

Корнилов Матвей Викторович

**Оперативное планирование астрономических
наблюдений на основе информации
астроклиматического монитора
на примере 2.5 м телескопа**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре экспериментальной астрономии физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО)

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Корнилов Виктор Геральдович,
(Физический факультет ФГБОУ ВО МГУ
им.М.В.Ломоносова).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Бескин Григорий Меерович (ФГБУН Специа-
льная астрофизическая обсерватория РАН, группа
релятивистской астрофизики);
кандидат физико-математических наук,
Буренин Родион Анатольевич (ФГБУН Инсти-
тут космических исследований РАН, отдел аст-
рофизики высоких энергий).

Ведущая организация: ФГАОУ ВО Казанский (Приволжский) федераль-
ный университет

Защита состоится 15 декабря 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.86 при Государственном астрономическом институте имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова, расположенном по адресу: 119991, Москва, Университетский проспект, д. 13

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, Москва, Ломоносовский проспект, д. 27, Фундаментальная библиотека).

Автореферат разослан 13 октября 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

С.О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Задача автоматического оперативного планирования наземных оптических астрономических наблюдений в последнее время становится популярной и актуальной для многих астрономических обсерваторий [1–10]. Считается, что оперативное планирование — один из методов повышения эффективности использования наземного оптического телескопа. Причины того, что уделяется внимание повышению эффективности телескопов, по-видимому в том, что современный астрономический телескоп даже небольшого размера, скажем, диаметром больше двух метров, с экономической точки зрения достаточно затратный проект. Однако, данная область получила свое развитие только в последние десятилетия, с разработкой методов автоматического получения объективной оценки атмосферных условий и в данный момент находится на стадии роста и развития.

В контексте запуска 2.5 м телескопа новой астрономической обсерватории Московского университета, Кавказской горной обсерватории (КГО), подобные исследования, направленные как непосредственно на повышение эффективности телескопа, так и на развитие астроклиматических исследований, являющихся основой оперативного планирования, становятся еще более актуальными.

Цели и задачи работы. Целью данной работы является исследование вопросов оперативного планирования наземных оптических астрономических наблюдений как средства повышения эффективности наблюдений, а так же создание системы оперативного планирования для 2.5 м телескопа КГО. Для достижения поставленных целей были поставлены следующие задачи:

- Построение стохастической модели временной эволюции мощности атмосферной оптической турбулентности (ОТ) для прогнозирования её значения в течении ближайших нескольких часов на основе измерений прибора Multi-Aperture Scintillation Sensor/Differential Image Motion Monitor (MASS/DIMM) [11], проводимых астроклиматическим монитором в

реальном времени.

- Построение многополосной модели яркости ночного неба на основе статистических данных полученных астроклиматическим монитором и численного моделирования распространения лунного света в атмосфере и многополосной модели ослабления оптического излучения в атмосфере для вычисления коэффициентов экстинкции в стандартных фотометрических полосах видимого диапазона на основе измерений прибора MASS.
- Получение выражений для вычисления вероятности успешного выполнения задачи ПЗС-фотометрии при заданных опциональных ограничениях, выражаемых в терминах относительной фотометрической ошибки, времени экспозиции, интенсивности в центре функции рассеяния точки (ФРТ), полной ширины на половине максимума ФРТ, или радиуса круга включающего в себя заданную долю энергии.
- Формальное определение величин вероятности успешного выполнения наблюдательной задачи и последовательности задач, средней полной урожайности последовательности задач. В терминах этих величин должны быть сформулированы задачи дискретной оптимизации, решение которых рассматривается как процесс оперативного планирования. Реализация алгоритма решения этих задач.

Научная новизна.

- Впервые построена модель временной эволюции мощности оптической турбулентности на основе линейных моделей авторегрессии скользящего среднего при использовании нескольких десятков тысяч измерений полученных комбинированным прибором MASS/DIMM.
- Впервые на основе данных астроклиматического монитора КГО ГАИШ МГУ построены многополосные модели яркости ночного неба и ослабления излучения в атмосфере.

- Предложен и реализован новый метод оперативного планирования наземных оптических астрономических наблюдений на основе явного вероятностного подхода.

Практическая значимость.

- Алгоритмы восстановления вертикального профиля ОТ и разработанное автором программное обеспечение используются при работе с однотипными приборами MASS в различных зарубежных обсерваториях [12–14].
- Построенные модели окружения: эволюции мощности атмосферной ОТ, яркости ночного неба и ослабления излучения в атмосфере могут быть использованы при моделировании не только ПЗС-фотометра, но и другого навесного оборудования и при необходимости легко расширены.
- Разработанный вероятностный подход оперативного планирования наземных оптических астрономических наблюдений и реализованные алгоритмы могут быть использованы и на других обсерваториях, после замены рассмотренных моделей окружения моделями соответствующими конкретному месту и оборудованию обсерватории.

