

ISSN 2658-5669

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ  
ИНСТИТУТА  
АСТРОНОМИИ РАН

INASAN  
SCIENCE  
REPORTS

ТОМ  
**9**  
ВЫПУСК 1



МОСКВА  
**2024**

В ЖУРНАЛЕ «НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН» ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЬИ ПО РАЗЛИЧНЫМ АСПЕКТАМ АСТРОНОМИИ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ АСТРОФИЗИКЕ, ПЛАНЕТНОЙ АСТРОНОМИИ, ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ, ФИЗИКЕ СОЛНЦА, НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ АСТРОНОМИЧЕСКИМ МЕТОДАМ И ПРИБОРАМ, КОСМИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ИССЛЕДОВАНИЯМ В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ.



УДК 52  
ББК 22.6  
НЗ4

НЗ4 **Научные труды Института астрономии РАН. Том 9(1).** –  
М.: Изд-во Янус-К, 2024, 32 с., илл.

ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

**Редколлегия**

Сачков М.Е. (главный редактор), Вибе Д.З. (зам. главного редактора),  
Бисикало Д.В., Барабанов С.И., Кохирова Г.И., Кузнецов Э.Д., Малков О.Ю.,  
Машонкина Л.И., Фатеева А.М., Шематович В.И., Шустов Б.М.

Ответственный редактор Исакова П.Б.

Секретарь редколлегии Вибе Е.Д.

«Научные труды Института астрономии РАН» – рецензируемый журнал, публикующий статьи по различным аспектам астрономии, в том числе по теоретической и наблюдательной астрофизике, планетной астрономии, звездной астрономии, физике Солнца, небесной механике, астрономическим методам и приборам, космическим исследованиям и исследованиям в области космической геодезии.

© ИНАСАН, 2024

© Коллектив авторов, 2024

**INASAN Science Reports. Vol 9(1). M.: Janus-K, 2024, 32 pp.**

ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

**Editorial Board**

M.E. Sachkov (Editor-in-Chief), D.S. Wiebe (Deputy Editor-in-Chief),  
D.V. Bisikalo, S.I. Barabanov, G.I. Kokhirova, E.D. Kuznetsov, O.Yu. Malkov,  
L.I. Mashonkina, A.M. Fateeva, V.I. Shematovich, B.M. Shustov.

Coordinating Editor Isakova P.B.

Staff Editor E.D. Wiebe

INASAN Science Reports is a peer-reviewed journal that publishes papers in various fields of astronomy, including theoretical and observational astrophysics, planetary astronomy, galactic astronomy, solar physics, celestial mechanics, astronomical methods and tools, space research and studies related to space geodesy.

© INASAN, 2024

© Author team, 2024

*Учредитель:*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Института астрономии Российской академии наук

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору  
в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций  
(Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83927 от 16.09.2022)

Научное издание

**Научные труды  
Института астрономии РАН.  
Том 9 (1)**

---

Сдано в набор 15.05.2024. Подписано в печать 22.05.2024  
Формат 60х90/8. Бумага офсетная.  
Уч.-изд. п.л. 4,0. Физ. п.л. 4,0. Тираж 100. Заказ №4132

Издательство «Янус-К»  
127411, Москва, Учинская ул., д. 1

Отпечатано в ООО «ИНФОРМ-СОФТ»  
119034, Москва, Еропкинский пер., д. 16

---



# Распределение хрома по поверхности Ap звезды HD 152564

Потравнов И.С., Рябчикова Т.А.

*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

Спектральная и фотометрическая переменность магнитных Ap/Bp звезд обусловлена поверхностными неоднородностями их химического состава (пятнами), влияющими на структуру атмосферы и выходящий поток излучения. Интерпретация и моделирование переменности Ap/Bp звезд требуют аккуратного учета поверхностного распределения основных элементов, вносящих наибольший вклад в непрозрачность в данном температурном диапазоне. В работе представлены результаты исследования горизонтального распределения хрома в атмосфере Ap звезды HD 152564, полученные методом доплеровского картирования. Показано, что область повышенного содержания хрома в атмосфере звезды имеет форму кольца, перпендикулярного экватору вращения. Можно ожидать вклада этой области в наблюдаемую кривую блеска при ее прохождении по видимому полушарию звезды. Сравнение с ранее полученными результатами показало, что характер горизонтального распределения хрома в атмосфере HD 152564 отличен от других исследованных элементов, которые в свою очередь также показывают большое разнообразие распределений.

Поступила в редакцию 15.06.2024 г. Принята в печать 05.07.2024 г.

*Ключевые слова:* химически пекулярные Ap/Bp звезды, звездные пятна, доплеровское картирование

## On the surface distribution of chromium in Ap star HD 152564

Potravnov I.S., Ryabchikova T.A.

*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

The spectroscopic and photometric variability of magnetic Ap/Bp stars is caused by the surface inhomogeneities of their chemical composition (spots) that affect the structure of the atmosphere and the emergent flux. Interpretation and modeling of the variability of Ap/Bp stars require careful consideration of the surface distribution of the principal elements which contribute to opacity in a given temperature range. In this paper we present the results of a study of the horizontal distribution of chromium in the atmosphere of the Ap star HD 152564 recovered with the Doppler Imaging technique. We reveal that the region of increased chromium abundance has the form of a ring perpendicular to the rotational equator. The passage of this region across the visible hemisphere of the star should contribute to the observed light curve. Comparison with the previously obtained results shows that the character of the horizontal distribution of chromium in the atmosphere of HD 152564 is different from other investigated elements, which in turn also possess a significant diversity.

Received 15.06.2024. Accepted 05.07.2024.

*Keywords:* chemically peculiar Ap/Bp stars, starspots, Doppler imaging

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.1.001

### 1. Введение

Химически пекулярные Ap/Bp звезды обладают крупномасштабными магнитными полями с напряженностью до  $B \sim 10^4$  Гс и демонстрируют поверхностные аномалии химического состава. Эти аномалии заключаются обычно в дефиците легких элементов и избытках кремния, элементов железного пика и редкоземельных элементов вплоть до  $\sim 5$  dex в логарифмической шкале по отношению к солнечному содержанию элементов [1]. Распределение элементов в атмосферах Ap/Bp звезд характеризуется значительными вертикальными и горизонтальными градиентами содержаний, формирующимися под действием механизма селективной атомной диффузии [2, 3]. Фотометрическая, спектральная и магнитная переменность Ap/Bp звезд модулируется с периодом осевого вращения и обусловлена прохождением по лучу зрения химически-неоднородной (запятненной) поверхности [4].

Локальные избытки содержаний химических элементов в результате покровного эффекта существенно модифицируют тепловую структуру атмосферы и влияют на поток выходящего излучения [5]. В температурном диапазоне магнитных Ap/Bp звезд значительными источниками непрозрачности являются кремний и некоторые элементы железного пика с большим числом наблюдаемых в видимой области переходов: железо и хром. Таким образом, неоднородное распределение этих элементов по поверхности звезды вносит существенный вклад в спектральную и фотометрическую переменность и должно учитываться при моделировании кривых блеска Ap/Bp звезд. Кремниевая Ap звезда HD 152564 (=MX TrA) демонстрирует выраженную переменность профилей спектральных линий, а также квази-синусоидальную фотометрическую переменность с амплитудой  $\Delta I \approx 0.03^m$  и периодом  $P = 2.1639 d$ . Анализ содержаний элементов в ее атмосфере выявил существенные избытки Si, Fe, Cr. В работе Потравнова и др. [6] было выполнено доплеровское картирование поверхности HD 152564 в линиях пяти элементов (He, Mg, Si, Fe, O), показавшее их сильно неоднородное распределение с контрастами содержаний, достигающими  $\sim 2$  dex. При этом характер горизонтального распределения у рассмотренных элементов оказался существенно различным. В настоящей работе мы дополняем полученные ранее результаты анализом горизонтального распределения хрома в атмосфере HD 152564.

## 2. Доплеровское картирование

Для восстановления распределения хрома по поверхности HD 152564 нами была использована техника доплеровского картирования, реализованная в программном пакете INVERS11 [7]. INVERS11 позволяет восстановить распределение рассматриваемого элемента на основе моделирования наблюдаемых профилей линий, полученных в различных фазах осевого вращения звезды. Поверхность звезды разбивается равноэлементной сеткой, в каждой ячейке которой вычисляются локальные синтетические профили для заданных параметров атмосферы с величиной содержания рассматриваемого элемента в качестве свободного параметра. Интегрирование по диску производится с учетом доплеровских сдвигов. Решение находится путем  $\chi^2$  минимизации невязок между синтетическими и наблюдаемыми профилями с использованием регуляризации Тихонова, поскольку рассматриваемая обратная задача является некорректной. В ходе процедуры картирования обычно используется значение регуляризующего параметра, дающего минимальную величину  $\chi^2$ , сравнимую с величиной S/N исходных данных. INVERS11 позволяет одновременно восстанавливать поверхностное содержание нескольких элементов, что позволяет анализировать в том числе и блендированные линии.

Для картирования хрома на поверхности HD 152564 нами была использована серия спектров, полученная в 2019–2021 гг. на 10-метровом телескопе SALT в Южной Африке и эшелле-спектрографе HRS в режиме среднего разрешения ( $R \approx 38000$ ). Детальное описание наблюдений и их обработки см. в работе [6]. Спектры звезды были получены в 10 равномерно распределенных вращательных фазах. Фазы вычислялись согласно эфемериде  $JD = 2458647.7774 + 2.1639 d \cdot E$ , где начальный момент соответствует фотометрическому максимуму блеска звезды. Сводка параметров, необходимых для расчета модели атмосферы и доплеровского картирования, приведена в табл. 1 согласно цитированной выше работе. Также для расчета модели атмосферы и в качестве начального приближения при картировании был использован определенный там же средний химический состав HD 152564. Учитывая сравнительно высокую (для Ar звезд) скорость осевого вращения HD 152564 ( $v_e \sin i = 69$  км/с), поиск подходящих для картирования линий в ее спектре затруднен. Для исследования распределения хрома по поверхности HD 152564 были выбраны линии CrII 4558.62Å, 4616.63Å и 4634.07Å, обладающие надежными атомными параметрами. Атомные параметры рассматриваемых линий CrII и блендирующих их линий FeII, SiIII, TiII были получены из базы атомных данных VALD3 [8, 9] и представлены в табл. 2. Для спектрального синтеза в ходе картирования использовалась модель атмосферы HD 152564, рассчитанная в программном пакете LLMODELS [10] с учетом индивидуального химического состава HD 152564.

Таблица 1: Параметры HD 152564.

Параметр	Значение
$T_{\text{eff}}$	$11950 \pm 200$ К
$\lg g$	$3.6 \pm 0.2$ dex
$V_{\zeta}$	$0.0$ км·с <sup>-1</sup>
$V_{\text{RT}}$	$0.0 \pm 1.5$ км·с <sup>-1</sup>
$v_e \sin i$	$69 \pm 2$ км·с <sup>-1</sup>
$i$	$51^\circ$

Поскольку рассматриваемые линии CrII блендированы линиями FeII, одновременно восстанавливалось распределение хрома и железа. Поверхностное распределение железа оказалось полностью идентичным полученному в работе [6] по неблендированной линии FeII 4731.45Å. Это подтверждает, что в нашем анализе вклад хрома и железа в переменность бленд учтен корректно. Результаты картирования хрома по поверхности HD 152564 приведены на рис. 1, где показаны карты в сферической проекции для четырех вращательных фаз  $\phi = 0.0 - 0.75$ . Можно видеть, что поверхностное распределение хрома в атмосфере HD 152564 носит сильно неоднородный характер с контрастами содержания, достигающими  $\sim 1.7$  dex. Области повышенного содержания Cr имеют форму сравнительно узкого ( $\Delta l \approx 20^\circ$  по долготе) меридионального кольца, пересекающего луч зрения на фазах  $\phi \approx 0.0$  и  $0.5$ . Кольцо имеет клочковатую структуру с наиболее контрастным пятном с  $\log A_{\text{Cr}} = \log(N_{\text{Cr}}/N_{\text{tot}}) \approx -4.6$  dex, расположенным на пересечении с экватором вращения вблизи фазы  $\phi = 0.0$ . Содержание хрома в этом пятне почти на два порядка превышает солнечное ( $\log A_{\text{Cr}}^{\odot} = -6.38$  dex). Остальные области имеют содержание Cr, близкое к солнечному.

Пример аппроксимации наблюдаемых профилей линий CrII в различных фазах, с учетом восстановленного горизонтального распределения хрома и вклада в наблюдаемую переменность блендирующих линий FeII, показан на рис. 2. Можно отметить хорошее согласие наблюдаемых и теоретических профилей. Исключение составляют профили линии CrII 4558.62Å на фазах  $\phi = 0.44$  и  $0.98$ , демонстрирующие избыточное поглощение в сравнении с синтетическим спектром. При этом, в двух других использованных линиях CrII дополнительное поглощение не наблюдается. Однозначного объяснения этому обстоятельству у нас нет. Для

Таблица 2: Список линий, использованных при доплеровском картировании.

Element	Line, Å	$E_{\text{low}}$ , эВ	$\log gf$	$\log \Gamma_4$
SiIII	4557.2472	28.3554	-0.070	0.000
CrII	4558.2796	8.3557	-1.272	-5.730
CrII	4558.6241	4.0734	-0.430	-6.540
CrII	4558.7571	4.0735	-2.530	-6.540
FeII	4559.5193	7.8042	-2.447	-5.830
...				
FeII	4615.3230	7.6951	-3.112	-5.850
CrII	4616.2582	5.6699	-2.346	-6.480
CrII	4616.6290	4.0722	-1.420	-6.560
FeII	4618.0591	7.6951	-3.313	-5.850
...				
CrII	4634.0700	4.0722	-1.050	0.000
FeII	4634.6058	2.5827	-5.533	-6.540
FeII	4635.3169	5.9561	-1.476	-6.580
TiII	4636.3219	1.1649	-3.230	-6.500

проверки мы построили карту по двум линиям CrII 4616.63Å и 4634.07Å, исключив из рассмотрения линию CrII 4558.62Å (хотя она является наименее блендированной из трех рассмотренных линий). Результаты приведены на рис. 3. Общий характер распределения остался прежним, но изменился контраст доминирующей области на фазе  $\phi = 0.0$ . Максимальное значение содержания Cr понизилось на  $\sim 0.5$  dex, из-за чего в пятне с повышенным содержанием сгладился градиент и визуально оно стало более однородным и диффузным. Геометрия остальных областей и значения содержаний Cr в них остались практически неизменными. Заметим, что итоговые невязки при аппроксимации профилей с учетом линии CrII 4558.62Å и без нее оказываются практически идентичными. В настоящий момент не представляется возможным сделать однозначный выбор между двумя представленными шкалами содержания Cr. Возможно дальнейшее привлечение дополнительных данных, например, моделирование кривой блеска, позволит решить этот вопрос.

### 3. Обсуждение и заключение

Результаты доплеровского картирования показали сильно неоднородное распределение хрома по поверхности HD 152564 со значительными контрастами содержаний. Использование различного набора линий при картировании дает шкалы содержаний на  $\sim 0.5$  dex различающиеся в области максимальных значений, но практически идентичный характер распределения. Область повышенного содержания Cr имеет форму неоднородного кольца, расположенного на поверхности звезды вдоль большого круга, перпендикулярного экватору вращения. Такой характер поверхностного распределения хрома отличается от ранее исследованных распределений других элементов в атмосфере звезды: цепочек приэкваториальных пятен (Si, O) и околополярных кольцевых структур (He, Fe, Mg). Область максимального содержания Cr не совпадает ни с одним из ранее картированных в атмосфере HD 152564 элементных пятен, и поэтому следует ожидать ее выраженный вклад в кривую блеска. Этот вопрос будет количественно рассмотрен в последующей работе.

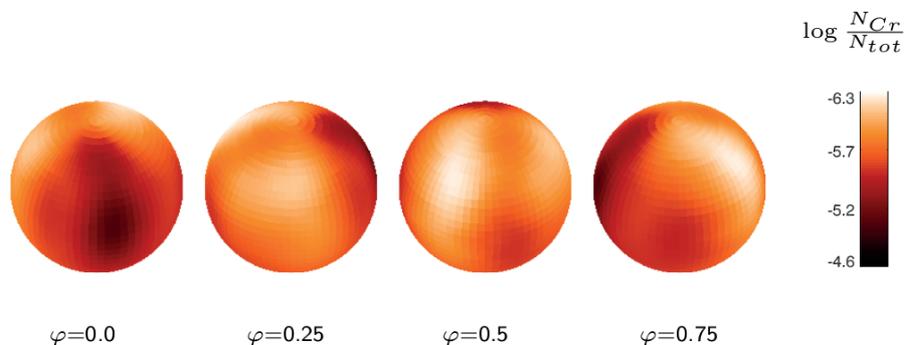


Рис. 1: Поверхностное распределение хрома в атмосфере HD 152564, полученное по линиям CrII 4558.62Å, 4616.63Å и 4634.07Å. Шкала содержания в величинах  $\log A_{\text{Cr}} = \log(N_{\text{Cr}}/N_{\text{tot}})$  представлена справа.

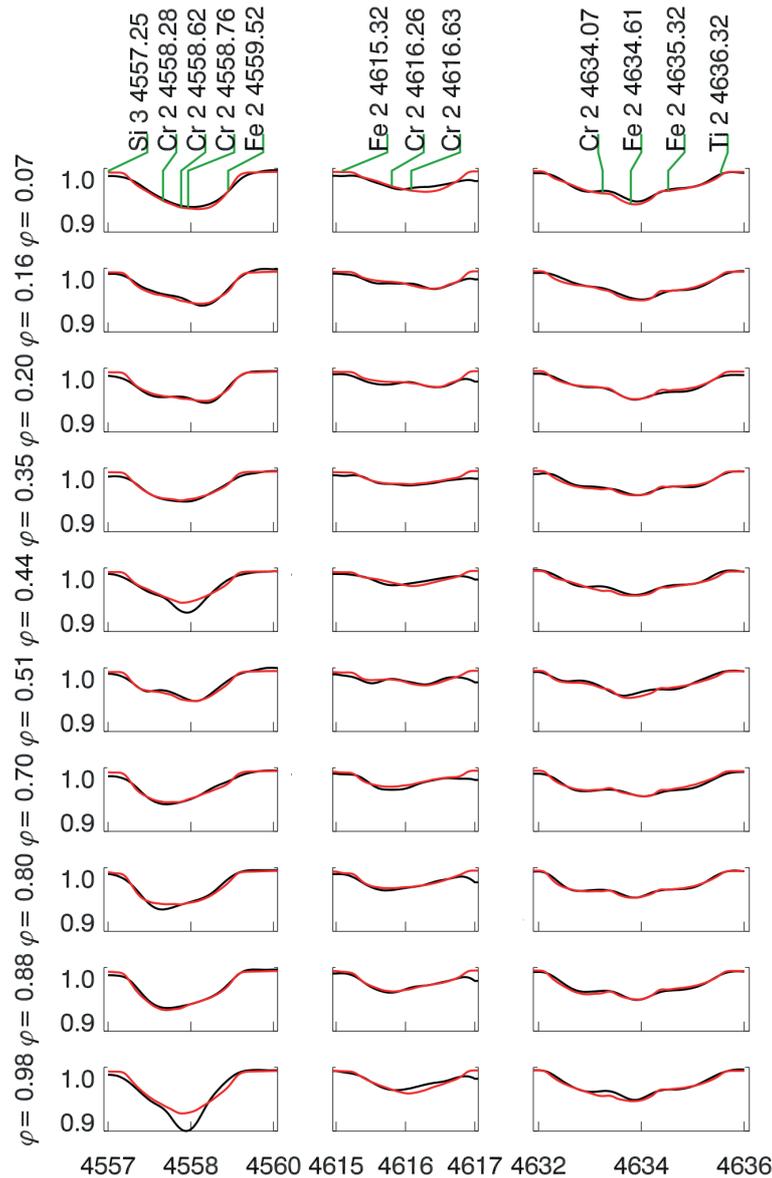


Рис. 2: Профили линии CrII в спектре HD 152564 в различных фазах осевого вращения (черная линия) и их аппроксимация синтетическим спектром (красная линия). Фазы подписаны слева от рисунка.

