A.T., Genet R.M., Boyd L.J.* et al. // *PASP*. **103**, 221 (1991).
- [6] *Henry G.W., Fekel F.C., Hall D.S.* // *AJ*. **110**, 2926 (1995).
- [7] *Hudec R., Soldán J.* // *Ap&SS*. **231**, 311 (1995).
- [8] *Akerlof C., Ables E., Barthelmy S.* et al. // *Ap&SS*. **231**, 255 (1995).
- [9] *Lipunov V., Kornilov V., Gorbousov E.* et al. // *Advances in Astronomy*. **2010**, 349171 (2010).
- [10] *Ricker G.R., Winn J.N., Vanderspek R.* et al. // *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*. **1**, 014003 (2015).
- [11] *Collins K.A., Kielkopf J.F., Stassun K.G.* et al. // *AJ*. **153**, 77 (2017).
- [12] *Lipunov V.M., Krylov A.V., Kornilov V.G.* et al. // *Astronomische Nachrichten*. **325**, 580 (2004).
- [13] *Lipunov V.M., Kornilov V.G., Krylov A.V.* et al. // *Astronomy Reports*. **51**, 1004 (2007).
- [14] *Lipunov V.M., Balanutsa P.V., Pavlenko E.P.* 10.1134/S1063772925701318 et al. // *Astronomy Reports*. **68**, 1364 (2024).
- [15] *Tyurina N., Lipunov V., Kornilov V.* 10.1155/2010/763629 et al. // *Advances in Astronomy*. **2010**, 763629 (2010).
- [16] *Gorbousov E.S., Lipunova G.V., Lipunov V.M.* et al. // *MNRAS*. **421**, 1874 (2012).
- [17] *Lipunov V.M., Gorbousov E., Kuznetsov A.* et al. // *New Astronomy*. **72**, 42 (2019).
- [18] *Lipunov V.M., Kornilov V.G., Zhirkov K.* et al. // *Universe*. **8**, 271 (2022).
- [19] *Lipunov V., Kornilov V., Gorbousov E.* et al. // *Astronomy Reports*. **66**, 1118 (2022).
- [20] *Zimnukhov D.S., Lipunov V.M., Gorbousov E.S.* et al. // *Astronomy Reports*. **63**, 1056 (2019).
- [21] *Trunkovsky E.M., Gorbousov E.S., Denisenko D.V.* et al. // *AJ*. **151**, 72 (2016).
- [22] *Kornilov V.G., Lipunov V.M., Gorbousov E.S.* et al. // *Experimental Astronomy*. **33**, 173 (2012).
- [23] *Gorbousov E.S., Lipunov V.M., Kornilov V.G.* et al. // *Astronomy Reports*. **57**, 233 (2013).
- [24] *Biryukov A., Beskin G., Karpov S.* et al. // *Baltic Astronomy*. **24**, 100 (2015).
- [25] *Beskin G.M., Karpov S.V., Biryukov A.V.* et al. // *Astrophysical Bulletin*. **72**, 81 (2017).
- [26] *Katkova E.V., Beskin G.M., Bondar S.F.* et al. // *INASAN Science Reports*. **5**, 5 (2020).
- [27] *Usanin V.S., Nefedyev Yu.A., Sokolova M.G.* // *Astronomy Reports*. **63**, 666 (2019).
- [28] *Lyapsina N.V., Karpov S.V., Beskin G.M.* et al. // *INASAN Science Reports*. **7**, 119 (2022).
- [29] *Karpov S., Beskin G., Biryukov A.* et al. // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. **51**, 30 (2019).
- [30] *Savanov I.S., Karpov S.V., Beskin G.M.* et al. // *Astrophysical Bulletin*. **77**, 422 (2022).
- [31] *Savanov I.S., Dmitrienko E.S., Karpov S.V.* et al. // *Astrophysical Bulletin*. **78**, 194 (2023).
- [32] *Yakovlev O.Ya., Valeev A.F., Valyavin G.G.* et al. // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. **9**, 903429 (2022).
- [33] *Yakovlev O.Ya., Valeev A.F., Valyavin G.G.* et al. // *Astrophysical Bulletin*. **79**, 126 (2024).
- [34] *Beskin G., Biryukov A., Gutaev A.* et al. // *Photonics*. **10**, 1352 (2023).
- [35] *Potoskuev A.E., Busarev V.V., Krushinskii V.V.* et al. // *Solar System Research*. **54**, 449 (2020).
- [36] *Naroenkov S.A., Naliivkin M.A.* // *Stars and Satellites, Proceedings of the Memorial Conference Devoted to A.G. Masevich 100th Anniversary*, Pp. 339–344. (2018).
- [37] *Naroenkov S.A., Naliivkin M.A.* // *INASAN Science Reports*. **3**, 87 (2019).
- [38] *Naroenkov S., Naliivkin M.* // *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*, Pp. 161–163. (2020).
- [39] *Bisikalo D.V., Sachkov M.E., Ibrahimov M.A.* et al. // *Astronomy Reports*. **66**, 38 (2022).
- [40] *Naroenkov S.A., Savanov I.S., Sachkov M.E.* et al. // *Astronomy Reports*. **66**, 827 (2022).
- [41] *Tarasenkov A.N., Naroenkov S.A.* // *Peremennye Zvezdy*. **44**, 78 (2024).
- [42] *Naroenkov S.A., Tarasenkov A.N., Naliivkin M.A.* // *INASAN Science Reports*. **9**, 6 (2024).
- [43] *Ibrahimov M., Sachkov M., Naliivkin M.* et al. // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. **55**, 7 (2025).
- [44] *Savanov I.S., Petkov V.B., Beskin G.M.* et al. // *INASAN Science Reports*. **5**, 246 (2020).
- [45] *Jensen E.* // *Astrophysics Source Code Library, record ascl:1306.007* (2013).
- [46] *Komarova I.A., Tatarnikov A.M., Sharonova A.V.* et al. // *Astronomy Letters*. **50**, 638 (2024).
- [47] *Wenger M., Ochsenbein F., Egret D.* et al. // *A&AS*. **143**, 9 (2000).
- [48] *Collins K., Quinn S.N., Latham D.W.* et al. // *American Astronomical Society Meeting Abstracts #231*, **231**, 439.08 (2018).
- [49] *Kokori A., Tsiaras A., Edwards B.* et al. // *Experimental Astronomy*. **53**, 547 (2022).
- [50] *Sokolovsky K., Korotkiy S., Lebedev A.* // *Stellar Novae: Past and Future Decades, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. **490**, Pp. 395. (2014).
- [51] *Sokolovsky K.V., Lebedev A.A.* // *Astronomy and Computing*. **22**, 28 (2018).
- [52] *Tarasenkov A.N., Sokolovsky K.V., Korotkiy S.A.* et al. // *INASAN Science Reports*. **9**, 160 (2024).
- [53] *Tarasenkov A., Sokolovsky K., Dodin A.* et al. // *Research in Astronomy and Astrophysics*. **25**, 075017 (2025).
- [54] *Savanov I.S., Naroenkov S.A., Naliivkin M.A.* et al. // *Astrophysical Bulletin*. **73**, 344 (2018).
- [55] *Naroenkov S., Naliivkin M.* // *The Multi-Messenger Astronomy: Gamma-Ray Bursts, Search for Electromagnetic Counterparts to Neutrino Events and Gravitational Waves*, Pp. 148–152. (2019).
- [56] *Reichherzer P., Schüjssler F., Lefranc V.* et al. // *Astro-COLIBRI-The COincidence LIBrary for Real-time Inquiry for Multimessenger Astrophysics*. **256**, 5 (2021).
- [57] *Reichherzer P., Schüjssler F., Lefranc V.* et al. // *Galaxies*. **11**, 22 (2023).
- [58] *Chazov N.A., Tereshin D.D., Krushinsky V.V.* et al. // *Astrophysical Bulletin*. **80**, 479 (2025).