Положения, выносимые на защиту.

1. Модифицированы алгоритмы восстановления вертикальных распределений ОТ и скорости ветра и определения других параметров ОТ из измерений астроклиматического монитора с инструментом MASS/DIMM с целью получения актуальной информации для оперативного планирования наблюдений на 2.5 м телескопе. Алгоритмы верифицированы при обработке измерений кампании 2007–2013 гг.
2. На основе данных астроклиматического монитора КГО 2009–2013 гг. показано, что временная эволюция интенсивности атмосферной ОТ хорошо

описывается стохастическими моделями на основе линейных моделей авторегрессии скользящего среднего. При использовании текущих измерений ОТ эти модели позволяют прогнозировать поведение интенсивности ОТ, качества изображения, и характеристик изображения точечного источника: центральной интенсивности функции рассеяния точки, полной ширины на половине максимума, радиуса концентрации света.

3. С использованием пакета для численных расчетов распространения излучения в атмосфере `libRadtran` [15], построена стохастическая модель для прогноза яркости ночного неба и экстинкции в стандартных фотометрических полосах по текущим измерениям астроклиматического монитора КГО. Модель верифицирована по измерениям яркости неба и атмосферной экстинкции в КГО, осуществляемым астроклиматическим монитором с 2008 и 2009 гг.
4. Для количественного описания процесса эффективности наземных оптических астрономических наблюдений предложены величины урожайности и вероятности успеха. В терминах этих величин сформулированы задачи дискретной оптимизации для повышения эффективности за счет планирования наблюдений.
5. Предложены вероятностные модели априорной оценки характеристик телескопа и приемной аппаратуры для использования при формулировке задач дискретной оптимизации. На примере ПЗС-фотометра описан процесс построения таких моделей для приемной аппаратуры.
6. Предложен и реализован алгоритм решения поставленных задач дискретной оптимизации на основе алгоритма `Parallel Depth-bounded Discrepancy Search` (PDDS) [16]. Показано, что при определенном входном размере задачи она может быть решена в реальном времени.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 7 статей в рецензируемых журналах:

1. Kornilov V., Shatsky N., Voziakova O., Safonov B., Potanin S., *Kornilov M.* First results of a site-testing programme at Mount Shatdzhatmaz during 2007–2009 // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. 2010. Vol. 408, no. 2. P. 1233–1248
2. Kornilov V., *Kornilov M.*, Voziakova O. et al. Night-sky brightness and extinction at Mt Shatdzhatmaz // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. 2016. Vol. 462, no. 4. P. 4464–4472
3. Kornilov V., Safonov B., *Kornilov M.* et al. Study on Atmospheric Optical Turbulence above Mount Shatdzhatmaz in 2007–2013 // **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**. 2014. Vol. 126. P. 482–495
4. Kornilov V. G., *Kornilov M. V.* The revision of the turbulence profiles restoration from MASS scintillation indices // **Experimental Astronomy**. 2011. Vol. 29, no. 3. P. 155–176
5. *Kornilov M. V.* Forecasting seeing and parameters of long-exposure images by means of ARIMA // **Experimental Astronomy**. 2016. Vol. 41, no. 1. P. 223–242
6. *Kornilov M. V.* Astronomical observation tasks short-term scheduling using PDDS algorithm // **Astronomy and Computing**. 2016. Vol. 16. P. 131–139
7. В. Г. Корнилов, *М. В. Корнилов*, Н. И. Шатский и др. Метеорологические условия в Кавказской обсерватории ГАИШ МГУ по результатам кампании 2007–2015 годов // **Письма в Астрономический журнал**. 2016. Т. 42, № 9. С. 678–693

и 1 статья в сборниках трудов конференций:

1. **Kornilov M. V.** Estimation of vertical profiles of wind from MASS measurements // Proc SPIE. Vol. 8447. 2012. P. 84471B–84471B–10

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. SPIE симпозиум «Astronomical Telescopes + Instrumentation 2012» (Амстердам, Нидерланды, 2012), конференция «Adaptive Optics Systems III», устный доклад «Estimation of vertical profiles of wind from MASS measurements» (84471B)
2. XXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2015» (Москва, Россия, 2015), устный доклад «Прогнозирование качества изображения и параметров длинно-экспозиционных изображений с помощью линейных моделей авторегрессии».
3. Конференция «Ломоносовские чтения» (Москва, Россия, 2014), соавтор доклада «Результаты исследований оптической турбулентности в атмосфере над горой Шатджатмаз в 2007–2013 гг.»