Интересно отметить, что согласно предсказаниям современных трехмерных диффузионных моделей [11] узкие кольцеобразные структуры должны возникать вдоль магнитного экватора. Причем, для всех элементов ожидается одинаковый характер распределения. В действительности, наблюдаемые поверхностные распределения элементов Ar/Vr звезд отличаются большим разнообразием, которое не согласуется с модельными предсказаниями (см. дискуссию в [12]). Благодаря проведенному мультиэлементному картированию пример HD 152564 наглядно показывает, что даже в атмосфере одной звезды горизонтальное распределение элементов со схожим спектром поглощения, например, Fe и Cr, существенно различно. Поскольку характеристики магнитного поля HD 152564 неизвестны, опираясь на наблюдаемое распределение хрома и предсказания диффузионных моделей, можно было бы предположить большой наклон диполя ( $\beta \approx 90^\circ$ ) и расположение «хромового кольца» в плоскости магнитного экватора, перпендикулярного экватору вращения. Но это предположение не согласуется с концентрацией железа в северной полярной области. Таким образом, можно заключить, что перспективной задачей является Доплер-Зеемановское картирование HD 152564, которое позволило бы восстановить поверхностную геометрию магнитного поля и исследовать связь с ней аномалий химического состава. Эти данные были бы важны в том числе для проверки современных диффузионных моделей.

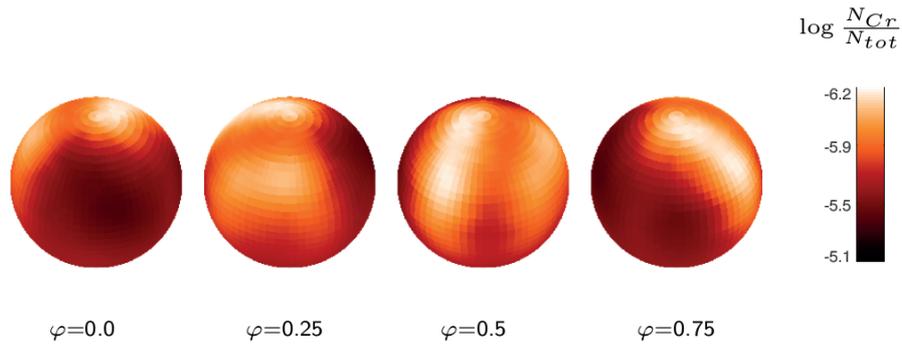


Рис. 3: То же, что и рис. 1, но только по линиям CrII 4616.63Å и 4634.07Å. При сравнении с рис. 1 следует иметь ввиду изменившуюся шкалу содержания и динамический диапазон цветовой шкалы.

### Список литературы

1. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin*, **62**, 62, 2007.
2. G. Michaud, *Astrophys. J.*, **160**, 641, 1970.
3. G. Michaud, G. Alecian, and J. Richer, *Atomic Diffusion in Stars* (2015).
4. D. W. N. Stibbs, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **110**, 395, 1950.
5. S. A. Khan and D. V. Shulyak, *Astron. and Astrophys.*, **469**, 1083, 2007.
6. I. Potravnov, T. Ryabchikova, N. Piskunov, Y. Pakhomov, and A. Kniazev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **527**, 10376, 2024.
7. N. Piskunov and O. Kochukhov, *Astron. and Astrophys.*, **381**, 736, 2002.
8. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, W. W. Weiss, and C. S. Jeffery, *Astron. and Astrophys. Supp.*, **112**, 525, 1995.
9. T. Ryabchikova, N. Piskunov, R. L. Kurucz, H. C. Stempels, U. Heiter, Y. Pakhomov, and P. S. Barklem, *Physica Scripta*, **90**, 054005, 2015.
10. D. Shulyak, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, C. Stütz, and W. W. Weiss, *Astron. and Astrophys.*, **428**, 993, 2004.
11. M. J. Stift and G. Alecian, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **457**, 74, 2016.
12. O. Kochukhov and T. A. Ryabchikova, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **474**, 2787, 2018.

# Первые наблюдения на фотометрическом комплексе для исследования транзитов экзопланет Кисловодской обсерватории ИНАСАН

Нароенков С.А., Тарасенков А.Н., Наливкин М.А.

*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

В Кисловодской обсерватории ИНАСАН на плато Шаджатмаз начались регулярные наблюдения на фотометрическом комплексе для исследования транзитов экзопланет, построенном на основе телескопа Астросиб RC500 с приемником излучения ZWO ASI6200MM Pro и колесом фильтров UBVR. В конце 2023 и начале 2024 г. проведены наблюдения 10 транзитов экзопланет и одного кандидата в затменные переменные с пульсирующим компонентом 2MASS J23453766+713436. Проведены оценки максимальной проникающей величины фотометрического комплекса. При экспозиции 120 с в фильтрах R и V с  $SNR = 20$  уверенно обнаруживаются объекты  $19^m$ . При экспозициях 90 с в фильтрах V и R при  $SNR = 10$  зафиксированы объекты  $18.2^m$  и  $19^m$ , соответственно. В идеальных условиях (нет облаков, дымки, ветра, хорошее качество изображений) для звезд с  $R = 13^m$  достигается точность (RMS) 3.5–4.0 mmag. Для более ярких объектов ( $R = 11^m$ ) достигается точность около 1.0 mmag при усреднении измерений с шагом 3 мин. Индивидуальные измерения имеют точность около 1.9 mmag.

Поступила в редакцию 04.04.2024 г. Принята в печать 09.07.2024 г.

*Ключевые слова: оптические системы, экзопланеты*

## First observations at the photometric complex for studying exoplanet transits of the Kislovodsk Observatory INASAN

Naroenkov S.A., Tarasenkov A.N., Nalivkin M.A.

*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

Regular observations started on photometric complex for studying exoplanet transits, located at the Kislovodsk Observatory of INASAN on the Mount Shatdzhatmaz. Its construction is based on the Astrosib RC500 telescope equipped with a ZWO ASI6200MM Pro camera and a UBVR filter wheel. At the end of 2023 and the beginning of 2024, observations of 10 transits of exoplanets and 2MASS J23453766+713436, the eclipsing variable with a pulsating component candidate, were carried out. The maximum apparent magnitude of the photometric complex has been estimated. Objects of  $19^m$  are reliably detected with  $SNR = 20$  at the exposure of 120 sec in filters R and V. At exposures of 90 s in filters V and R objects of  $18.2^m$  and  $19^m$  respectively were recorded with  $SNR = 20$ .

Received 04.04.2024. Accepted 09.07.2024.

*Keywords: optical telescope, exoplanets*

**DOI:** 10.51194/INASAN.2024.9.1.002

### 1. Введение

Кисловодская обсерватория ИНАСАН находится в 40 км от Кисловодска на плато Шаджатмаз на высоте 2100 м. Эта местность характеризуется хорошим астроклиматом, что позволяет проводить наблюдения круглогодично. Плато Шаджатмаз давно известно российским астрономам, так как на этой площадке расположены астрономические и экспериментальные площадки ГАИШ МГУ, ГАО РАН, ИФА РАН. Кисловодская обсерватория ИНАСАН расположена на территории площадью 1.5 га. На территории установлены два купола Астросиб ASD-4.5 для размещения телескопов апертурой до 80 см, а также купол диаметром 2.86 м для размещения небольшого телескопа апертурой до 35 см. На территории также имеются два лабораторных модуля для размещения научного оборудования и обслуживающего персонала.

### 2. Фотометрический комплекс для исследований экзопланет

Осенью 2023 г. на Кисловодской обсерватории ИНАСАН начались систематические наблюдения на фотометрическом комплексе для исследования транзитов экзопланет. Фотометрический комплекс был создан во время выполнения работ по проекту «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет в ИНАСАН» в 2020–2022 гг. На фотометрическом комплексе могут быть реализованы следующие наблюдательные задачи: наблюдения транзитов экзопланет, наблюдения звезд с целью изучения их фотометрического поведения, мониторинг транзиентных событий, поиск новых малых тел Солнечной системы.

Основной инструмент комплекса — 50-см телескоп системы Ричи-Кретьена Астросиб RC500 на экваториальной монтировке Астросиб FMDD700. Монтировка Астросиб FMDD700 оснащена двигателями прямого



Рис. 1: Фотометрический комплекс для исследований экзопланет.

привода и абсолютными оптическими энкодерами. Ошибки наведения телескопа на заданные координаты составляют не более  $10''$ , а средняя точность слежения — не более  $1''$  за 20 минут слежения за объектом. Фокусное расстояние телескопа Астросиб RC500 — 4000 мм, максимальный диаметр поля зрения в фокусе Кассегрена —  $1^\circ$ , что соответствует диаметру поля около 70 мм в линейном измерении. В качестве приемника используется sCMOS камера ZWO ASI6200MM Pro. Рабочее поле зрения телескопа с камерой ASI6200MM Pro составляет  $30' \times 20'$ . Матрица камеры имеет разрешение  $9576 \times 6388$  пикселей, шум считывания  $1.2\text{--}3.5e^-$  и пиковую квантовую эффективность 91%. Размер пикселя 3.76 мкм обеспечивает масштаб  $0.377''/\text{пиксель}$  при биннинге 2. Телескоп оснащен колесом с интерференционными светофильтрами фирмы Chroma в полосах UVBRI системы Джонсона-Козинса. Для минимизации влияния приземного слоя воздуха на качество изображения, астрономический купол поднят на высоту 5.5 м над землей на ветропрозрачной гиперболической ферменной опоре, а сам телескоп с опорно-поворотным устройством находится на уровне 7.4 м. По данным наблюдений на телескопе медианное качество астрономических изображений составляет  $FWHM = 1.5''$ , а в отдельные ночи —  $FWHM$  меньше  $1''$ .

Таблица 1: Наблюдения транзитов экзопланет для поддержки TESS.

Объект	Зв. вел. TESS	Дата	Фильтр	Экспоз., с	Предсказ. глубина, ppt
TOI-4014.01	13.49	2023-12-29	I	120	17.1
TOI-3801.01	12.94	2023-12-30	I	120	14.9
TOI-3650.01	13.32	2024-01-05	I	120	12.3
TOI-3701.01	13.43	2024-01-06	I	150	17.0
TOI-5499.01	12.89	2024-01-06	I	120	17.0
TOI-5503.01	12.34	2024-01-06	R	100	7.3
TOI-6462.01	11.93	2024-01-07	R	60	7.2
TOI-5500.01	13.19	2024-01-30	I	150	11.7
TOI-6456.01	11.89	2024-01-30	R	100	8.1
TOI-3723.01	13.30	2024-02-12	I	150	13.6

### 3. Система управления фотометрического комплекса

Фотометрический комплекс для исследования экзопланет полностью подготовлен для проведения наблюдений в автоматическом и дистанционном режимах. Для работы оптического комплекса в куполе размещен телекоммуникационный шкаф с источником бесперебойного питания, компьютером управления, устройством удаленного управления электропитанием по сети Ethernet, роутером и другим оборудованием. Для визуального контроля состояния телескопа в куполе установлена видекамера.



Рис. 2: Купол Астросиб ASD-4.5 на гиперболической ферменной опоре.

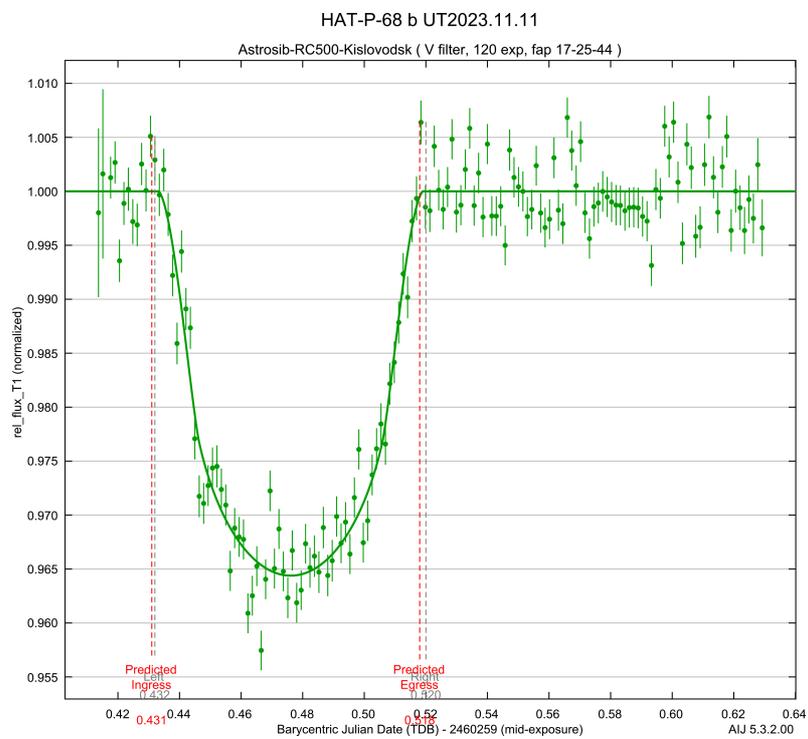


Рис. 3: Кривая блеска транзита экзопланеты HAT-P-68b. Длительность экспозиций 120 с, полоса V. Зеленые точки получены из фотометрии и исправлены за поглощение в атмосфере, зеленая кривая — результат фитирования моделью. Также показаны моменты начала и конца транзита.

Астроном-наблюдатель подключается к компьютеру управления оптического комплекса с помощью удаленного рабочего стола с использованием VPN-туннеля через сеть Интернет. Все астрономическое оборудование комплекса поддерживает программную платформу ASCOM. В дистанционном режиме астроном с помощью специального программного обеспечения наводит телескоп на исследуемый объект, устанавливает длительности и количество экспозиций для исследуемого объекта.

Для работы фотометрического комплекса в автоматическом режиме используется программа управления сеансом наблюдений, созданная в ИНАСАН. В автоматическом режиме все процедуры по наблюдению исследуемого объекта проходят без участия оператора. Перед началом сеанса наблюдений оператор формирует план наблюдений, состоящий из целеуказаний на избранные объекты, времен экспозиций, количества повторов и используемых фотометрических фильтров. Планировщик наблюдений заранее позволяет оценить время выполнения плана наблюдений, чтобы эффективно использовать время отведенное на один объект. После формирования плана, он загружается в программу управления сеансом наблюдений, и в указанное время начинается сеанс наблюдений. Программа управления сеансом наблюдений передает управляющие команды на монтировку, приемник излучения, астрономический купол, постоянно контролирует погодные условия и состояние атмосферы по данным с метеоконцентрации. Сеанс наблюдений прерывается в случае ухудшения погодных условий, телескоп устанавливается в парковочное положение, крышки телескопа и купол закрываются.

#### 4. Наблюдения транзитов экзопланет и их обработка

Регулярные наблюдения на фотометрическом комплексе были начаты 11 ноября 2023 г. Была получена кривая блеска транзита экзопланеты НАТ-Р-68 b в фильтре V с экспозицией 120 с (рис. 4). Основные результаты ее обработки представлены в табл. 2. Рассчитанные параметры экзопланеты (радиус, глубина транзита, время его начала и конца) хорошо согласуются с предсказанными. Хотя звезда достаточно слаба ( $13.84^m$  в полосе V), была достигнута высокая точность фотометрии ( $RMS = 0.00364^m$ ).

С целью определения возможностей фотометрического комплекса применительно к наблюдениям транзитов экзопланет, с декабря 2023 г. на телескопе проводились пилотные наблюдения транзитов экзопланет-кандидатов в рамках наземной поддержки КА TESS (TFOP, [1]). Рабочая группа TFOP координирует все наблюдения звезд, заподозренных в наличии около них транзитных экзопланет, включая спектроскопические наблюдения с целью определения массы предполагаемой планеты, получение изображений высокого качества, позволяющих избежать ложной идентификации переменности одного из компонентов визуально-двойной системы как транзита, а также высокоточная фотометрия транзитов. Наблюдатели, работающие в рамках программы, имеют доступ к эфемеридам транзитов у кандидатов TESS для любой точки Земли, рассчитанным с помощью специального ПО Tapir [2]: координатам объекта, его высоте, азимуту, расстоянию до Луны, моментам начала и конца транзита и рекомендуемым моментам начала и конца наблюдений. Также, для увеличения эффективности наблюдений, для каждого объекта даются приоритетные фильтры для проведения фотометрии и требуемая фотометрическая точность, информация о близких звездах, вносящих ошибки в наблюдаемые характеристики транзита в случае недостаточно хорошего качества изображения. Каждому объекту присвоен рейтинг для наблюдений (1 — максимальный, 5 — минимальный).

Список наблюдаемых кандидатов в транзитные экзопланеты представлен в табл. 2, кривые блеска избранных транзитов представлены на рис. 5 и 6. Фотометрические данные исправлены за поглощение в атмосфере, кривая — результат фитирования моделью. Отмечены моменты начала и конца транзита.

Таблица 2: Результаты обработки наблюдений транзитов экзопланет.

Объект	Глубина, ppt	RMS, mmag	Период, сут.	$(R_p/R_*)^2$	$a/R_*$	Tc	Прим.
НАТ-Р-68b	34.76	3.64	2.3	0.0346	7.9	2460259.475987	–
ТОИ-4014.01	22.03	11.84	2.81	0.0190	13.2	2460308.567381	1.
ТОИ-3801.01	20.84	3.95	5.87	0.0092	14.9	2460310.554683	–
ТОИ-3650.01	6.00	9.17	1.76	0.0052	7.7	2460315.359729	2.
ТОИ-3701.01	18.04	4.08	4.26	0.0164	12.2	2460316.199914	–
ТОИ-5499.01	12.58	10.19	4.8	0.0104	18.2	2460316.380731	3.
ТОИ-5503.01	5.95	9.58	4.8	0.0049	17.8	2460316.666134	4.
ТОИ-5500.01	11.24	3.71	1.75	0.0096	20.4	2460340.243804	–
ТОИ-6456.01	5.08	1.11	3.87	0.0162	5.2	2460340.419085	5.
ТОИ-3723.01	19.64	5.12	3.94	0.0178	9.1	2460353.233898	–

Примечание: 1. Облачность вне транзита. 2. Плохое качество изображения. 3. Облачно, разрывы в ряде наблюдений. 4. Облачно, разрывы в ряде наблюдений. 5. Суммирование по 2 кадра.