**Observations of astrophysical transients and exoplanet transits
with small telescopes of INASAN and the system
for their automatic planning**

A. N. Tarasenkov^{1,2}

¹*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences
Moscow 119017, Russia*

²*Sternberg State Institute of Astronomy Moscow State University. Moscow 119191, Russia
E-mail: tarasenkov@inasan.ru*

At the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences (INASAN), a network of small-diameter robotic telescopes is being created for the study of variable stars, hazardous asteroids, space debris, exoplanets, and astrophysical transients. The present paper outlines the architecture and principles of functioning the system for the operational planning of photometric observations with INASAN telescopes. It describes the principles of constructing an object database, methods for prioritising observations of objects of various types, and for calculating the observation plan. The observation results for astrophysical transients of various natures and those for exoplanetary transits with small INASAN telescopes, obtained using the observation planning system, are also described.

PACS: 95.75.Rs, 95.85.Kr, 95.55.Cs.

Keywords: observation planning, robotic telescopes, photometry, transients, exoplanets.

Received 31 May 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2026. 81, No. . Pp. .*

Сведения об авторе

Тарасенков Александр Николаевич — мл. науч. сотрудник ИНАСАН, вед. инженер ГАИШ МГУ; тел.: (495) 939-20-46, e-mail: tarasenkov@inasan.ru.