Личный вклад автора. Автор данной работы участвовал в создании и отладке программного обеспечения автоматизированного астроклиматического монитора КГО, с помощью которого были получены данные об атмосферной ОТ и характеристики других явлений в атмосфере, влияющих на проведение наземных оптических астрономических наблюдений. Автор принимал участие в пересмотре алгоритмов восстановления профиля ОТ из измерений MASS/DIMM, разработал и реализовал алгоритмы для восстановления высотного профиля скорости ветра из измерений MASS/DIMM.

Автором была полностью разработана модель прогнозирования мощности атмосферной ОТ на основе линейных моделей авторегрессии скользящего среднего. Также автор занимался моделированием распространения излучения в ат-

мосфере Земли с помощью пакета `libRadtran`, что позволило автору во-первых построить модель пересчета коэффициента экстинкции между фотометрическими полосами, во-вторых построить адекватную наблюдениям модель яркости ночного неба в присутствии Луны.

Автор предложил способ аппроксимации распределений величин относительной фотометрической ошибки ϵ и требуемого времени экспозиции τ для измерений ПЗС-фотометра логнормальным распределением и описал способ нахождения параметров таких распределений. Кроме того, автор рассчитал коэффициенты пропускания оптической системы для имеющихся наборов фильтров и ПЗС-детекторов.

Автор ввел понятия урожайности и вероятности успеха, сформулировал задачи дискретной оптимизации в терминах этих величин. После этого автор построил и реализовал алгоритм решения данных задач на основе существующего алгоритма параллельного поиска в глубину и выполнил анализ отдельных аспектов производительности и поведения алгоритма.

Все описанные в работе модели и алгоритмы имеющие отношения к оперативному планированию были реализованы автором в виде библиотеки на языке программирования C++¹.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и двух приложений. Общий объем диссертации 137 страниц, из них 104 страницы текста, включая 40 рисунков. Библиография включает 102 наименования на 12 страницах.

Содержание работы

Во **введении** описывается важность исследования, рассматриваются понятия эффективности наземных астрономических наблюдений и автоматического планирования наблюдений. Рассматривается общая структура систем оператив-

¹ Исходные коды доступны по адресу <https://bitbucket.org/matwey/chelyabinsk>

ного планирования, подчеркивается важность влияния характеристик физических явлений в атмосфере на проведение наземных оптических астрономических наблюдений. Обсуждаются актуальность диссертационной работы, её цель и новизна, практическая значимость. Также формулируются положения, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации, описывается личный вклад автора в проделанную работу.

Первая глава полностью посвящена астроклиматическому монитору КГО ГАИШ МГУ, включая основные принципы работы комбинированного прибора MASS/DIMM, и принципы обработки измерений. В главе рассматриваются методы получения характеристик атмосферной оптической турбулентности (ОТ) из измерений прибора MASS/DIMM. Показывается, как из измеряемых индексов мерцания s_{ij}^2 решением обратной плохо обусловленной задачи получается вертикальный профиль структурного коэффициента показателя преломления $C_n^2(h)$ и скорости ветра $V(h)$ на некоторой высотной сетке, имеющей порядка десяти узлов. Рассматриваются интегральные характеристики ОТ, такие как мощность J , качество изображения β , постоянная времени τ_0 .

В дополнение к характеристиками ОТ, оказалось возможным получить статистические оценки яркости ночного неба над КГО, несмотря на то, что изначально астроклиматический монитор для этого не предназначался. Также рассматривается, как данные измерений можно использовать для оценки коэффициента экстинкции α над обсерваторией.

Во **второй главе** рассматриваются модели характеризующие явления влияющие на проведение наземных оптических астрономических наблюдений.