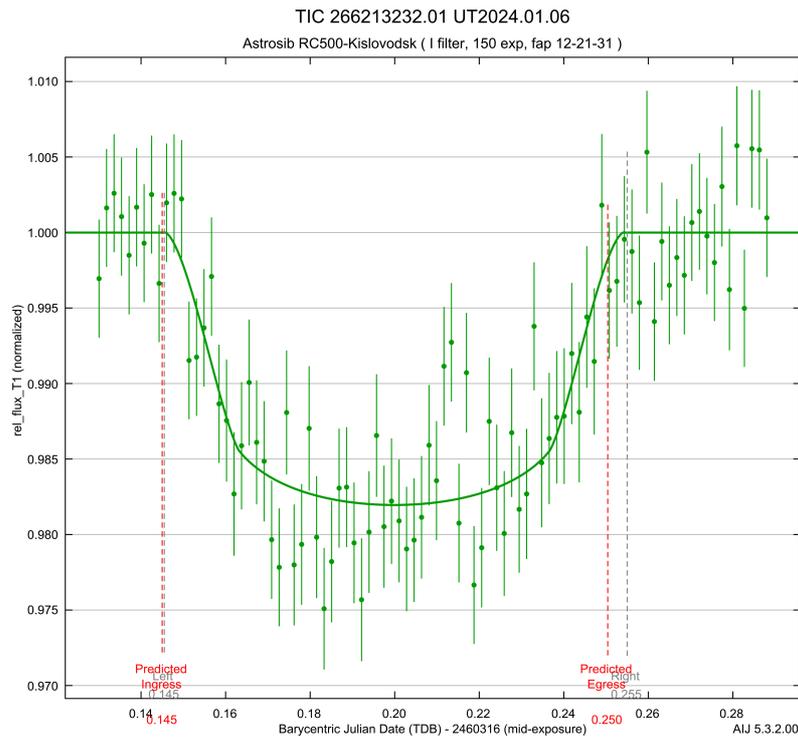


Рис. 4: Кривая блеска транзита кандидата в экзопланеты TOI-3701.01. Длительность экспозиций 150 с, полоса I.

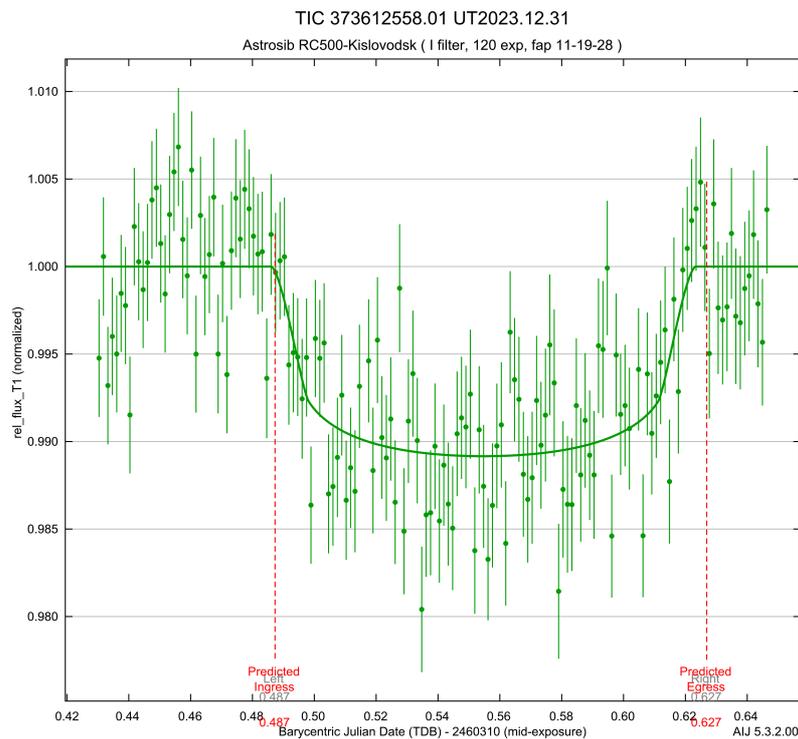


Рис. 5: Кривая блеска транзита кандидата в экзопланеты TOI-3801.01. Длительность экспозиций 120 с, полоса I.

Апертурная фотометрия проводилась с помощью программы AstroimageJ [3]. Программа, разработанная специально для прецизионной фотометрии экзопланетных транзитов, позволяет учесть особенности приемника излучения телескопа (коэффициент усиления, шум считывания), неоднородность фона по кадру и атмосферное поглощение. Измерительная апертура автоматически устанавливается по фотоцентру каждой звезды, ее параметры рассчитываются исходя из значения FWHM. Программа производит фитирование

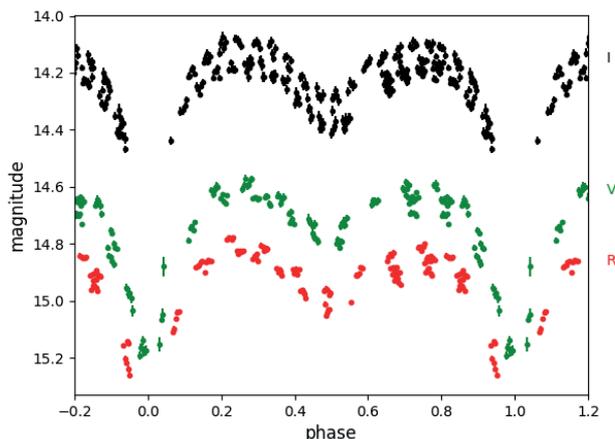


Рис. 6: Фазовая кривая блеска кандидата в переменные звезды, подтвержденного при наблюдениях площад-ки TOI-5583, в полосах V, R, I.

кривой блеска с учетом температуры и размера звезды, потемнения звезды к краю, предполагаемого орбитального периода и эксцентриситета орбиты планеты, модель транзита показана зеленой кривой на рис. 4–6. При обработке использовались коэффициенты потемнения звезд к краю, рассчитанные EXOFAST [4] по параметрам звезды ( $T_{\text{eff}}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ,  $\log(g)$ ) для соответствующего фильтра.

Все обработанные наблюдения кандидатов в транзитные экзопланеты были загружены на сайт программы поддержки ExoFOP-TESS<sup>1</sup> для пополнения каталога экзопланет. Основные результаты обработки и фитирования кривых блеска транзитов приведены в табл. 2.

## 5. Наблюдения переменных звезд

Также на телескопе проводятся многоцветные фотометрические наблюдения переменных звезд с целью уточнения их характеристик. В декабре 2023 г. — январе 2024 г. проведена наблюдательная кампания по мониторингу кандидата в затменные переменные с пульсирующим компонентом 2MASS J23453766+7134365, и многоцветный фотометрический мониторинг ряда затменных систем с эллиптическими орбитами. Помимо этого, проводятся наблюдения площадок из архивов малых телескопов и стеклянных библиотек с целью подтверждения обнаруженных в них переменных звезд. Пример многоцветной фазовой кривой блеска такой звезды показан на рис. 6.

## 6. Заключение

В конце 2023 г. начались регулярные наблюдения на фотометрическом комплексе для исследования экзопланет на основе телескопа Астросиб RC500 в Кисловодской обсерватории ИНАСАН. Проведены работы по оценке максимальной проникающей величины. При экспозиции 120 с в фильтрах R и V  $SNR = 20$  уверенно обнаруживаются объекты 19<sup>m</sup>. При экспозициях 90 с в фильтрах V и R при  $SNR = 10$  зафиксированы объекты 18.2<sup>m</sup> и 19<sup>m</sup>, соответственно. Проведен мониторинг десяти кандидатов звезд с экзопланетами. Для всех звезд получены кривые изменения блеска звезды во время транзита экзопланеты по диску звезды. Анализ фотометрических данных показал, что точность относительной фотометрии составляет 0.0035<sup>m</sup> для звезд с  $V = 13.5^m$ .

## Список литературы

1. NExSci, Exoplanet follow-up observing program web service, 2022, URL <https://catcopy.ipac.caltech.edu/doi/doi.php?id=10.26134/EXOFAST>.
2. E. Jensen, Tapir: A web interface for transit/eclipse observability, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1306.007, 2013.
3. K. A. Collins, J. F. Kielkopf, K. G. Stassun, and F. V. Hessman, *Astron. J.*, **153**, 77, 2017.
4. J. Eastman, B. S. Gaudi, and E. Agol, *Proc. Astron. Soc. Pacif.*, **125**, 83, 2013.

<sup>1</sup><https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/>

## Калькулятор экспозиций «Спектр-УФ»: первая web-версия для пользователей

Цуриков Г.Н.<sup>1</sup>, Сичевский С.Г.<sup>1</sup>, Шмагин В.Е.<sup>1</sup>, Никоноров И.Н.<sup>1,2</sup>, Шустов Б.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Создаваемая в России крупная космическая обсерватория «Спектр-УФ» предназначена для получения изображений и спектров космических объектов в недоступном для наблюдений наземными инструментами ультрафиолетовом участке электромагнитного спектра: 115–310 нм. Обсерватория планируется к запуску в конце 20-х годов, и уже начата подготовка потенциальных пользователей к эффективной работе с ней. Необходимой составляющей обсерватории для планирования и реализации научной программы (подготовка заявок и составление программы наблюдений) является специальное программное обеспечение, которое позволяет оценить возможность регистрации сигнала от интересующего астрономического объекта. Исторически такое программное обеспечение называют калькулятором экспозиций. В рамках подготовки к запуску обсерватории «Спектр-УФ» создана первая версия калькулятора экспозиций с возможностью работы через web-интерфейс. При разработке данного программного обеспечения использовался опыт других миссий (прежде всего космической обсерватории «Хаббл» (HST)). В работе представлены основные возможности калькулятора экспозиций «Спектр-УФ». Поскольку это первая публикация о калькуляторе, в ней приведена краткая справка по научным приборам обсерватории и лежащие в основе программ калькулятора математические выражения, характеризующие процесс регистрации сигнала. На основе реальных примеров обсуждается возможность осуществления режимов фотометрии и спектроскопии точечных и протяженных астрономических объектов с использованием различных научных приборов обсерватории. Также обсуждаются планы развития данного калькулятора.

Поступила в редакцию 27.05.2024 г. Принята в печать 16.08.2024 г.

*Ключевые слова:* космическая обсерватория, ультрафиолетовая астрономия, проект «Спектр-УФ»

### “Spektr-UF” exposure calculator: the first web version for users

Tsurikov G.N.<sup>1</sup>, Sychevsky S.G.<sup>1</sup>, Shmagin V.E.<sup>1</sup>, Nikonorov I.N.<sup>1,2</sup>, Shustov B.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Kazan federal university, Kazan, Russia

The large space observatory Spektr-UF, being created in Russia, is designed to obtain images and spectra of space objects in an ultraviolet region of the electromagnetic spectrum (115–310 nm) that is inaccessible to observations by ground-based instruments. The observatory is planned to be launched in the late 20s and the training of potential users for effective work with it has already begun. A necessary component of the observatory for planning and implementing a scientific program (preparation of applications and preparation of an observation program) is special software that allows one to evaluate the possibility of registering a signal from an astronomical object of interest. Historically, such software is called an exposure calculator. In preparation for the launch of the Spektr-UF observatory, the first version of the exposure calculator has been created with the option to work via a web interface. The experience of other missions (primarily the Hubble Space Telescope, HST) was used to develop of this software. The paper presents the main features of the Spektr-UF exposure calculator. Since this is the first publication about the calculator, it provides a brief reference to the scientific instruments of the observatory and the mathematical expressions underlying the calculator programs that characterize the signal registration process. Based on real examples, the possibility of implementing photometry and spectroscopy modes of point and extended astronomical sources using various scientific instruments of the observatory is discussed. Plans for the improvement of this calculator are discussed too.

Received 27.05.2024. Accepted 16.08.2024.

*Keywords:* Near-Earth asteroids, dynamic evolution of asteroids

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.1.003

## 1. Введение

Наблюдения объектов Вселенной в ультрафиолетовом (УФ) участке электромагнитного спектра возможны только с помощью космических аппаратов. Такие наблюдения дают важные (в т. ч. уникальные, т. е. не получаемые другими методами) научные данные. Поэтому за последние 55 лет в мире проведены многие десятки космических экспериментов по наблюдениям в УФ диапазоне, главным образом в участке спектра 91–310 нм.

В обзоре [1] перечисляются некоторые уникальные астрономические открытия, полученные методами УФ астрономии в предыдущие годы, такие как, например, обнаружение молекул  $H_2$  в космосе, открытие горячей фазы межзвездной среды (МЗС), определение относительного содержания дейтерия к водороду в различных космических объектах, выявление резервуара скрытых барионов в ближней Вселенной, выявление природы процессов, протекающих во внешних областях атмосфер планет-гигантов. Эти открытия

были сделаны в основном на космических УФ обсерваториях (Copernicus, IUE, FUSE, HST), созданных специалистами NASA и ESA. Особенно большой вклад внесла обсерватория HST.

Советские ученые и специалисты по космической технике также добились в этом направлении значительных достижений. С помощью обсерватории «Астрон» (1983–1989 гг.), на борту которой базировался крупнейший в те годы космический телескоп (КТ) «Спика» с апертурой 80 см, был получен ряд важных результатов: определен темп истечения вещества из звезд различных спектральных классов; определено содержание химических элементов в атмосферах необычных (пекулярных) звезд классов Ar и Am; выявлены свойства нестационарных звезд (например, карликовых новых), квазаров и галактик, галактических туманностей и диффузного ультрафиолетового излучения Галактики (см. [2]). С помощью обсерватории «Астрон» удалось пронаблюдать такие явления, как водяная кома кометы Галлея с 1985 по 1986 г. и вспышка сверхновой в Большом Магеллановом облаке в конце февраля 1987 г. (SN1987A).

Успех обсерватории «Астрон» вдохновил отечественных ученых и специалистов по космической технике на создание более крупной многофункциональной УФ-обсерватории, сравнимой по возможностям с обсерваторией HST. Проект получил название «Спектр-УФ» и стал одним из проектов серии «Спектр» Федеральной космической программы (ФКП) наряду с проектами «Спектр-Р» (Радиоастрон) и «Спектр-РГ». «Спектр-УФ» привлек большое внимание международной научной общественности, и изначально (в 1990-е годы) целый ряд стран выразил желание участвовать в данном проекте. По предложению образовавшейся международной группы проект получил второе (международное) название World Space Observatory — Ultraviolet (WSO-UV, «Всемирная космическая обсерватория — Ультрафиолет»).

К сожалению, изменившаяся геополитическая обстановка привела к практически полному прекращению международного сотрудничества по проекту. На данный момент все технические проекты комплекса научных приборов «Спектр-УФ» приняли окончательный вид. В состав комплекса научной аппаратуры (КНА) обсерватории «Спектр-УФ» входят [3, 4]:

- Телескоп Т-170М с основными параметрами: апертура 170 см, относительное отверстие —  $f/10$ , диаметр поля зрения —  $30'$ , которые обеспечивают дифракционное качество изображения в центре поля [5];
- Блок спектрографов (БС), состоящий из: вакуумного ультрафиолетового эшелювого спектрографа ВУФЭС ( $R \sim 50000$ ) для работы в диапазоне длин волн 115–176 нм, эшелювого спектрографа для работы в ближнем УФ диапазоне УФЭС ( $R \sim 50000$ , 174–310 нм) и спектрографа с длинной щелью СДЩ ( $R \sim 1000$ , 115–305 нм), обладающего пространственным разрешением  $0.5-1''$  [6];
- Блок камер поля (БКП), включающий в себя три канала с различными рабочими спектральными диапазонами: ВУФ (115–176 нм), БУФ (150–320 нм), УФО (180–1000 нм). БКП предназначен для задач фотометрии с высоким угловым разрешением и большим полем зрения. С его помощью также возможно проводить спектральные наблюдения с низким спектральным разрешением [7, 8];
- Блок управления научными данными (БУНД);
- Научная аппаратура «Конус-УФ» — небольшой детектор гамма-излучения, разработанный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и уже неоднократно успешно использованный в космосе в других проектах [9].

Актуальные изменения конструкции и характеристик научных приборов БКП и БС подробно описаны в работах [7] и [10], соответственно.

На рис. 1 схематически представлен состав КНА обсерватории «Спектр-УФ».

После успешного запуска в 2019 г. астрофизической обсерватории «Спектр-РГ» проект «Спектр-УФ» перешел в разряд пусковых. Этим объясняется то, что к проекту привлечено особое внимание. Обсерватория планируется к запуску в конце 20-х годов, и уже начата подготовка потенциальных пользователей к эффективной работе с ней. Необходимой составляющей обсерватории для планирования и реализации научной программы (подготовка заявок и составление программы наблюдений) является специальное программное обеспечение, которое позволяет оценить возможность регистрации сигнала от интересующего астрономического объекта. Исторически такое программное обеспечение называют калькулятором экспозиций.

Работа над созданием обсерватории «Спектр-УФ» началась давно, и, конечно, определенные усилия были потрачены на разработку калькулятора(ов) экспозиций. В работах [11, 12] для обсерватории «Спектр-УФ» были представлены калькуляторы экспозиций, предназначенные для планирования фотометрических наблюдений с использованием блока камер поля. Однако с течением времени состав зарубежных исполнителей менялся и соответственно проводились замены исполнителей на российских, вызвавшие необходимость изменений конструкции научного оборудования обсерватории (см., например, [13, 10, 7]). Поэтому разработанные программы требовали обновления или замены. Более того, до настоящего момента отсутствовал калькулятор экспозиций, предназначенный для планирования спектральных наблюдений с использованием блока спектрографов «Спектр-УФ».

В рамках подготовки к запуску обсерватории «Спектр-УФ» для эффективного использования создана первая версия полнофункционального калькулятора экспозиций с возможностью работы через web-

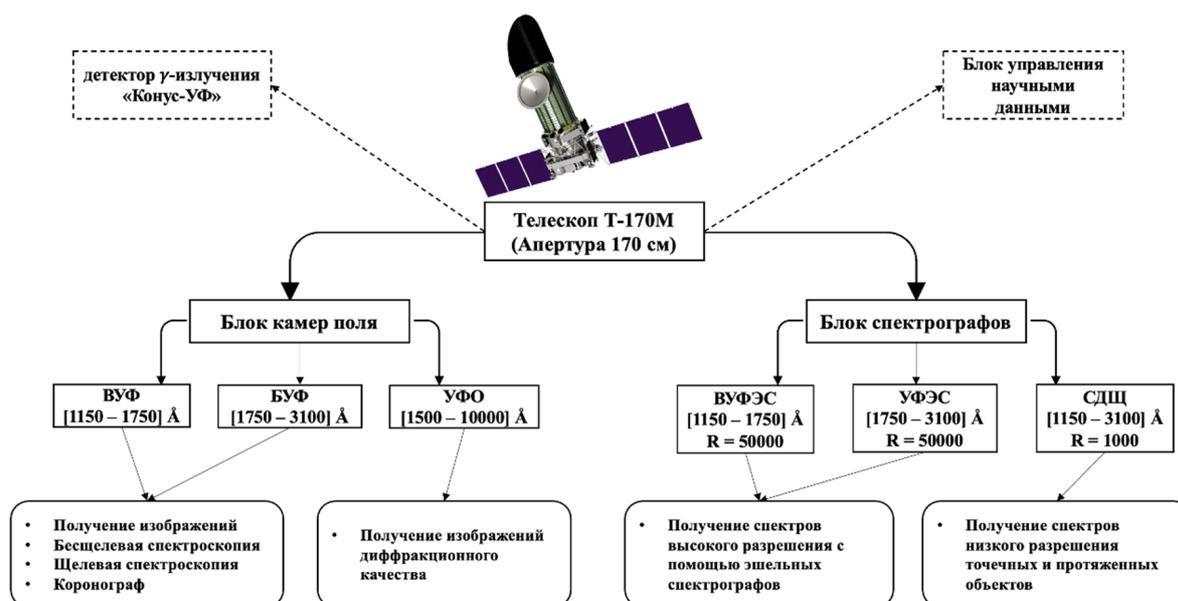


Рис. 1: Структура комплекса научной аппаратуры космической обсерватории «Спектр-УФ».

интерфейс. При разработке этого программного обеспечения естественно использовался опыт других миссий (прежде всего HST<sup>1</sup>).

В данной работе представлены основные возможности калькулятора экспозиций «Спектр-УФ». В разделе 2 представлена структура калькулятора экспозиций и приводится описание математической модели данного калькулятора. В разделе 3 приведены примеры планирования экспериментов — фотометрических и спектральных наблюдений точечных и протяженных объектов с использованием разработанного калькулятора. Также обсуждаются полученные результаты. Основные выводы данной работы представлены в разделе 4.

## 2. Структура и математическая модель калькулятора экспозиций «Спектр-УФ»

### 2.1. Структура калькулятора экспозиций

Калькулятор экспозиций «Спектр-УФ»<sup>2</sup> состоит из двух подпрограмм: FCU Imaging ETC (предназначена для планирования фотометрических наблюдений точечных и протяженных астрономических объектов) и WUVS Spectroscopic ETC (предназначена для планирования спектральных наблюдений объектов). Каждая из этих программ имеет два режима работы:

1. Расчет отношения сигнала к шуму  $S/N$  для наблюдений выбранного астрономического объекта при заданном времени экспозиции  $t_{\text{exp}}$ ;
2. Расчет времени экспозиции, необходимого для наблюдения астрономического объекта с заданным отношением  $S/N$ .

На рис. 2 представлена структура калькулятора экспозиций «Спектр-УФ». Как можно заметить из сравнения рис. 1 и 2, практически все функции, выполняемые калькулятором, соответствуют задачам отдельных научных приборов обсерватории, за исключением режимов «Спектроскопия» и «Коронаграф» блока камер поля [7].

Чтобы реализовать режимы работы калькулятора экспозиций, необходимо задать набор начальных данных и условий, который включает в себя:

1. Выбор измерительного канала и входящих в него научных приборов обсерватории.
2. Выбор параметров экспозиции (отношения  $S/N$ , времени экспозиции  $t_{\text{exp}}$ , а также длины волны  $\lambda$  в случае планирования спектральных наблюдений) и типа астрономического объекта (протяженный или точечный).
3. Использование спектрального распределения исследуемого астрономического объекта,  $F(\lambda)$  (единицы измерения эрг/(см<sup>2</sup> с Å) для точечного источника и эрг/(см<sup>2</sup> с Å угл. сек<sup>2</sup>) для протяженного источника). В калькуляторе экспозиций реализованы следующие варианты задания данного распределения:

<sup>1</sup><https://www.stsci.edu/hst>

<sup>2</sup><http://etc.wso-uv.org>



Рис. 2: Структура калькулятора экспозиций «Спектр-УФ».

- Загрузка собственного спектра объекта или выбор спектра звезды определенного спектрального класса из баз данных Castelli et al. (2003) [14], Pickles (1998) [15] и Kurucz (1993) [16], опубликованных в [17]<sup>3</sup>. Отметим, что:
  - Из базы данных моделей звездных атмосфер [14] на выбор доступны спектры звезд спектральных классов O3–M2 со следующими параметрами: эффективной температурой в диапазоне 3 000–45 000 К, ускорением силы тяжести на поверхности  $\log(g) \in [2; 5]$ , металличностью  $\log(Z) = 0$ .
  - В базе данных [15] спектр звезды определенного спектрального класса представляет собой комбинацию реальных спектров разных звезд, взятых из различных работ. Из данной базы данных на выбор доступны спектры звезд спектральных классов O5–M5 с эффективной температурой 3000–40000 К и солнечной металличностью.
  - Из базы данных звездных атмосфер [16] на выбор доступны спектры звезд спектральных классов O3–M5 с эффективной температурой 3 200–52 000 К, ускорением силы тяжести на поверхности  $\log(g) \in [0; 5]$ , металличностью  $\log(Z) \in [-5; +1]$ .
- Одним из недостатков представленных баз данных является отсутствие нетепловой составляющей излучения в спектрах звезд как ранних, так и поздних спектральных классов.
- Выбор спектрального распределения незвездных объектов: эллиптических, спиральных галактик из работ [18, 19] и базы данных [17]; галактик со вспышкой звездообразования из [20, 19]; квазара из работы [21] (спектр составлен на основе наблюдений на обсерватории HST со спектрографом FOS (Faint Object Spectrograph)); туманности Ориона и планетарной туманности NGC 7009 из базы данных [17];
- Выбор спектрального распределения звезд-стандартов для обсерватории HST из [22, 17]. Для выбора доступны составные спектры белых карликов, суб-карликов, и звезд главной последовательности, включая Солнце, полученные на спектрографах обсерватории HST, а также из наземных наблюдений.
- Использование чернотельного спектра  $F(\lambda) = (2hc^2)/\lambda^5 \times 1/(e^{(hc/\lambda kT)} - 1)$  с заданной эффективной температурой  $T$  объекта. Также можно использовать степенной спектр  $F(\lambda) = \lambda^{-n}$  с заданным показателем степени  $n$  или плоский спектр  $F(\lambda) = \text{const}$ ;
- Использование эмиссионной спектральной линии,  $F(\lambda) = F_{\text{line}}/(\sigma\sqrt{2\pi}) \times \exp(-(\lambda - \lambda_c)^2/(2\sigma^2))$ ,  $\sigma = FWHM/(2\sqrt{2\ln 2})$ , при этом задается длина волны  $\lambda_c$  в центре линии, интегральный поток в линии  $F_{\text{line}}$  и полная ширина линии на полувысоте  $FWHM$ .

<sup>3</sup><https://archive.stsci.edu/hlsp/reference-atlases>

4. Нормализацию заданного модельного спектрального распределения астрономического объекта на его видимую звездную величину в фильтре V [11, 12] по формуле:

$$F_\lambda = SED_\lambda \times 10^{(-0.4m_V)} \times \frac{\int_\lambda R_{\lambda V} \times SED_\lambda^{\text{Vega}} d\lambda}{\int_\lambda R_{\lambda V} \times SED_\lambda d\lambda}, \quad (1)$$

где  $SED_\lambda$  — заданное спектральное распределение объекта,  $m_V$  — видимая звездная величина,  $R_{\lambda V}$  — пропускная способность фильтра V на данной длине волны,  $SED_\lambda^{\text{Vega}}$  — спектральное распределение Веги. Нормализация делается в предположении, что видимая звездная величина Веги равна нулю. Стоит отметить, что нормализация на звездные величины в других фильтрах будет доступна в последующих версиях калькулятора экспозиций «Спектр-УФ». Нормализацию также можно провести на спектральный поток  $F_{\text{norm}}$  на заданной длине волны  $\lambda_{\text{set}}$ :

$$F_\lambda = SED_\lambda \times \frac{F_{\text{norm}}(\lambda_{\text{set}})}{SED_\lambda(\lambda_{\text{set}})}. \quad (2)$$

5. Учет изменения длины волны из-за красного смещения  $z$  при помощи известного соотношения  $\lambda_{\text{obs}} = (1+z)\lambda_{\text{rest}}$ , а также учет межзвездного поглощения при помощи стандартной формулы  $F_\lambda = F_\lambda^{\text{source}} * \exp(-A_V/1.086)$ , где  $A_V = R_V \times E(B-V)$ , а  $E(B-V)$  — заданное значение избытка цвета. Для учета межзвездного поглощения в данной версии калькулятора экспозиций используется кривая экстинкции в Галактике при  $R_V = 3.1$  из работы [23]. Данная кривая, однако, не является универсальной для разных направлений в Галактике. Поэтому в последующих версиях калькулятора экспозиций будут использоваться и другие кривые межзвездного поглощения.
6. Учет зодиакального света и свечения атмосферы Земли. Для этого используется спектральное распределение интенсивности зодиакального света из работы [24] для трех значений поверхностной яркости: 22.1 зв. вел./угл. сек<sup>2</sup> (высокий уровень зодиакального света); 22.7 зв. вел./угл. сек<sup>2</sup> (средний уровень); 23.3 зв. вел./угл. сек<sup>2</sup> (низкий уровень). Кроме того, имеется возможность нормализации интенсивности зодиакального света на заданную поверхностную яркость в фильтре V,  $F_\lambda^{\text{zodii}} = SED_\lambda^{\text{zodii}} \times 10^{(-0.4(m_V - 22.1))}$ . Стоит отметить, что поверхностная яркость зодиакального света, строго говоря, зависит от направления наблюдений (см., например, [25], где данная величина приводится в виде таблицы в зависимости от гелио-эклиптической долготы и эклиптической широты). Поэтому в будущих версиях данной программы планируется учитывать вклад зодиакального света для конкретных объектов, используя результаты работы программы «Калькулятор зоны засветки» [11], в которой для данного астрономического объекта и определенного момента времени наблюдений производится расчет интенсивности зодиакального света.

Спектр свечения экзосферы Земли в ультрафиолетовом спектральном диапазоне с учетом наиболее интенсивных геокорональных спектральных линий H I Ly $\alpha$  (1216Å), триплета O I (1302.2, 1304.9 и 1306.0Å), O I (1356Å) и O II (2471Å) задается согласно данным STIS Instrument Handbook проекта HST [26]. Использование данного спектра является, однако, грубым приближением, так как орбиты HST и «Спектр-УФ» значительно различаются и, соответственно, потоки в указанных спектральных линиях для обсерватории «Спектр-УФ» будут иметь другие значения. Особенно большое различие ожидается в потоке геокорональной линии H I Ly $\alpha$  (1216Å) (для орбиты «Спектр-УФ» он будет намного меньше чем для HST). Актуальный спектр свечения Земли, таким образом, будет учтен в следующих версиях калькулятора экспозиций.

## 2.2. Математическая модель калькулятора экспозиций

На основе заданных параметров, а также известных характеристик научных приборов КНА обсерватории «Спектр-УФ» в калькуляторе экспозиций далее последовательно вычисляется отношение  $S/N$  от астрономического объекта при заданном времени экспозиции  $t_{\text{exp}}$ :

$$S/N = \frac{Ct_{\text{exp}}}{\sqrt{Ct_{\text{exp}} + (B_{\text{det}} + B_{\text{sky}})N_{\text{pix}}t_{\text{exp}} + \frac{N_{\text{pix}}}{N_{\text{bin}}}N_{\text{read}}R^2}} \quad (3)$$

или же наоборот, при заданном  $S/N$  вычисляется  $t_{\text{exp}}$ , необходимое для достижения заданного отношения  $S/N$ :

$$t_{\text{exp}} = \frac{(S/N)^2(C + N_{\text{pix}}(B_{\text{det}} + B_{\text{sky}})) + \sqrt{(S/N)^4(C + N_{\text{pix}}(B_{\text{det}} + B_{\text{sky}}))^2 + 4(S/N)^2 * (\frac{N_{\text{pix}}}{N_{\text{bin}}}N_{\text{read}}R^2)}}{2C^2}, \quad (4)$$

где  $B_{\text{sky}}$  — фон неба,  $e^-/\text{пиксель}$ ;  $B_{\text{det}}$  — темновой ток детектора,  $e^-/\text{пиксель}$ ;  $N_{\text{pix}} = n_x \times n_y$  — количество пикселей по осям  $x$ ,  $y$ , на которых достигается определенный уровень приходящего сигнала<sup>4</sup>;  $N_{\text{bin}}$  — общее число объединенных пикселей, полученное в процессе считывания информации с ПЗС детектора (по умолчанию  $N_{\text{bin}} = 1$ );  $N_{\text{read}}$  — количество считываний детектора (по умолчанию  $N_{\text{read}} = 1$ );  $R$  — шум считывания,  $e^-$ ;  $C$  — полезный сигнал от астрономического объекта, который для разных задач вычисляется следующим образом:

- Для фотометрии точечного источника:

$$C = E_f \frac{1}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda} A_{\text{eff}}(\lambda) QE(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (5)$$

где  $A_{\text{eff}}(\lambda) = A * Q_{\text{tel}}(\lambda) * Q_{\text{cam}}(\lambda) * T(\lambda)$  — эффективная площадь комплекса «телескоп+камера» в  $\text{см}^2$ ;  $A = \frac{SH}{100} * \frac{\pi D^2}{4}$  — рабочая площадь телескопа в  $\text{см}^2$ ;  $SH$  — коэффициент экранирования в %;  $D$  — диаметр главного зеркала телескопа, см;  $Q_{\text{tel}}(\lambda)$  — пропускная способность телескопа;  $Q_{\text{cam}}(\lambda)$  — пропускная способность камеры;  $T(\lambda)$  — пропускная способность фильтра;  $QE(\lambda)$  — квантовая эффективность приемника;  $E_f$  — доля энергии, заключенная в квадратной площадке пикселей со стороной  $N_{\text{pix}}$ . После выбора пользователем площадки пикселей, с которой будет сниматься сигнал ( $1 \times 1, 2 \times 2, 3 \times 3, 5 \times 5, \dots, 101 \times 101$  пикселей) с использованием функции PSF рассчитывается  $E_f$ , заключенная в данной площадке;  $F_{\lambda}$  — поток от астрономического объекта, эрг/( $\text{см}^2 \text{ с } \text{\AA}$ ), заданный и нормализованный согласно процедурам, описанным в предыдущем разделе;  $h$  — постоянная Планка, эрг с;  $c$  — скорость света,  $\text{\AA}/\text{с}$ .

- Для фотометрии протяженного источника:

$$C = (p_{\text{sx}} * scale)(p_{\text{sy}} * scale) N_{\text{pix}} \frac{1}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} A_{\text{eff}}(\lambda) QE(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (6)$$

где  $p_{\text{sx}}, p_{\text{sy}}$  — размер пикселей в направлении  $x$  и  $y$ , соответственно, в микронах;  $scale$  — масштаб изображения,  $''/\text{микрон}$ ;  $I_{\lambda}$  — спектральное распределение энергии протяженного астрономического объекта с одной квадратной секунды (поверхностная яркость), эрг/( $\text{см}^2 \text{ с } \text{\AA} \text{ угл. сек}^2$ ).

- Для спектроскопии точечного астрономического объекта [26]:

$$C = E_{\text{fspec}} * F_{\lambda} * \frac{A_{\text{effspec}} * QE * d * \lambda}{hc} * N_{\lambda\text{pix}}, \quad (7)$$

где  $E_{\text{fspec}}$  — доля энергии, заключенная в  $N_{\text{spix}}$  пикселей в направлении, перпендикулярном дисперсии;  $A_{\text{effspec}} = A * Q_{\text{tel}}(\lambda) * S_{\text{spec}}(\lambda)$ ,  $\text{см}^2$  — эффективная площадь комплекса «телескоп+спектрограф»;  $S_{\text{spec}}(\lambda)$  — эффективность спектрографа;  $d$  — дисперсия,  $\text{\AA}/\text{пиксел}$ ;  $N_{\lambda\text{pix}}$  — количество пикселей в направлении дисперсии.

- Для спектроскопии протяженного источника [26]:

$$C = I_{\lambda} * \frac{A_{\text{effspec}} * QE * d * \lambda}{hc} * scale_s * W * N_{\text{spix}} * N_{\lambda\text{pix}}, \quad (8)$$

где  $scale_s$  — масштаб изображения в направлении, перпендикулярном дисперсии,  $''/\text{пиксель}$ ;  $W$  — ширина щели в угловых секундах.

Вычисление фона неба производится аналогично выражениям (6) и (8) для задач фотометрии и спектроскопии, соответственно.

Стоит также отметить, что для эмиссионной спектральной линии при вычислении отношения  $S/N$  необходимо учитывать как поток в спектральной линии  $C_{\text{line}}$ , так и поток в континууме  $C_{\text{cont}}$ . Выражение (3) в этом случае преобразуется в

$$S/N = \frac{C_{\text{line}} t_{\text{exp}}}{\sqrt{(C_{\text{line}} + C_{\text{cont}}) t_{\text{exp}} + (B_{\text{det}} + B_{\text{sky}}) N_{\text{pix}} t_{\text{exp}} + \frac{N_{\text{pix}}}{N_{\text{bin}}} N_{\text{read}} R^2}}. \quad (9)$$

### 2.3. Вывод результатов

Каждый расчет с использованием математической модели калькулятора экспозиций (выражения (1)–(9)) завершается выводом следующих результатов:

<sup>4</sup>По умолчанию, согласно функции рассеяния точки PSF, этот уровень соответствует 80% сигнала для площадки  $5 \times 5$  пикселей. Однако пользователю предоставлена возможность изменить размер данной площадки и, соответственно, уровень приходящего сигнала.

Exposure time (seconds) = 1200  
gives: SNR = 6.2615

Detailed Information	Count rate (counts/s)	Total counts (counts)	Associated noise (counts)
Counts (Region Type: Default)			
Source	0.063	75.295	8.677
Background	0.011	13.059	3.614
Sky	0.001	1.059	1.029
Dark Current	0.010	12.000	3.464
Total in selected region	0.074	88.354	9.400

**Instrument name:** fcu  
Mode: imaging  
Detector: nuv  
Bandpass: F255W CLEAR2S

**Target: [point source]**  
Spectrum: Castelli and Kurucz Models F0V\_g40  
Extinction E(B-V): 0.0  
Normalization: Renormalized to vegamag = 23.5 in filter Johnson/V  
Redshift: 0.0  
Emission Lines: NONE

**Selected background:**  
Sky Background:  
Earth Shine: EarthshineStandard  
Zodiacal Light: ZodiStandard Average  
Air Glow: Average

Рис. 3: Пример вывода результатов программы FCU Imaging ETC калькулятора. В верхней части рисунка показаны значения времени экспозиции и отношения  $S/N$ .