Первый раздел посвящен прогнозированию мощности J с помощью линейных моделей авторегрессии скользящего среднего [17]. Для идентификации модели использованы данные измерений полученные астроклиматическим монитором в 2009 г. Показано, что распределение логарифма мощности ОТ $x \equiv \ln J$ близко к нормальному, для x строится прогноз в смысле многомерной нормаль-

ной функции плотности вероятности $p(x_l, \dots, x_{l+N} | \hat{x}_1, \dots, \hat{x}_r)$ на временной сетке 1 минута, где \hat{x}_i — реализовавшиеся значения исследуемого процесса в момент времени i . Подразумевается, что мощность ОТ измеряется астроклиматическим монитором в реальном времени в течение наблюдательной ночи. Рассматриваются характеристики изображения точечного источника: интенсивность в центре изображения γ_1 , полная ширина на половине максимума γ_2 , радиус круга, включающий в себя e часть всей энергии $\gamma_3(e)$. Для этих величин приводится способ расчета их прогноза в смысле функции плотности вероятности в зависимости от прогноза мощности ОТ и времени экспозиции. Для модели ARIMA (4, 0, 1) проводится валидация прогноза с использованием данных астроклиматического монитора за 2010 г и моделирования Монте-Карло и с исследованием условных моментов.

Во втором разделе строится многополосная пространственная модель яркости ночного неба. Для безлунного времени за основу выбрана оценка полученная в инструментальной фотометрической полосе астроклиматическим монитором $m = 20.78^m$ и стандартным отклонением 0.2^m . Для пересчета в стандартные полосы UBVR_I используются фотометрические цвета, которые вычисляются из спектров ночного неба [18]. Для моделирования рассеянного света Луны используется синтетический спектр излучения Солнца [19], эмпирическая полихроматическая модель альбедо Луны [20] и пакет моделирования распространения света в земной атмосфере `libRadtran` [15]. Модель верифицирована по измерениям астроклиматического монитора и найдена адекватной реальным измерениям.

В третьем разделе главы моделируется ослабление излучения в атмосфере, показывается, что допустимо использовать измерения коэффициента экстинкции в фотометрической полосе прибора MASS для пересчета в стандартные фотометрические полосы видимого диапазона. Для вычисления коэффициентов пересчета используется пакет `libRadtran` [15].

Третья глава посвящена рассмотрению статистических свойств величин

времени экспозиции τ и относительной ошибки ϵ для астрономического ПЗС-фотометра. Показывается, как исходя из стохастического прогноза величины качества изображения β и яркости ночного неба s корректно вычислить 95% квантиль требуемого времени экспозиции. Далее вычисляются коэффициенты пропускания оптической системы «телескоп и ПЗС-фотометр» применительно к 2.5 м телескопу КГО. Во втором разделе приводится пример учета времени движения монтировки телескопа.

В **четвертой главе** формализуется понятие наблюдательной задачи. Вводятся характеризующие её функции вероятности успешного выполнения $p(t)$, урожайности² $y(t)$, длительности выполнения $d(t)$ и времени установки $s(t)$. Рассматриваются разные классы наблюдательных заданий, и приводятся формулы расчета перечисленных функций для всех случаев, в том числе для астрономического ПЗС-фотометра на основе моделей окружения. В качестве двух альтернативных численных мер эффективности наземных оптических астрономических наблюдений рассматриваются вероятность успешного выполнения последовательности наблюдательных задач Π и средняя полная урожайность последовательности наблюдательных задач Y . Считается, что оперативное планирование состоит в выборе подмножества наблюдательных задач из множества T всех доступных для текущей ночи задач с последующим упорядочиванием такого подмножества в последовательность. Поэтому оперативное планирование формулируется в виде задач дискретной оптимизации относительно введенных мер средней полной урожайности:

$$Y^* = \max_{S \in T^+} \left(\sum_{i=1}^{|S|} y_{s_i}(t_{s_i}) p_{s_i}(t_{s_i}) \right), \quad (1)$$

² В англоязычных работах мы используем термин «yield». Среди всех возможных переводов в данной работе используется «урожайность», так как это слово реже других используется в астрономии, и, следовательно, будет сложнее спутать вновь введенное понятие с уже существующими терминами.

и полной вероятности успешного выполнения:

$$\Pi^* = \max_{S \in T^+} \left(\prod_{i=1}^{|S|} p_{S_i}(t_{S_i}) \right), \quad (2)$$

где T^+ обозначает множество всех возможных не пустых конечных последовательностей, составленных из элементов T (полагается, что $\forall i \neq j, S_i \neq S_j$). Формулируется алгоритм решения задач (1) и (2) на основе алгоритма параллельного поиска в глубину PDDS [16]. Вычисляются необходимые для алгоритма функции эвристики и оценки верхней границы $B(V)$, рассматриваются возможные альтернативы. На основе моделирования Монте-Карло генерируются различные наборы задач $T^{(n)}$, и рассматриваются разные аспекты производительности алгоритма поиска решения для $T^{(n)}$, например, эффективность выбора функции $B(V)$, эвристики, устойчивость решения при изменении внешних условий. Полагается, что задачи (1) и (2) должны решаться по мере изменения окружающих условий в течении всей наблюдательной ночи. При определенных близких к реальности условиях, среднее время работы реализованного алгоритма составляет порядка 5 минут.