1. Отношения  $S/N$  или времени экспозиции  $t_{\text{exp}}$  в зависимости от выбранного режима;
2. Таблицы с детальной информацией о расчете (значения полезного сигнала от астрономического объекта, фона неба, темнового тока, а также суммарного шумового сигнала в отсчетах/с; полное количество отсчетов за время экспозиции; отношение  $S/N$ );
3. Таблицы с введенными пользователем начальными данными;
4. Графиками:
  - Нормированного (в случае нормализации) спектрального распределения астрономического объекта;
  - Наблюдаемого потока от астрономического объекта в отсчетах/с;
  - Пропускной способности оптической системы;
  - Зависимости времени экспозиции от отношения  $S/N$ ;
  - Зависимости отношения  $S/N$  от длины волны (в случае планирования спектральных наблюдений).

### 3. Примеры работы калькулятора экспозиций

С помощью разработанного калькулятора экспозиций «Спектр-УФ» нами были проведены расчеты отношения  $S/N$  и времени экспозиции для различных задач фотометрии и спектроскопии. В этом разделе представлены результаты данных расчетов.

### 3.1. Фотометрия слабого точечного источника

Рассмотрим в качестве примера наблюдения звезды спектрального класса F0V с видимой звездной величиной  $23.5^m$ , эффективной температурой 7250 K,  $\log(g) = 4$ , солнечной металличностью и спектром, взятым из базы данных [14]. Произведем расчет отношения  $S/N$ , которое можно достигнуть с использованием канала БУФ блока камер поля Спектр-УФ и фильтром F255W [7] за 20 минут экспозиции. Предположим также средний уровень зодиакального света ( $22.7$  зв. вел./угл. сек<sup>2</sup>). При расчете используем площадку из пикселей  $5 \times 5$ , в которой сконцентрировано 80% приходящего сигнала.

Чтобы получить значение  $S/N$  для данной задачи, в программе FCU Imaging ETC калькулятора последовательно выполняются следующие действия: нормализация модельного спектра на заданную видимую звездную величину в фильтре V (1), расчет полезного сигнала от астрономического объекта (5), расчет приходящего сигнала от зодиакального света и свечения экзосферы Земли (аналогично выражению (6)) и, наконец, расчет отношения  $S/N$  (3).

На рис. 3 и 4 представлены детальные результаты данных расчетов. На рис. 3 в верхней части рисунка показаны значения времени экспозиции и отношения  $S/N$ . Ниже на рисунке представлена таблица с детальной информацией о расчете и таблица с заданными начальными данными. На рис. 4 представлен пример вывода результатов программы FCU Imaging ETC калькулятора. Приведены графики различных зависимостей: нормализованный на звездную величину  $23.5^m$  в фильтре V спектр звезды спектрального класса F0V из базы данных [14]; вычисленный полезный сигнал (спектр) от данного астрономического объекта в отсчетах/с в фильтре F255W для канала БУФ; зависимость пропускания канала БУФ от длины волны. На правом нижнем графике для удобства пользователя показана зависимость времени экспозиции от отношения  $S/N$  для рассматриваемой задачи.

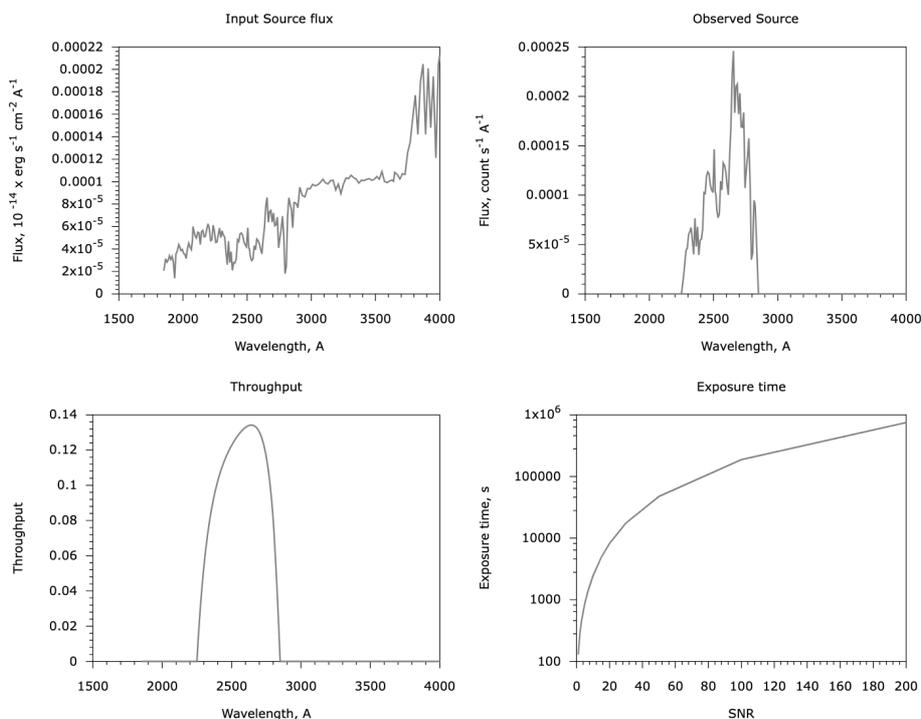


Рис. 4: Пример вывода результатов программы FCU Imaging ETC калькулятора. На левом верхнем графике показан нормализованный на звездную величину  $23.5^m$  в фильтре V спектр звезды спектрального класса F0V из базы данных [14]. На правом верхнем графике показан вычисленный полезный сигнал от данного астрономического объекта в отсчетах/с в фильтре F255W для канала БУФ. На левом нижнем графике показана пропускная способность всего канала БУФ. На правом нижнем графике, для удобства пользователя, показана зависимость времени экспозиции от отношения  $S/N$  для рассматриваемой задачи.

На рис. 4 (левая верхняя панель) виден недостаток использования базы данных [14] в УФ диапазоне, т. к. в этой базе отсутствуют спектральные распределения на длинах волн  $< 1800 \text{ \AA}$  для звезд более поздних спектральных классов, чем класс A. Рассчитанное отношение  $S/N$  для данной задачи составило 6.2. Аналогичные расчеты с помощью калькуляторов экспозиций камер ACS HRC<sup>5</sup> (использовался доступный фильтр

<sup>5</sup><https://etc.stsci.edu/etc/input/acs/imaging>

F250W) и WF3C UVIS<sup>6</sup> (использовался фильтр F270W) обсерватории HST показали сравнимые результаты:  $S/N = 2.8$  и  $S/N = 7.2$ , соответственно.

Представленный пример характерен тем, что показывает ограничения наблюдательных возможностей в ближнем ультрафиолетовом канале блока камер поля обсерватории «Спектр-УФ». Аналогичным образом можно показать ограничения и других каналов БКП. Так, на рис. 5 показана зависимость времени экспозиции, необходимого для регистрации потока от звезды спектрального класса O5V с различными значениями отношения  $S/N$  в каналах ВУФ (используется фильтр F115LP), БУФ (фильтр F255W) и УФО (F555W), от видимой звездной величины этой звезды. Также в табл. 1 представлены минимальные значения видимой звездной величины для звезд спектральных классов O3V, A0V, G0V, для которых за 3 600 с можно получить  $S/N = 10$  в разных каналах и фильтрах БКП.

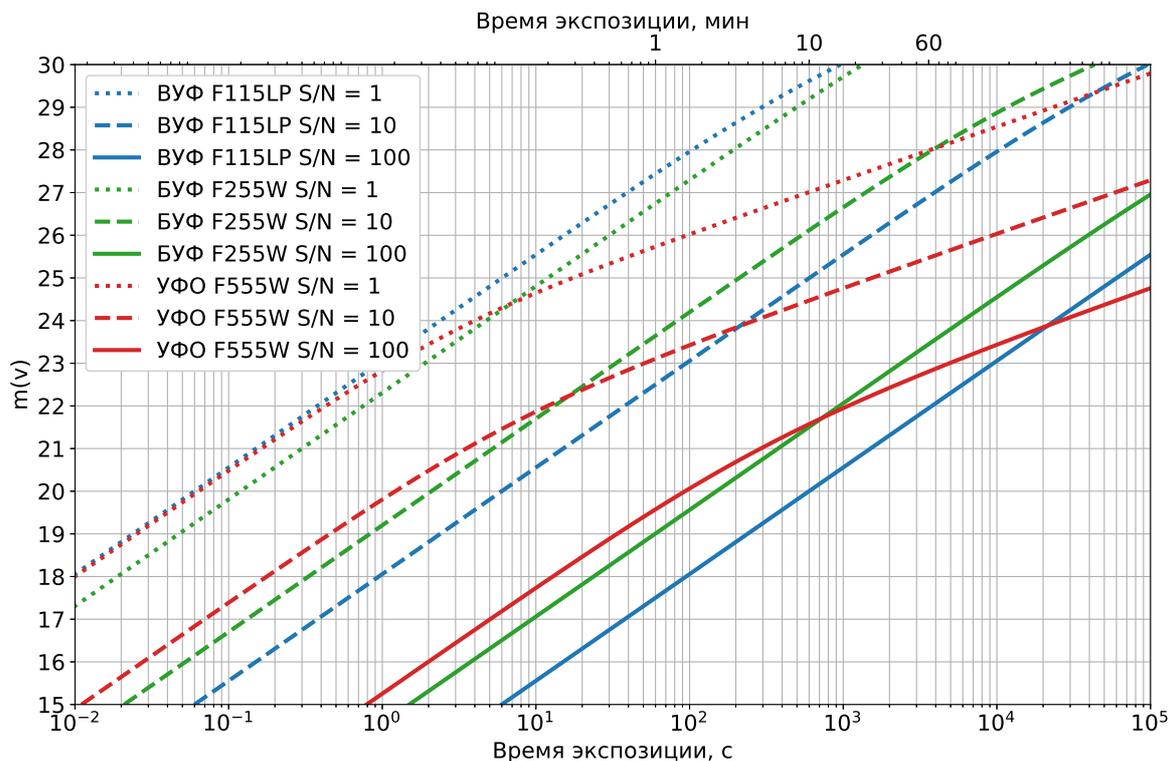


Рис. 5: Зависимость времени экспозиции от видимой звездной величины для звезды спектрального класса O5V при наблюдении данного объекта в каналах ВУФ с фильтром F115LP, БУФ с фильтром F255W, УФО с фильтром F555W — при заданных значениях  $S/N = 1, 10, 100$ . Верхняя шкала по оси абсцисс указана в минутах, нижняя — в секундах.

Из представленных результатов следует, что с помощью космической обсерватории «Спектр-УФ» потенциально возможно решать задачи фотометрии слабых точечных астрономических объектов с видимой звездной величиной в среднем до  $26^m$ – $27^m$ . Это ограничение, однако, зависит от множества факторов, в частности от пропускной способности фотометрического канала и выбранного фильтра, а также от спектра и физических параметров самого астрономического объекта. Стоит также отметить, что на рис. 5 для канала УФО наблюдается резкий рост наблюдательного времени для звезд слабее  $21^m$ – $23^m$ . Такой рост вызван тем, что для более слабых потоков от астрономического объекта полезный сигнал от данного объекта (см. выражение (5)) становится меньше темнового тока, который для рассматриваемого канала составляет  $0.3 \text{ e}^-/\text{с}/\text{пиксель}$ . Аналогичное увеличение времени экспозиции можно заметить и для каналов ВУФ и БУФ для видимых звездных величин  $28^m$ – $30^m$ . Значения темнового тока в данных каналах меньше, чем в канале УФО, и составляют  $4 \times 10^{-5}$  и  $4 \times 10^{-4} \text{ e}^-/\text{с}/\text{пиксель}$ , соответственно.

### 3.2. Фотометрия слабого протяженного астрономического объекта

При наблюдении протяженных объектов нужно ориентироваться на требуемую глубину проработки деталей различного масштаба и подбирать время экспозиции соответственно. Зачастую разные участки протяжен-

<sup>6</sup><https://etc.stsci.edu/etc/input/wfc3uvis/imaging/>

ных объектов имеют значительно различающуюся поверхностную яркость. При планировании наблюдений таких объектов и расчете ожидаемого отношения  $S/N$  для нескольких характерных значений интенсивности, исследователь может не получить репрезентативный результат. Один из подходов — опереться на предварительные данные, например, на панорамный расчет отношения  $S/N$  по карте интенсивности, полученной из теоретических моделей. Он позволяет наглядно показать, какие детали морфологии объекта будут хорошо видны в кадре, и, тем самым, облегчает работу исследователю. В данном разделе представлен пример применения данного подхода к туманностям быстролетающих пульсаров.

Эжектирующие нейтронные звезды являются одними из самых интересных астрофизических объектов. Они рождают ультрарелятивистский замагниченный ветер, взаимодействие которого с окружающим веществом приводит к рождению целого ряда астрофизических проявлений. Среди них существует широкий класс туманностей, образованных быстролетающими пульсарами (англ. bow shock nebulae), которые покинули родительские остатки сверхновых и имеют скорости до полутора тысяч километров в секунду. В результате сверхзвукового движения пульсара через МЗС образуется течение сложной структуры, на внешней границе которого располагается головная ударная волна (подробно см., например, [27]), за которой рождается излучение. Отличие формы хвоста туманности от конуса Маха в линии  $H_\alpha$  по мнению многих авторов вызвано неоднородностями плотности МЗС. Например, магнитогидродинамическое моделирование в работе [28] подтверждает вариации в структуре ударной волны при различной форме таких неоднородностей. В статье [29] были впервые рассчитаны карты излучения в линии  $H_\alpha$  на основе гидродинамического моделирования с учетом охлаждения вещества, перешедшего через фронт ударной волны, вкупе с переменной плотностью МЗС.

За головной ударной волной температура может достигать  $10^6$  К, а характерное время ионизации вещества меньше времени пролета (см. в статье [29]), плотность вещества на сильной ударной волне увеличивается в 4 раза. Эти условия благоприятны для излучения в ультрафиолетовых линиях. Оценка возможности их наблюдения и предсказание особенностей является одной из актуальных задач для формирования научной программы наблюдений на обсерватории «Спектр-УФ».

На неоднородностях МЗС может происходить взаимодействие ударных фронтов, многократно повышая интенсивность излучения этих регионов в различных спектральных линиях. В работе [30] проведено 2D моделирование данного эффекта в рамках релятивистской гидродинамики. Пульсар движется перпендикулярно начальным возмущениям плотности МЗС с характерной длиной 0.1 пк, плотность среды  $(1 \pm 0.5) \text{ см}^{-3}$ . Параметрами моделей являются скорость нейтронной звезды относительно МЗС,  $V_{NS}$ , и показатель адиабаты в уравнении состояния идеального газа,  $\gamma$ . С помощью пакета программ «Шу» [31] по данным гидродинамических расчетов с подробным учетом ионизации были получены карты интенсивности (аналоги кадров в пространственных координатах, картинная плоскость повернута на  $12^\circ$  относительно направления движения пульсара).

Приемники каналов БКП обладают высоким угловым разрешением, однако при наблюдении объектов с низкой поверхностной яркостью, таких как туманности вокруг быстролетающих пульсаров, воспользоваться данным преимуществом не представляется возможным. Для получения приемлемого отношения  $S/N$  потребуется объединять группы пикселей в ходе пост-обработки. Так, если в соседних пикселях протяженный объект имеет одинаковую поверхностную яркость, то при объединении квадрата  $N_{\text{pix}} \times N_{\text{pix}}$  пикселей в один, отношение  $S/N$  в объединенном пикселе будет равно:

$$(S/N)_{\text{eff}} = (S/N) \sqrt{N_{\text{pix}} \times N_{\text{pix}}} = (S/N) N_{\text{pix}}.$$

Таблица 1: Предельные значения видимых звездных величин в фотометрических наблюдениях звезд при условии достижения  $S/N=10$  и при  $t_{\text{exp}} = 3600$  с. Спектры рассматриваемых звезд взяты из каталога [14].

Спектральный класс и параметры звезды	Каналы и фильтры блока камер поля		
	БУФ, F115LP $\lambda \geq 1550 \text{ \AA}$	БУФ, F255W $\lambda_c = 2550 \text{ \AA}$	УФО, F555W $\lambda_c = 2550 \text{ \AA}$
O5V ( $T_{\text{eff}} = 41\,000 \text{ K}$ , $\log(g) = 4.5$ , $\log(Z) = 0$ )	26.9	27.9	25.5
A0V ( $T_{\text{eff}} = 9\,500 \text{ K}$ , $\log(g) = 4.5$ , $\log(Z) = 0$ )	22	25	25.5
G0V ( $T_{\text{eff}} = 6\,000 \text{ K}$ , $\log(g) = 4.5$ , $\log(Z) = 0$ )	17*	22.6	25.6

\*Вообще говоря, использование модели [14] для спектрального распределения у более холодных звезд спектрального класса G в рассматриваемом диапазоне длин волн не является корректным, так как данная модель не учитывает нетепловое излучения хромосфер таких звезд в данном диапазоне.

В то же время масштаб изображения  $\beta$  (измеряется в  $''$ /пиксель) изменится как:  $\beta_{\text{eff}} = \beta \times N_{\text{pix}}$ , т. е. наименьший размер различимых деталей в кадре увеличится.

Так, например, при объединении пикселей в канале ВУФ БКП в области размером  $1'' \times 1''$  отношение  $S/N$  увеличится в  $\sim 33$  раза при масштабе изображения на приемнике  $0.03''$ /пиксель (см. характеристики блока камер Спектра-УФ [7]). В то же количество раз увеличится масштаб изображения. При характерной толщине структур в  $3 \times 10^{16}$  см (по данным рассчитанных моделей), их изображение попадет ровно в одну секунду при расстоянии до туманности 2 кпк. По данным каталога ATNF [32] на текущий момент все известные туманности быстролетающих пульсаров, наблюдаемые в оптическом диапазоне (полная выборка дана в обзоре [33]), за исключением PSR J1509-5850 (3.3 кпк), находятся в пределах данного расстояния. То же можно сказать о туманностях, наблюдаемых в ультрафиолетовом диапазоне (см. статьи [34, 35]).

Были рассчитаны карты отношения  $S/N$  на панорамном кадре в линии C IV 1550 Å (дублет 1548 Å и 1551 Å — яркий в остатках сверхновых, см. [36]). Они строились в тех же координатах, что и карты интенсивности  $I$ . Результаты расчетов для 3-часовой экспозиции в канале ВУФ представлены на рис. 6. Рассмотрены два значения расстояния до туманности: 0.5 и 2 кпк, а также бинирование с тремя значениями эффективного размера пикселя:  $1''$ ,  $2''$  и  $4''$ . Контурами обозначены регионы с  $S/N > 3$ . Стратегию наблюдений необходимо подбирать индивидуально под характеристики объекта, так как чрезмерное уменьшение бининга негативно скажется на отношении  $S/N$ , чрезмерное увеличение также не даст его прибавки и отрицательно скажется на разрешении, что, следуя из рис. 6, может затруднить детектирование объекта.

Для моделей с  $V_{NS} = 450$  км/с на типичном расстоянии 0.5 кпк ожидается наблюдение ярких «колец»-перемычек, отношение  $S/N$  в некоторых точках достигает 20. В моделях с  $V_{NS} = 1500$  км/с ожидается наблюдение «пятен» на внешних границах колец,  $S/N$  в них достигает 5. В модели с  $V_{NS} = 150$  км/с нет участков с отношением  $S/N = 3$  и более.

Если увеличить время экспозиции в 10 раз, т. е. до 30 часов, отношение  $S/N$  увеличится приблизительно в 3 раза. При  $V_{NS} = 450$  км/с ожидается регистрация не только «колец», но и внешней границы «пузырей». В моделях с  $V_{NS} = 1500$  км/с «пятна» станут больше, возможно их соединение по «кольцам». В модели с  $V_{NS} = 150$  км/с ожидается регистрация некоторых областей на ударной волне. Рассмотрения также заслуживают линии C II 1335 Å, C III 1908 Å, C II 2326 Å. Это будет сделано в ходе дальнейшей работы.

Аналогичный подход может быть применим и для других объектов, и при наличии предварительно рассчитанных карт интенсивности позволит подобрать режимы наблюдений, подходящие для фотометрического картирования.

### 3.3. Спектроскопия точечного объекта

Рассмотрим задачу о получении спектра звезды спектрального класса O5V с видимой звездной величиной  $16^m$ , избытком цвета  $E(B - V) = 0.2$ , эффективной температурой 41 000 K,  $\log(g) = 4.5$ , солнечной металличностью и спектром из базы данных [14]. Определим время экспозиции, необходимое для регистрации спектрального распределения излучения данной звезды с помощью эшелле-спектрографа ВУФЭС ( $R = 50\,000$ ) с отношением  $S/N = 15$  на длине волны 1650 Å при среднем уровне зодиакального света. Для расчета полезного сигнала в соответствии с выражением (7) используется значение  $N_{\text{spix}} = 7$  пикселей, в которых сконцентрирована доля энергии приходящего сигнала  $E_{\text{f,spec}} = 0.8$ . Количество пикселей в направлении дисперсии равно 2. Рассчитанное  $t_{\text{exp}}$  для рассматриваемой задачи составило 15 750 с. Пример выводимых программой WUVS Spectroscopic ETC графических результатов показан на рис. 7. Расчеты для данной задачи были сделаны также с помощью калькуляторов экспозиций спектрографов STIS и COS космической обсерватории HST. Здесь  $t_{\text{exp}}$  составило 79 000 с при использовании спектрографа STIS [26] с решеткой E140M ( $R = 46\,800$ ) и 3 460 с при использовании спектрографа COS [37] с решеткой G160M ( $R = 24\,000$ ). Помимо спектрального разрешения, основной причиной различий в полученных результатах является различная пропускная способность рассмотренных измерительных каналов. Для сравнения, на рис. 8 приведены значения пропускной способности спектрографов ВУФЭС, COS G160M и STIS E140M. Значения данного параметра на длине волны 1650 Å составляют 0.8, 0.6 и 0.06%, соответственно.

В табл. 2, аналогичной табл. 1, представлены предельные значения звездных величин для спектральных наблюдений звезд разных спектральных классов с параметрами экспозиции:  $S/N = 15$ ,  $t_{\text{exp}} = 10\,800$  с. Из представленных результатов следует, что спектральные наблюдения высокого и низкого разрешения на обсерватории «Спектр-УФ» возможны для звезд с видимыми звездными величинами, не превышающими  $19^m$  и  $22^m$ , соответственно.

#### 3.3.1. Наблюдения эмиссионной спектральной линии

Для планирования спектральных наблюдений эмиссионной спектральной линии в калькуляторе экспозиции необходимо указать длину волны  $\lambda_c$  в центре линии, интегральный поток в линии  $F_{\text{line}}$ , а также полную

Таблица 2: Предельные значения видимых звездных величин в спектроскопических наблюдениях звезд при условии достижения  $S/N = 15$  и при  $t_{\text{exp}} = 10\,800$  с. Спектры рассматриваемых звезд взяты из каталога [14].

Спектральный класс и параметры звезды	Спектрографы обсерватории «Спектр-УФ»					
	ВУФЭС ( $R = 50\,000$ )		УФЭС ( $R = 50\,000$ )		СДЦ ( $R = 1000$ )	
	$\lambda = 1215 \text{ \AA}$	$\lambda = 1650 \text{ \AA}$	$\lambda = 1909 \text{ \AA}$	$\lambda = 2853 \text{ \AA}$	$\lambda = 1548 \text{ \AA}$	$\lambda = 2796 \text{ \AA}$
O5V ( $T_{\text{eff}} = 41\,000 \text{ K}$ )	15	16.6	18.5	18.9	21.4	22.3
A0V ( $T_{\text{eff}} = 9\,500 \text{ K}$ )	0.8**	12.6	14.9	16.3	17.2	19.4
G0V ( $T_{\text{eff}} = 6\,000 \text{ K}$ )	—**	1.7	8.3	13.7	4.5	16.5

\*\*Как отмечалось ранее, недостатком каталога [14] является отсутствие нетепловой составляющей излучения в дальнем ультрафиолетовом диапазоне для звезд более позднего спектрального класса. Поэтому, согласно результатам калькулятора экспозиций кажется, что наблюдения в этом диапазоне практически невозможны, но это не так.

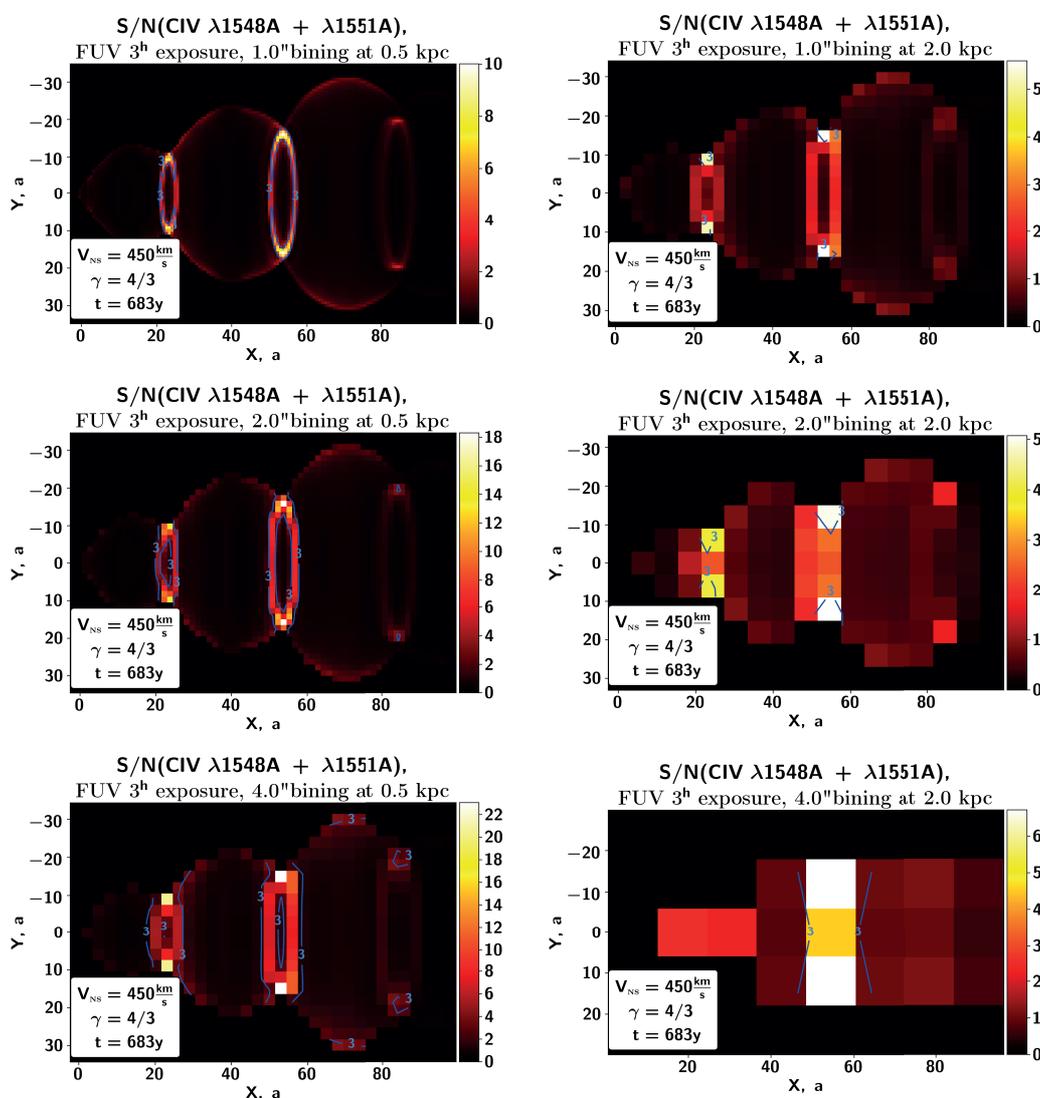


Рис. 6: Карты ожидаемого отношения  $S/N$  для наблюдения туманности вокруг быстролетающего пульсара (см. параметры в тексте) при скорости  $V_{NS} = 450$  км/с,  $\gamma = 4/3$  на обсерватории «Спектр-УФ» в канале ВУФ БКП с фильтром F150LP. Левый столбец: туманность на расстоянии 0.5 кпк, правый — 2 кпк. Ряды (сверху вниз): бининг  $1''$ ,  $2''$  и  $4''$ . Здесь  $a = 10^{16}$  см.

ширину линии на полувысоте  $FWHM$ . Расчет отношения  $S/N$  в данном случае производится согласно выражению (9).

Рассмотрим возможность наблюдения эмиссионной линии Si II 1810 Å у холодной звезды спектрального класса G2V с видимой звездной величиной 12<sup>m</sup> с помощью спектрографа УФЭС. Параметры спектральной линии зададим следующими [26, 38]:  $FWHM = 30$  км/с и  $F_{\text{line}} = 1 \times 10^{-14}$  эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Поток в континууме задается согласно модели [15] для звезды указанного спектрального класса. Согласно проведенным расчетам, за время  $t_{\text{exp}} = 1200$  с при помощи спектрографа УФЭС возможно достичь отношения  $S/N = 11$ . Для сравнения аналогичные расчеты, проведенные для спектрографов COS с решеткой G185M ( $R = 20\,000$ ) и STIS с решеткой E230M ( $R = 30\,000$ ), дали значения  $S/N$ , равные 17 и 3, соответственно. При этом значения пропускной способности на длине волны 1810 Å составляют: 2% для УФЭС, 1.3% для COS, 0.1% для STIS.

### 3.3.2. Планирование эксперимента для спектральных наблюдений атмосфер экзопланет

Наблюдения атмосфер экзопланет является одним из главных направлений исследования обсерватории «Спектр-УФ» [39, 40]. В то же время, прямая оценка возможности проведения таких наблюдений с помощью калькулятора экспозиций невозможна ввиду специфических наблюдательных особенностей данной задачи. Однако косвенно оценить отношение  $S/N$  для планирования таких наблюдений с помощью калькулятора возможно. Так, согласно методике [41], пропускание излучения родительской звезды в атмосфере планеты можно зарегистрировать на основе измерения потоков во время,  $F_{\text{in}}$ , и вне,  $F_{\text{out}}$ , первичного транзита. В этом случае отношение  $S/N$  зависит от глубины транзита и отношения  $S/N$  для звезды [41, 42, 43]:

$$S/N_p = \frac{F_{\text{out}} - F_{\text{in}}}{F_{\text{out}}} \frac{C_{\text{out}} t_{\text{exp}}}{\sqrt{2\sigma_{\text{total}}}} = f_A \frac{S/N_s}{\sqrt{2}}, \quad (10)$$

где глубина транзита

$$f_A = \frac{F_{\text{out}} - F_{\text{in}}}{F_{\text{out}}} = f(\lambda) = \frac{R_p^2}{R_s^2} \left( \frac{(R_p + h_{\text{eff}}(\lambda))^2}{R_p^2} - 1 \right), \quad (11)$$

$R_p$  и  $R_s$  — радиус планеты и звезды, соответственно;  $h_{\text{eff}}(\lambda) = \int_{z_1}^{z_2} (1 - e^{-\tau(\lambda)}) dz$  — эффективная высота атмосферы, которая показывает разницу между глубиной транзита без учета атмосферы,  $R_p^2/R_s^2$ , и реальной глубиной транзита (с учетом атмосферы),  $(R_p + h_{\text{eff}}(\lambda))^2/R_s^2$  (см., например, [42], рис. 1 в [43]);  $\tau(\lambda)$  — оптическая толщина атмосферы исследуемой экзопланеты на данном луче зрения;  $\sigma_{\text{total}}$  — полный дробовой и инструментальный шум, определяемый подкоренным выражением знаменателя в выражении (3);  $C_{\text{out}}$  — полезный сигнал от родительской звезды (см. выражение (7));  $S/N_s$  — отношение сигнал/шум для родительской звезды (величина, определяемая с помощью калькулятора экспозиций);  $\sqrt{2}$  — фактор, учитывающий, что сигнал вычисляется на основе разности потоков  $F_{\text{out}} - F_{\text{in}}$ .

Таким образом, с помощью калькулятора экспозиций можно оценить отношение  $S/N$  для родительской звезды и, зная глубину транзита, создаваемую атмосферой экзопланеты, определить отношение  $S/N$  при регистрации спектральных линий исследуемых элементов.

В качестве примера, определим наблюдательные ограничения для регистрации поглощения в линии H I Ly $\alpha$  атмосферой экзопланеты HD 209458 b (горячий юпитер) с помощью спектрографов ВУФЭС и СДЩ. Данная экзопланета является первой среди экзопланет, открытых транзитным методом [44, 45]. Кроме того, у данной экзопланеты впервые была обнаружена атмосфера [46] с помощью инструментов обсерватории HST. Впоследствии, по наблюдениям атмосферного поглощения в голубом крыле линии H I Ly $\alpha$  с помощью спектрографа STIS с решеткой G140M ( $R = 10\,000$ ) [47] у данной экзопланеты была обнаружена протяженная оболочка, выходящая за пределы полости Роша (соответствует 2.7 радиусам планеты). Глубина транзита,  $f_{A_{\text{pl+atm}}}$ , в синем и красном крыльях линии H I Ly $\alpha$ , согласно наблюдениям на данном спектрографе, составляет 6–9% [47, 48, 49]. Кроме того, аналогичный уровень поглощения наблюдался и на инструментах более низкого спектрального разрешения: спектрографе STIS с решеткой G140L ( $R = 1000$ ) [50], камере ACS обсерватории HST [51]. Данные инструменты не позволяют разрешить линию H I Ly $\alpha$ , однако с их помощью можно измерить интегральный поток в этой линии и его уменьшение.

Для расчетов мы использовали глубину транзита  $f_{A_{\text{pl+atm}}} = 0.077$ , полученную в работе [52] из вычислений с использованием 3D гидродинамического моделирования и модели переноса излучения, и хорошо совпадающую с наблюдениями. Зная отношение радиусов планеты и звезды  $R_p/R_s = 0.12086 \pm 0.00010$  [53], можно определить вклад в ослабление потока от родительской звезды только за счет атмосферы планеты  $f_{A_{\text{atm}}} = 0.062$ . Таким образом, согласно выражению (10), чтобы зарегистрировать поглощение в линии H I Ly $\alpha$  в атмосфере HD 209458 b с отношением  $S/N_p = 3$ , требуется зарегистрировать поток от родительской звезды с отношением  $S/N_s = 48$ . Следовательно, с помощью калькулятора экспозиций можно определить время экспозиции, необходимое для регистрации сигнала с таким отношением  $S/N$ .

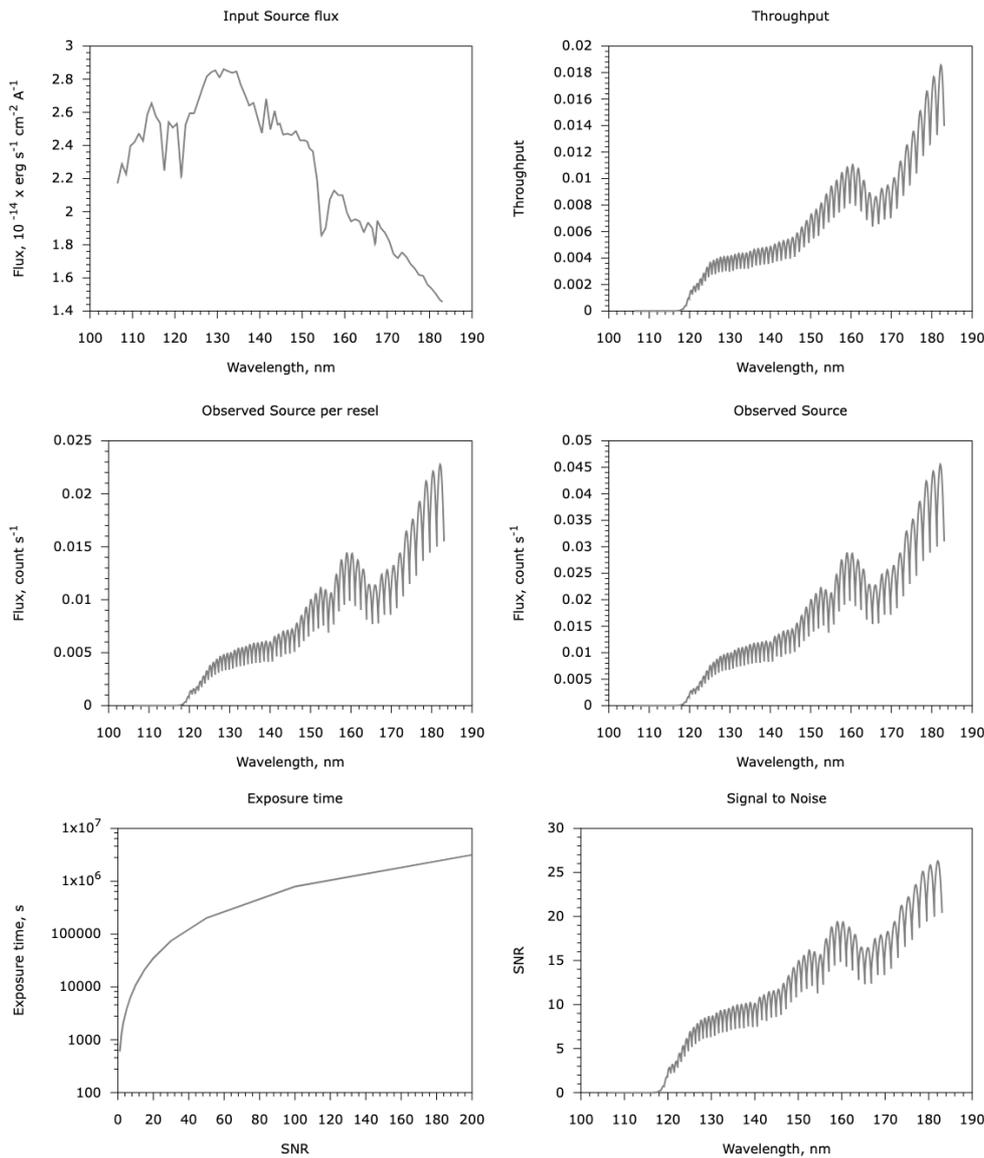


Рис. 7: Результаты работы калькулятора WUVS Spectroscopic ETC для задачи спектроскопии звезды спектрального класса O5V с помощью спектрографа ВУФЭС. На левом верхнем графике показан нормализованный на звездную величину  $16^m$  в фильтре V спектр звезды спектрального класса O5V из базы данных [14]. На правом верхнем графике показана пропускная способность измерительного канала. На левом и правом средних графиках показаны значения вычисленного полезного сигнала от астрономического объекта в отсчетах/с/элемент разрешения (элемент разрешения соответствует площадке  $N_{\text{spix}} \times N_{\text{lpix}} = 7 \times 2$  пикселей) и в отсчетах/с, соответственно. На левом нижнем графике для удобства пользователя показана зависимость времени экспозиции от отношения  $S/N$  для рассматриваемой задачи. На правом нижнем графике показана зависимость отношения  $S/N$  от длины волны для рассматриваемой задачи.