Заключение посвящено перечислению основных результатов диссертации и обсуждению перспектив дальнейших исследований.

В **приложении А** собраны вместе используемые в нескольких местах работы избранные сведения о логнормальном распределении случайных величин. В **приложении Б** отражаются вспомогательные статистические свойства статистики C_1 из **первой главы**.

Цитированная литература

1. Johnston M., Adorf H.-M. Scheduling with neural networks — the case of the hubble space telescope // Computers and Operations Research. 1992. Vol. 19, no. 3. P. 209 – 240.

2. Gómez de Castro A. I., Yáñez J. Optimization of telescope scheduling // *Astronomy and Astrophysics*. 2003. Vol. 403, no. 1. P. 357–367.
3. Colomé J., Casteels K., Ribas I., Francisco X. The TJO-OAdM Robotic Observatory: the scheduler // *Proc. SPIE*. Vol. 7740. 2010. P. 77403K–77403K–12.
4. Mora M., Solar M. A survey on the dynamic scheduling problem in astronomical observations // *Artificial Intelligence in Theory and Practice III* / Ed. by M. Bramer. Springer, 2010. Vol. 331 of IFIP Advances in Information and Communication Technology. P. 111–120.
5. Colome J., Colomer P., Guàrdia J. et al. Research on schedulers for astronomical observatories // *Proc. SPIE*. Vol. 8448. 2012. P. 84481L–84481L–18.
6. Mahoney W., Veillet C., Thanjavur K. A genetic algorithm for ground-based telescope observation scheduling // *Proc. SPIE*. Vol. 8448. 2012. P. 84480W–84480W–14.
7. Colomé J., Colomer P., Campreciós J. et al. Artificial intelligence for the CTA Observatory scheduler // *Proc. SPIE*. Vol. 9149. 2014. P. 91490H–91490H–15.
8. Delgado F., Schumacher G. The LSST OCS scheduler design // *Proc. SPIE*. Vol. 9149. 2014. P. 91490G–91490G–13.
9. Silva D. R. Service mode scheduling at the ESO very large telescope // *Proc. SPIE*. Vol. 4844. 2002. P. 94–103.
10. Sasaki T., Kosugi G., Kawai J. A. et al. Observation scheduling scheme for the Subaru telescope // *Proc. SPIE*. Vol. 4009. 2000. P. 350–354.
11. Kornilov V. G., Kornilov M. V. The revision of the turbulence profiles restoration from MASS scintillation indices // *Experimental Astronomy*. 2011. Vol. 29, no. 3. P. 155–176.

12. Lombardi G., Sarazin M. Using MASS for AO simulations: a note on the comparison between MASS and Generalized SCIDAR techniques // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2016. Vol. 455, no. 3. P. 2377–2386.
13. Catala L., Crawford S. M., Buckley D. A. H. et al. Optical turbulence characterization at the SAAO Sutherland site // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2013. — Nov.. Vol. 436. P. 590–603.
14. Thomas-Osip J. E., Prieto G., Berdja A. et al. Characterizing Optical Turbulence at the GMT Site with MooSci and MASS-DIMM // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2012. — Jan.. Vol. 124. P. 84–93.
15. Mayer B., Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use // Atmospheric Chemistry and Physics. 2005. Vol. 5, no. 7. P. 1855–1877.
16. Moisan T., Quimper C.-G., Gaudreault J. Parallel Depth-Bounded Discrepancy Search // Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming / Ed. by H. Simonis. Springer International Publishing, 2014. Vol. 8451 of Lecture Notes in Computer Science. P. 377–393.
17. Box G. E. P., Jenkins G. Time Series Analysis, Forecasting and Control. Holden-Day, Incorporated, 1976. ISBN: 0816211043.
18. Patat F. UBVRI night sky brightness during sunspot maximum at ESO-Paranal // Astronomy and Astrophysics. 2003. Vol. 400, no. 3. P. 1183–1198.
19. Kurucz R. L. Synthetic Infrared Spectra // Infrared Solar Physics / Ed. by D. M. Rabin, J. T. Jefferies, C. Lindsey. Vol. 154 of IAU Symposium. 1994. P. 523.
20. Kieffer H. H., Stone T. C. The Spectral Irradiance of the Moon // Astronomical Journal. 2005. — Jun.. Vol. 129. P. 2887–2901.