Из наблюдений на обсерватории HST известно, что интегральный поток в линии H I Ly $\alpha$  от родительской звезды HD 209458 ( $d = 48.3$  пк, спектральный класс — G0V) почти в 2 раза больше, чем от Солнца в период максимума солнечной активности (см., например, табл. 1 в [54]), но при этом невысок относительно потоков от других родительских звезд, наблюдаемых на данной обсерватории ([54], см. также рис. 3 в [55], [56]). Для расчета времени экспозиции мы параметризовали наблюдаемый поток [47, 56] от звезды HD 209458 в голубом крыле линии H I Ly $\alpha$ :  $\lambda_c = 1215.95 \text{ \AA}$ ,  $FWHM = 0.3 \text{ \AA}$ ,  $F_{\text{line}} = 1 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Согласно проведенным расчетам, для достижения  $S/N_s = 48$  и, соответственно,  $S/N_p = 3$  в синем крыле линии H I Ly $\alpha$  атмосферы HD 209458 b с помощью спектрографа ВУФЭС время экспозиции существенно превышает разумные значения ( $t_{\text{exp}} > 200$  часов). Для сравнения, аналогичные расчеты с использованием параметров спектрографа STIS с решеткой G140M показали, что наблюдательное время для решения данной задачи составляет 12 часов (4 транзита). Это согласуется с наблюдениями на обсерватории HST [47], в кото-

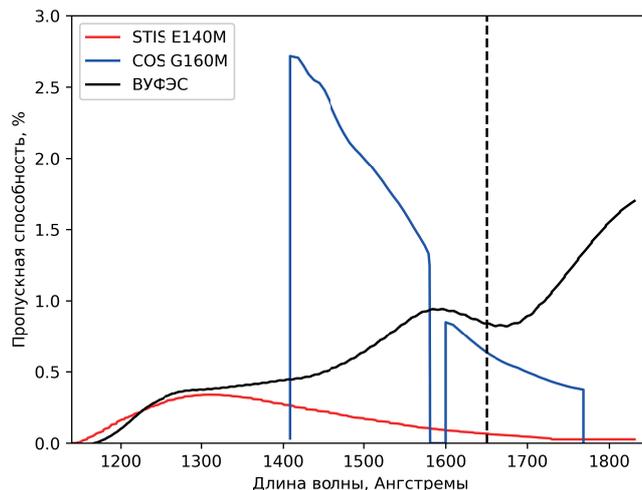


Рис. 8: Зависимость пропускной способности от длины волны для спектрографов ВУФЭС Спектр-УФ (черная кривая), STIS с решеткой E140M (красная кривая) и COS с решеткой G160M (синяя кривая). Пропускные способности спектрографов STIS и COS получены с помощью калькулятора экспозиций проекта HST. Для наглядности, пропускные способности спектрографов ВУФЭС и STIS сглажены фильтром Савицкого-Голея с окном 190 и порядком полинома, равным 3.

рых поглощение в голубом крыле H I Ly $\alpha$  в атмосфере HD 209458b было определено с уровнем значимости  $1\sigma$  за 3 транзита.

Основные различия в результатах, полученных для спектрографов ВУФЭС и STIS, связаны с различным разрешением, пропускной способностью данных приборов, а также с шумовыми характеристиками приемников излучения. Дело в том, что для дальнего УФ диапазона в спектрографе STIS используется приемник излучения с микроканальной пластиной (МКП приемник), темновой ток которого примерно равен  $7.5 \times 10^{-5} \text{ e}^-/\text{c}/\text{пиксель}$ . Темновой ток для ПЗС матрицы спектрографа ВУФЭС на 1 порядок величины больше и составляет около  $8.3 \times 10^{-4} \text{ e}^-/\text{c}/\text{пиксель}$  [10]. Пропускные способности данных инструментов в рассматриваемом диапазоне длин волн при этом также различаются: 0.15% — для спектрографа ВУФЭС, 1% — для спектрографа STIS с решеткой G130M.

Мы также провели расчеты времени экспозиции для решения данной задачи со спектрографом низкого разрешения СДЩ ( $R = 1000$ ). В этом случае аналогично работе [50] было сделано предположение о регистрации интегрального потока во всей спектральной линии H I Ly $\alpha$  от звезды HD 209458. Необходимое для достижения  $S/N_s = 48$  время экспозиции, согласно расчетам, составило 7.5 часов, что соответствует 2.5 транзитам. Аналогичные расчеты с параметрами спектрографа STIS с решеткой G140L ( $R = 1000$ ) показали, что накопить сигнал такого уровня возможно за 3.5 часа (1.2 транзита). Согласно реальным наблюдениям с данным спектрографом на обсерватории HST [50] — поглощение в H I Ly $\alpha$  в атмосфере HD 209458 b было определено с уровнем значимости  $2\sigma$  за 4 транзита.

Одним из важных преимуществ обсерватории «Спектр-УФ» является ее геосинхронная орбита, на которой практически отсутствует влияние геокоронального излучения в линии H I Ly $\alpha$  по сравнению с обсерваторией HST. Это может способствовать прямым наблюдениям ядра линии Ly $\alpha$  в атмосферах экзопланет, в отличие от наблюдений на обсерватории HST, где из-за геокоронального излучения наблюдаются только синие и красные крылья данного профиля (см., например, [56]). При этом поглощение в ядре данной линии может быть существенно больше, чем в крыльях, а глубина транзита может достигать значений, значительно больших 10% [52, 57]. Данная особенность (значительно меньшее влияние геокоронального излучения), однако не учтена в представленных расчетах и будет исследоваться нами в последующих работах.

### 3.3.3. Спектральные наблюдения квазара

Еще одной важной задачей для обсерватории «Спектр-УФ» является наблюдение квазаров в УФ диапазоне длин волн. Определим возможность спектральных наблюдений слабого квазара на  $\lambda = 1300 \text{ \AA}$ . Для этого в расчетах используем композитный спектр квазара по данным обзора FOS [21] и нормализуем его на континуальный поток  $1 \times 10^{-15} \text{ эрг см}^{-2}\text{c}^{-1}\text{\AA}^{-1}$  на данной длине волны.

Проведенные вычисления показывают, что для регистрации спектра от такого слабого источника с отношением  $S/N = 20$  необходимо проводить наблюдения с помощью спектрографа СДЩ на протяжении 10.5 часов. Время экспозиции для наблюдения исследуемой части спектра с помощью спектрографа ВУФЭС

превышает разумное ( $> 200$  часов). Расчеты с использованием параметров спектрографа COS с решеткой G130M ( $R = 16\,000$ ) обсерватории HST показали, что наблюдательное время для решения данной задачи должно составить 20.5 часов. Такие различия между результатами для спектрографов ВУФЭС и COS с G130M решеткой объясняются существенным различием в пропускной способности данных инструментов при  $\lambda = 1300 \text{ \AA}$ : 0.4% — для ВУФЭС и 3% — для COS с решеткой G130M. Кроме того, различие в темновом токе для рассматриваемых инструментов составляет 2 порядка величины. Последнее, в свою очередь, также является причиной не очень значительного улучшения результата (всего в два раза) для более эффективного в рассматриваемом диапазоне длин волн спектрографа СДЩ (пропускная способность равна около 2%) с существенно меньшим спектральным разрешением ( $R = 1000$ ).

Таким образом, из рассмотрения данного и предыдущего примеров следует, что наблюдения с высоким спектральным разрешением ( $R = 50\,000$ ) на обсерватории «Спектр-УФ» в диапазоне длин волн  $\lambda \leq 1300 \text{ \AA}$  рекомендуется проводить для относительно ярких точечных источников с континуальным потоком в указанном диапазоне  $\geq 5 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ . Именно при таких потоках полезный сигнал от источника излучения начинает преобладать над темновым током приемника.

### 3.4. Спектроскопия протяженного астрономического объекта

Рассмотрим пример использования калькулятора экспозиций для планирования спектральных наблюдений протяженных источников. Определим время экспозиции, необходимое для регистрации небулярных эмиссионных спектральных линий С IV ( $\lambda_c = 1549.93 \text{ \AA}$ ), He II ( $\lambda_c = 1640.54 \text{ \AA}$ ), [Si II] ( $\lambda_c = 1718.20 \text{ \AA}$ ) и С III] ( $\lambda_c = 1908.80 \text{ \AA}$ ) в планетарной туманности NGC 6543 (Кошачий Глаз) с отношением  $S/N = 20$ , используя параметры спектрографов ВУФЭС и СДЩ. Интегральные потоки в данных линиях известны из наблюдений на обсерватории IUE (см., табл. 5 в [58]). Следовательно, значения поверхностной яркости в предположении о том, что размер исследуемой области составляет около  $10''$ , равны:  $F_{\text{C IV}} = 3.34 \times 10^{-13}$ ,  $F_{\text{He II}} = 7.9 \times 10^{-14}$ ,  $F_{\text{Si II}} = 5.89 \times 10^{-14}$ ,  $F_{\text{C III]}} = 9.7 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ угл. сек}^{-2}$ . Значения полной ширины на полувысоте спектральных линий  $FWHM$  предполагались равными  $0.4 \text{ \AA}$ , согласно [37]. Полученные значения времени экспозиции, необходимого для регистрации данных линий с помощью спектрографов высокого разрешения ВУФЭС и УФЭС с отношением  $S/N = 20$  равны:

- 500 с — для С IV  $1549.93 \text{ \AA}$  (использовались параметры спектрографа ВУФЭС, 1150–1750  $\text{ \AA}$ );
- 2200 с — для He II  $1640.54 \text{ \AA}$  (ВУФЭС);
- 2030 с — для [Si II]  $1718.20 \text{ \AA}$  (ВУФЭС);
- 230 с — для С III]  $1908.80 \text{ \AA}$  (использовались параметры спектрографа УФЭС, 1750–3100  $\text{ \AA}$ ).

Определим также предельные значения поверхностной яркости, при которых регистрация данных линий возможна с большим отношением  $S/N = 100$  с помощью спектрографов «Спектр-УФ» за 1 час экспозиции. Результаты данных вычислений представлены в табл. 3.

Полученные значения предельной поверхностной яркости для спектрографа ВУФЭС в небулярных линиях С IV, He II, [Si II], в свою очередь, примерно в 1.5–2 раза превышают аналогичные значения, вычисленные для спектрографа COS с решеткой G160M ( $R = 24\,000$ ). При этом масштаб изображения  $scale_s$  в направлении, перпендикулярном дисперсии, для спектрографа ВУФЭС ( $1.6''/\text{пиксель}$ ) на 1 порядок величины больше, чем для COS с решеткой G160M ( $0.1''/\text{пиксель}$  [37]), а пропускные способности рассматриваемых инструментов примерно одинаковы в исследуемом диапазоне длин волн. Спектрограф COS, в свою очередь, обладает большими значениями: ширины щели ( $2.5''$  против  $1''$  для ВУФЭС); площади снятия сигнала ( $N_{\text{spix}} \times N_{\text{λpix}} = 35 \times 6$  против  $7 \times 2$  пикселей для ВУФЭС), а также на 1 порядок величины меньшим значением темнового тока, чем у спектрографа ВУФЭС.

Таблица 3: Предельные значения поверхностной яркости для регистрации небулярных линий с  $S/N = 100$  за 1 час экспозиции с помощью спектрографов ВУФЭС, УФЭС и СДЩ обсерватории «Спектр-УФ».

Спектрографы обсерватории «Спектр-УФ»	Интегральная поверхностная яркость, $\text{эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ угл. сек}^{-2}$			
	С IV $\lambda_c = 1549.93 \text{ \AA}$	He II $\lambda_c = 1640.54 \text{ \AA}$	[Si II] $\lambda_c = 1718.20 \text{ \AA}$	С III] $\lambda_c = 1908.80 \text{ \AA}$
ВУФЭС ( $R = 50\,000 \text{ K}$ )	$9.1 \times 10^{-13}$	$9.5 \times 10^{-13}$	$6.5 \times 10^{-13}$	–
УФЭС ( $R = 50\,000 \text{ K}$ )	–	–	–	$1.25 \times 10^{-13}***$
СДЩ ( $R = 1000 \text{ K}$ )	$8.8 \times 10^{-16}$	$8.1 \times 10^{-16}$	$7 \times 10^{-16}$	$1.2 \times 10^{-16}$

\*\*\*Расчеты с использованием параметров спектрографа УФЭС были произведены только для данной спектральной линии, так как только данная линия входит в рабочий спектральный диапазон этого спектрографа.

Из проведенных вычислений и сравнений следует, что с помощью обсерватории «Спектр-УФ» возможно получать за разумное время спектры высокого разрешения с высоким качеством ( $S/N \sim 100$ ) только для довольно ярких протяженных источников излучения в ближнем и дальнем УФ диапазонах длин волн. Более низкие значения поверхностной яркости могут быть достигнуты при большем времени экспозиции, понижении качества спектров, использовании спектроскопии низкого разрешения.

#### 4. Выводы

Целью данной работы была разработка первой полнофункциональной версии калькулятора экспозиций «Спектр-УФ», позволяющего планировать фотометрические и спектральные наблюдения точечных и протяженных астрономических объектов с помощью инструментов данной обсерватории. При этом ставилась задача обеспечить доступ для пользователей к калькулятору через web-интерфейс. Также было задумано привести примеры использования калькулятора экспозиций для решения некоторых научных задач и на их примере обсудить наблюдательные ограничения обсерватории «Спектр-УФ». Были получены следующие результаты:

1. Созданы две основные программы калькулятора экспозиций «Спектр-УФ»: для фотометрических наблюдений (FCU Imaging ETC)<sup>7</sup> и спектральных наблюдений (WUVS Spectroscopic ETC)<sup>8</sup>.  
Данные программы позволяют пользователю планировать наблюдения конкретных астрономических объектов с помощью инструментов обсерватории «Спектр-УФ». Кроме задания стандартных входных параметров (время экспозиции, отношение  $S/N$ ) пользователь может задавать типичное спектральное распределение излучения выбранного объекта, нормализовать такой спектр на видимую звездную величину или на поток на заданной длине волны, внести корректировку за красное смещение и межзвездное поглощение, а также учесть инструментальный шум выбранных детекторов обсерватории, вклад зодиакального света и геокоронального излучения.  
Результаты, полученные с помощью данных программ для решения задач фотометрии и спектроскопии точечных и протяженных астрономических объектов, согласуются с результатами вычислений, проведенных с помощью других уже хорошо апробированных на реальных наблюдениях калькуляторов экспозиций (например, для обсерватории HST) при похожих значениях инструментальных параметров.
2. При рассмотрении различных примеров наблюдательных задач определены некоторые ограничения для реализации методов фотометрии и спектроскопии.
  - Показано, что с помощью блока камер поля «Спектр-УФ» потенциально возможно решать задачи фотометрии довольно слабых точечных астрономических объектов. В частности, было определено, что в каналах БУФ (фильтр F255W) и ВУФ (фильтр F115LP) за часовую экспозицию с отношением  $S/N = 10$  можно зарегистрировать потоки от горячих звезд (спектральных классов O-A) и более холодных (F-G) звезд с видимыми звездными величинами, достигающими значений  $26^m-27^m$  и  $22^m-23^m$ , соответственно. Аналогичные расчеты для канала УФО (фильтр F555W) показали, что предельное значение видимой звездной величины составляет  $25^m-26^m$  для регистрации излучения звезд спектральных классов O-G при тех же условиях наблюдений. При меньших потоках от источников излучения темновой ток детекторов может преобладать над регистрируемым полезным сигналом.
  - На примере туманностей вокруг быстролетающих пульсаров описан подход, позволяющий планировать наблюдения протяженных источников по рассчитанным на основе теоретических моделей картам интенсивности. Он позволяет заранее наглядно показать, какие детали морфологии объектов будут видны в кадре, и тем самым значительно облегчает работу исследователя. Разработан программный комплекс, реализующий данный подход с ускоренными алгоритмами. За счет объединения области пикселей с полезным сигналом (процедуры бининга) в процессе пост-обработки изображений протяженных астрономических объектов можно существенно увеличить отношение  $S/N$  для изучения морфологии таких объектов. Это позволяет наблюдать объекты с малой поверхностной яркостью, но в ущерб угловому разрешению. В качестве примера выполнен панорамный расчет отношения  $S/N$  для туманностей быстролетающих пульсаров в линии CIV 1550 Å. Оценка возможности их наблюдений и предсказание особенностей является актуальной задачей для научной программы наблюдений на обсерватории «Спектр-УФ».
  - Получены ограничения на спектральные наблюдения объектов различной яркости:
    - Для горячих звезд спектрального класса O5V предельные значения видимых звездных величин для регистрации спектра с отношением  $S/N = 15$  за 3 часа наблюдений соответствуют<sup>9</sup>:

<sup>7</sup><http://etc.wso-uv.org/groundsegment/scienceoperation/etc/fcu/image/>

<sup>8</sup><http://etc.wso-uv.org/groundsegment/scienceoperation/etc/wuvs/spectroscopic/>

<sup>9</sup>Имеется ввиду, на какую видимую звездную величину необходимо нормализовать спектр звезды O5V, чтобы зарегистрировать сигнал.

- 15<sup>m</sup> и 17<sup>m</sup> для детектирования сигнала в районе линии H I Ly<sub>α</sub> и в районе 1650 Å, соответственно, со спектрографом ВУФЭС; 18<sup>m</sup> и 19<sup>m</sup> для регистрации сигнала в районе 1900 Å и 2850 Å со спектрографом УФЭС. Решение той же задачи с помощью спектрографа СДЦ возможно для звезд с предельными звездными величинами 21<sup>m</sup> (для регистрации сигнала в районе линии C IV (1548 Å) и 22<sup>m</sup> (2800 Å)). При этом согласно проведенным расчетам, за 20 минут экспозиции с отношением  $S/N = 11$  возможно зарегистрировать эмиссионную спектральную линию Si II 1810 Å в атмосфере более холодной звезды G2V спектрального класса, спектр которой нормализован на видимую звездную величину 12<sup>m</sup>. Согласно расчетам с ПО обсерватории HST, решение данной задачи (регистрации рассматриваемой линии при том же времени экспозиции) для спектрографов COS с решеткой G185M ( $R = 20\,000$ ) и STIS с решеткой E230M ( $R = 30\,000$ ) дает значения отношения  $S/N = 17$  и 3, соответственно. Важно, что при сравнении результатов, полученных для спектрографов обсерватории «Спектр-УФ» и спектрографов STIS и COS (с их многообразием решеток) обсерватории HST необходимо учитывать различие: пропускных способностей измерительных каналов в различных диапазонах длин волн, для которых рассчитывается полезный сигнал; шумовых характеристик приборов (см., например, рис. 8). Так, для рассматриваемой задачи значения пропускной способности на длине волны 1810 Å составляют: 2% для УФЭС, 1.3% для COS, 0.1% для STIS, а площадь, на которой достигается полезный сигнал для COS с решеткой G185M, практически в 2 раза превышает соответствующие площади для спектрографов УФЭС и STIS.
- Показано, что для обнаружения поглощения атмосферой горячего юпитера HD 209458 b ( $d = 48.3$  пк, спектральный класс родительской звезды G0V) в синем крыле спектральной линии H I Ly<sub>α</sub> с помощью спектрографа ВУФЭС ( $R = 50\,000$ ) хотя бы с отношением  $S/N = 3$  (что соответствует регистрации сигнала от звезды с  $S/N = 48$ )  $t_{\text{exp}}$  должно существенно превосходить разумные значения ( $t_{\text{exp}} > 200$  часов!). Согласно аналогичным расчетам для спектрографа среднего разрешения STIS с решеткой G140M ( $R = 10\,000$ ) обсерватории HST решение данной задачи возможно за 12 часов (или 4 транзита экзопланеты), что соответствует реальным наблюдениям [47]. Таким образом, использование спектроскопии высокого разрешения для исследования атмосфер горячих экзопланет в линии H I Ly<sub>α</sub> может быть потенциально возможно при следующих условиях: 1) родительские звезды должны иметь более высокие потоки в линии Ly<sub>α</sub>; 2) влияние геокоронального излучения в Ly<sub>α</sub> должно быть пренебрежимо мало в ядре данной линии. В связи с тем, что обсерватория «Спектр-УФ» будет находиться на геосинхронной орбите, малый вклад геокоронального излучения может существенно увеличить шансы для обнаружения атмосферного поглощения в этой линии. Кроме того, для обнаружения поглощения в пределах всего профиля спектральной линии Ly<sub>α</sub> в атмосфере HD 209458 b также возможно использование спектрографа низкого разрешения СДЦ. Для регистрации сигнала с отношением  $S/N = 3$  в этом случае  $t_{\text{exp}} = 7.5$  ч. (2.5 транзита экзопланеты). Это примерно соответствует расчетам и наблюдениям данной экзопланеты с помощью спектрографа STIS с решеткой G140L ( $R = 1\,000$ ) обсерватории HST [50].
  - При тестовом планировании спектральных наблюдений с высоким спектральным разрешением для слабых в УФ диапазоне источников излучения — квазаров, было определено, что такие наблюдения на обсерватории «Спектр-УФ» в диапазоне длин волн  $\lambda \leq 1300$  Å возможны только для ярких точечных источников с непрерывным потоком  $> 5 \times 10^{-14}$  эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>Å<sup>-1</sup>. Только при таких потоках полезный сигнал от источника излучения начинает преобладать над темновым током приемника.
  - Возможные наблюдательные ограничения были также продемонстрированы и для решения задач спектроскопии протяженных объектов. Так, для планетарной туманности NGC 6543 были рассчитаны предельные значения интегральной поверхностной яркости для регистрации эмиссионных спектральных линий C IV 1549.93 Å, He II 1640.54 Å, [Si II] 1718.20 Å, C III] 1908.80 Å с отношением  $S/N = 100$  за 1 час экспозиции. Данные значения, в свою очередь, составили (в единицах эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> угл. сек<sup>-2</sup>):
    - \*  $9.1 \times 10^{-13}$  (использовались параметры спектрографа ВУФЭС) и  $8.8 \times 10^{-16}$  (СДЦ) для линии C IV 1549.93 Å;
    - \*  $9.5 \times 10^{-13}$  (ВУФЭС) и  $8.1 \times 10^{-16}$  (СДЦ) для линии He II 1640.54 Å;
    - \*  $6.5 \times 10^{-13}$  (ВУФЭС) и  $7 \times 10^{-16}$  (СДЦ) для линии [Si II] 1718.20 Å;
    - \*  $1.25 \times 10^{-13}$  (УФЭС) и  $1.2 \times 10^{-16}$  (СДЦ) для линии C III] 1908.80 Å.
- За счет довольно большого масштаба изображения вдоль направления, перпендикулярного направлению дисперсии, у спектрографов ВУФЭС и УФЭС полученные предельные значения поверхностной яркости для этих спектрографов только в 1.5–2 раза превышают эти же значения для спектрографа среднего разрешения COS с G160M решеткой ( $R = 24\,000$ ) (несмотря

на большую пропускную способность, меньшее значение спектрального разрешения и меньшее значение темнового тока у спектрографа COS G160M). Несмотря на это, полученные результаты показывают, что спектроскопия высокого разрешения с высоким отношением  $S/N$  с помощью обсерватории «Спектр-УФ» за небольшое наблюдательное время все же более предпочтительна для источников с довольно высокими значениями поверхностной яркости.

Безусловно, представленные примеры, для которых в работе показаны наблюдательные ограничения Спектр-УФ, не покрывают всего круга основных задач данной обсерватории. И посвящены отдельным, наиболее предельным для наблюдения задачам. Так, например, не были рассмотрены задачи, демонстрирующие основные преимущества ПЗС детекторов блока спектрографов, в особенности в ближнем УФ диапазоне длин волн [10]. Соответственно, в дальнейшем мы планируем рассмотреть и эти задачи, которые, в том числе, будут формировать основную научную программу обсерватории.

Кроме того, с уточнением технических характеристик инструментов обсерватории «Спектр-УФ» при подготовке к запуску данной обсерватории и во время ее работы на орбите разработанный калькулятор экспозиций будет обновляться. В последующих версиях данной программы планируется:

- Добавить возможность нормализации модельного спектрального распределения объекта не только на его видимую звездную величину, но и на звездную величину в других фильтрах;
- Добавить на выбор пользователя различные кривые поглощения в Галактике помимо [23];
- Совместить расчеты калькулятора экспозиции «Спектр-УФ» с вычислениями вклада зодиакального света (производимых с помощью калькулятора зон засветки «Спектр-УФ») и геокоронального излучения для конкретного объекта и времени наблюдений,
- Добавить возможность разделения общего наблюдательного времени для решения определенной задачи на суб-экспозиции. А также выводить пользователю предупреждения, связанные с техническими ограничениями, которые могут возникнуть во время наблюдений (например, предупреждение о возможном пересвете детектора).

Постепенно совершенствуя разработанный калькулятор экспозиций «Спектр-УФ», мы планируем добиться наилучшего согласия между ожидаемыми результатами при планировании эксперимента и результатами, полученными в ходе его реализации. Это, в свою очередь, поможет эффективно реализовать программу планируемой к запуску обсерватории «Спектр-УФ».

## Финансирование

Раздел 3.2 работы выполнен при поддержке гранта РФФИ 23-22-00385. Раздел «Планирование эксперимента для спектральных наблюдений атмосфер экзопланет» выполнен в рамках проекта «Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение №075-15-2019-1875, 075-15-2022-1109)

## Благодарности

Авторы благодарят Баркова М. В., Бисикало Д. В., Кильшио Е. Ю., Кирсанову М. С., Ковалеву Д. А., Малкову О. Ю., Пахомова Ю. В., Саванова И. С., Сачкова М. Е., Шайхисламова И. Ф., Шугарова А. С., Шематовича В. И. за неоднократные полезные обсуждения в процессе выполнения работы.

Авторы также благодарят Машонкину Л. И., Малкову О. Ю., Антонову Т. А., Емельянову А., Гасимова Д. Ф., Гуляева М., Комарову И. А., Малик Е. Д., Тарасенкова А. Н., Чех И. за тестирование калькулятора экспозиций и полезные замечания, высказанные в ходе данного тестирования.

Авторы будут признательны читателям данной работы за тестирование и за замечания по работе калькулятора экспозиций «Спектр-УФ». Просьба присылать результаты тестирования и замечания на адрес электронной почты tsurikov@inasan.ru.

## Список литературы

1. B. M. Shustov, *Astrophysics*, **64**, 405, 2021.
2. A. Boyarchuk, I. Savanov, E. Kanev, B. Shustov, and M. Sachkov, *Astrophys. and Space Sci.*, **354**, 247, 2014.
3. B. M. Shustov, M. E. Sachkov, S. G. Sichevsky, R. N. Arkhangelsky, et al., *Solar System Research*, **55**, 677, 2021.
4. M. Sachkov, A. I. Gómez de Castro, B. Shustov, S. Sichevsky, and A. Shugarov, in J.-W. A. den Herder, S. Nikzad, and K. Nakazawa, eds., *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*, **12181**, 121812S (2022).
5. O. V. Vlasenko, A. L. Yaskovich, B. M. Shustov, and et al, *Vestnik NPO Lavochkina*, 67–83, 2014.
6. I. S. Savanov, B. M. Shustov, M. E. Sachkov, A. S. Shugarov, S. G. Sichevsky, and E. N. Kanev, in D. V. Bisikalo and D. S. Wiebe, eds., *A.A. Boyarchuk Memorial Conference*, 364–369 (2018).
7. V. E. Shmagin, S. G. Sichevsky, and A. S. Shugarov, *Nauchnye trudy Instituta astronomii RAN*, **8**, 205, 2023.
8. S. G. Sichevsky, A. S. Shugarov, M. E. Sachkov, S. V. Iosipenko, R. N. Arkhangelsky, A. S. Buslaeva, and B. M. Shustov, *INASAN Science Reports*, **5**, 129, 2020.
9. R. L. Apteкар, D. D. Frederiks, S. V. Golenetskii, V. N. Ilynskii, et al., *Space Sci. Rev.*, **71**, 265, 1995.

10. A. Shugarov and M. Sachkov, *Photonics*, **10**, 1032, 2023.
11. Y. V. Kazakevich, B. M. Shustov, M. E. Sachkov, and O. Y. Malkov, *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*, 40–52, 2014.
12. P. Marcos-Arenal, J. C. Vallejo Chavarino, I. Bustamante Bengoechea, and A. I. Gómez de Castro, in B. Montesinos, A. Asensio Ramos, F. Buitrago, R. Schödel, E. Villaver, S. Pérez-Hoyos, and I. Ordóñez-Etxeberria, eds., *Highlights on Spanish Astrophysics X*, 568–571 (2019).
13. A. Shugarov, I. Savanov, M. Sachkov, P. Jerram, et al., *Astrophys. and Space Sci.*, **354**, 169, 2014.
14. F. Castelli and R. L. Kurucz, in N. Piskunov, W. W. Weiss, and D. F. Gray, eds., *Modelling of Stellar Atmospheres*, **210**, A20 (2003).
15. A. J. Pickles, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **110**, 863, 1998.
16. R. Kurucz, *Robert Kurucz CD-ROM*, **13**, 1993.
17. R. Diaz, Spectral atlas files for synphot software (“reference-atlases”), 2019.
18. G. D. Coleman, C. C. Wu, and D. W. Weedman, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **43**, 393, 1980.
19. N. Benítez, H. Ford, R. Bouwens, F. Menanteau, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **150**, 1, 2004.
20. A. L. Kinney, D. Calzetti, R. C. Bohlin, K. McQuade, T. Storchi-Bergmann, and H. R. Schmitt, *Astrophys. J.*, **467**, 38, 1996.
21. W. Zheng, G. A. Kriss, R. C. Telfer, J. P. Grimes, and A. F. Davidsen, *Astrophys. J.*, **475**, 469, 1997.
22. R. C. Bohlin, I. Hubeny, and T. Rauch, *Astron. J.*, **160**, 21, 2020.
23. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *Astrophys. J.*, **345**, 245, 1989.
24. R. Diaz, *Zodiacal Light contribution for the UV ETC background.*, Technical Report CDBS-CRDS 2015-001, Space Telescope Science Institute, 2015.
25. C. Leinert, S. Bowyer, L. K. Haikala, M. S. Hanner, et al., *Astron. and Astrophys. Supp.*, **127**, 1, 1998.
26. S. Medallon, E. Rickman, and J. Brown, in *STIS Instrument Handbook for Cycle 32 v. 23*, volume 23, 23 (2023).
27. M. V. Barkov, M. Lyutikov, and D. Khangulyan, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **484**, 4760, 2019.
28. O. D. Toropina, M. M. Romanova, and R. V. E. Lovelace, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **484**, 1475, 2019.
29. M. V. Barkov, M. Lyutikov, and D. Khangulyan, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **497**, 2605, 2020.
30. I. N. Nikonorov, M. V. Barkov, and M. Lyutikov, *To be submitted*, 2024, to be submitted.
31. I. N. Nikonorov, "shu"package, Svidetel'stvo 2023686794 от 08.12.2023, 2023.
32. R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, *Astron. J.*, **129**, 1993, 2005.
33. S. Brownsberger and R. W. Romani, *Astrophys. J.*, **784**, 154, 2014.
34. B. Rangelov, G. G. Pavlov, O. Kargaltsev, M. Durant, A. M. Bykov, and A. Krassilchtchikov, *Astrophys. J.*, **831**, 129, 2016.
35. B. Rangelov, G. G. Pavlov, O. Kargaltsev, A. Reisenegger, S. Guillot, M. H. van Kerkwijk, and C. Reyes, *Astrophys. J.*, **835**, 264, 2017.
36. A. Cox, *Allen's Astrophysical Quantities* (2002), URL <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1186-0>.
37. A. S. Hirschauer, in *COS Instrument Handbook v. 16.0*, volume 16, 16 (2023).
38. C. Jordan, *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, **5**, 2252, 1988.
39. A. A. Boyarchuk, B. M. Shustov, I. S. Savanov, M. E. Sachkov, et al., *Astronomy Reports*, **60**, 1, 2016.
40. V. I. Shematovich, I. F. Shaikhislamov, A. G. Zhilkin, I. S. Savanov, G. N. Tsurikov, and D. V. Bisikalo, *FIZMAT*, 33–54, 2023.
41. H. Rauer, S. Gebauer, P. V. Paris, J. Cabrera, et al., *Astron. and Astrophys.*, **529**, A8, 2011.
42. F. Wunderlich, M. Godolt, J. L. Grenfell, S. Städt, et al., *Astron. and Astrophys.*, **624**, A49, 2019.
43. G. N. Tsurikov and D. V. Bisikalo, *Astronomy Reports*, **67**, 1123, 2023.
44. D. Charbonneau, T. M. Brown, D. W. Latham, and M. Mayor, *Astrophys. J. Lett.*, **529**, L45, 2000.
45. G. W. Henry, G. W. Marcy, R. P. Butler, and S. S. Vogt, *Astrophys. J. Lett.*, **529**, L41, 2000.
46. D. Charbonneau, T. M. Brown, R. W. Noyes, and R. L. Gilliland, *Astrophys. J.*, **568**, 377, 2002.
47. A. Vidal-Madjar, A. Lecavelier des Etangs, J. M. Désert, G. E. Ballester, R. Ferlet, G. Hébrard, and M. Mayor, *Nature*, **422**, 143, 2003.
48. L. Ben-Jaffel, *Astrophys. J. Lett.*, **671**, L61, 2007.
49. A. Vidal-Madjar, A. Lecavelier des Etangs, J. M. Désert, G. E. Ballester, R. Ferlet, G. Hébrard, and M. Mayor, *Astrophys. J. Lett.*, **676**, L57, 2008.
50. A. Vidal-Madjar, J. M. Désert, A. Lecavelier des Etangs, G. Hébrard, et al., *Astrophys. J. Lett.*, **604**, L69, 2004.
51. D. Ehrenreich, A. Lecavelier Des Etangs, G. Hébrard, J. M. Désert, et al., *Astron. and Astrophys.*, **483**, 933, 2008.
52. I. F. Shaikhislamov, M. L. Khodachenko, H. Lammer, A. G. Berezutsky, I. B. Miroshnichenko, and M. S. Rumenskikh, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **491**, 3435, 2020.
53. G. Torres, J. N. Winn, and M. J. Holman, *Astrophys. J.*, **677**, 1324, 2008.
54. J. L. Linsky, K. France, and T. Ayres, *Astrophys. J.*, **766**, 69, 2013.
55. D. Ehrenreich, V. Bourrier, X. Bonfils, A. Lecavelier des Etangs, et al., *Astron. and Astrophys.*, **547**, A18, 2012.
56. B. E. Wood, H. R. Müller, G. P. Zank, J. L. Linsky, and S. Redfield, *Astrophys. J. Lett.*, **628**, L143, 2005.
57. M. L. Khodachenko, I. F. Shaikhislamov, H. Lammer, K. G. Kislyakova, et al., *Astrophys. J.*, **847**, 126, 2017.
58. R. Wesson and X. W. Liu, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **351**, 1026, 2004.

## Содержание

<i>Потравнов И.С., Рябчикова Т.А.</i> Распределение хрома по поверхности Ap звезды HD 152564 . . .	1
<i>Нароенков С.А., Тарасенков А.Н., Наливкин М.А.</i> Первые наблюдения на фотометрическом комплексе для исследования транзитов экзопланет Кисловодской обсерватории ИНАСАН . . . . .	6
<i>Цуриков Г.Н., Сичевский С.Г., Шмагин В.Е., Никоноров И.Н., Шустов Б.М.</i> Калькулятор экспозиций «Спектр-УФ»: первая web-версия для пользователей . . . . .	12

## Contents

<i>Potravnov I.S., Ryabchikova T.A.</i> On the surface distribution of chromium in Ap star HD 152564 . . . . .	1
<i>Naroenkov S.A., Tarasenkov A.N., Nalivkin M.A.</i> First observations at the photometric complex for studying exoplanet transits of the Kislovodsk Observatory INASAN . . . . .	6
<i>Tsurikov G.N., Sychevsky S.G., Shmagin V.E., Nikonorov I.N., Shustov B.M.</i> “Spektr-UF” exposure calculator: the first web version for users . . . . .	12