

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук
(ИНАСАН)

**Оптические системы для астрофизических
внеатмосферных исследований в ультрафиолетовом
диапазоне**

Шмагин Владимир Евгеньевич

Специальность 01.03.01

Физика космоса, астрономия

Диссертация

Руководитель: Сачков Михаил Евгеньевич

Москва, Россия

2025

Оглавление

	Стр.
Реферат	3
Synopsis	8
Введение	13
Глава 1. Оптическая схема и компоновка БКП	18
1.1 Оптическая схема и компоновка БКП	18
Глава 2. Режимы БКП	20
2.1 Режимы БКП	20
2.1.1 Режим “Камера”	20
2.1.2 Режим “Спектроскопия”	23
2.1.3 Режим “Коронография”	24
2.1.4 Поляриметрия	24
Глава 3. Калькулятор экспозиций	25
3.1 Введение	25
3.2 Структура и математическая модель калькулятора экспозиций «Спектр-УФ»	29
3.2.1 Структура калькулятора экспозиций	29
3.2.2 Математическая модель калькулятора экспозиций	33
3.2.3 Вывод результатов	35
3.3 Примеры работы калькулятора экспозиций	36
3.3.1 Фотометрия слабого точечного источника	36
3.3.2 Спектроскопия точечного объекта	41
3.4 Выводы	42
Заключение	48
Список рисунков	49
Список таблиц	51
Список литературы	52

Реферат

Блок камер поля – один из основных научных приборов обсерватории «Спектр-УФ», который предназначен для получения изображений астрономических объектов в нескольких спектральных диапазонах. В его конструкции предусмотрено три канала: канал вакуумного ультрафиолета (115–176 нм) с высокими пространственным разрешением, оснащенный МКП–приемником с CsI фотокатодом; канал ближнего ультрафиолета (150–320 нм) с высокими пространственным разрешением, оснащенный МКП–приемником с GaN фотокатодом; и канал ближнего ультрафиолетового и оптического диапазона (180–1000 нм) с полем зрения $4,5' \times 4,5'$ и КМОП–приемником. МКП–приемники являются солнечно-слепыми (чувствительность в оптическом диапазоне на 3–8 порядков меньше, чем в ультрафиолетовом). Помимо режима получения изображений с использованием светофильтров, предусмотрен режим полевой спектроскопии низкого разрешения. В статье кратко изложены общие характеристики и возможные режимы работы блока камер поля, доработанного после 2022 года группой сотрудников Института астрономии РАН.

Общая характеристика диссертации

Актуальность. На данный момент единственным крупным ультрафиолетовым инструментом для астрофизических исследований является Космический Телескоп им. Хаббла (HST). После завершения его эксплуатации и до запуска следующего крупного проекта (LUVOIR, HabEx) в 2035 году возникнет дефицит наблюдательных данных в ультрафиолетовом диапазоне. В случае своевременного запуска, космический телескоп «Спектр-УФ» обеспечит научное сообщество фотометрическими и спектроскопическими наблюдательными данными до запуска следующего крупного УФ телескопа.

Цель исследования. Целью работы является разработка блока камер поля (БКП) космического телескопа «Спектр-УФ» в части формирования концепции и создания инструментария для планирования наблюдений.

Научные задачи. В работе решаются задачи определения актуальных и реализуемых режимов работы БКП, разработки оптической схемы и компоновки в

условиях ограниченного ранее отведенного пространства в инструментальном отсеке, создание калькулятора экспозиций для БКП и блока спектрографов (БС).

Методы исследования.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработана оптическая схема блока камер порля (БКП), реализующая фотометрический и спектроскопический режимы наблюдений.
2. Разработана и введена в эксплуатацию первая версия калькулятора экспозиций блока камер порля (БКП) и блока спектрографов (БС).

Научная новизна. Впервые крупный астрофизический наблюдательный инструмент будет запущен на высокую геосинхронную орбиту, что позволит избавиться от значительной части влияния на наблюдения фона, создаваемого водородной геокороной Земли вблизи линии Ly- α (121.5нм).

Теоретическая значимость.

Практическая значимость.

Достоверность.

Аппробация работы. Результаты работы были представлены в докладах на конференции «ультрафиолетовая астрономия» в 2023 году и в статьях «Режимы наблюдений блока камер поля космической обсерватории «Спектр-УФ»» и «Калькулятор экспозиций «Спектр-УФ»: первая web-версия для пользователей» в журнале «Научные труды Института Астрономии РАН».

Личный вклад автора. Сформирована концепция БКП, определены режимы работы, разработана оптическая схемы. Разработана часть программного кода калькулятора экспозиций, отвечающая за учет эффективности оптических элементов БКС и БС, а так же квантовой эффективности фотоприемных устройств.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 0 приложений. Полный объём диссертации составляет 52 страницы, включая 9 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 10 наименований.

Основное содержание работы

В Главе 1 представлена разработанная схема блока камер поля (БКП).

В Главе 2 рассмотрены реализованные и потенциально возможные режимы наблюдений блока камер поля (БКП).

В Главе 3 представлен калькулятор экспозиций БКП и БС.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 публикациях. Из них 0 опубликовано в изданиях, индексируемых в базе цитирования Scopus.

В международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:

В международных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science:

Список всех публикаций автора по теме диссертации:

1. ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ БКП ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ ПРОЕКТА «СПЕКТР-УФ» / С. Г. Сичевский [и др.] // Научные труды Института астрономии РАН. — 2019. — Т. 4. — С. 140—145.
2. FIELD CAMERA UNIT OF THE WSO-UV MISSION / M. Sachkov [и др.] // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Ultraviolet to Gamma Ray. — 2020. — С. 1144474. — (Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray).
3. ПРОЕКТ «СПЕКТР-УФ»: НОВЫЕ ШТРИХИ / Б. М. Шустов [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. — 2020. — 2 (48). — С. 22—33.
4. ПРОЕКТ «СПЕКТР-УФ» В 2020 Г / Б. М. Шустов [и др.] // Научные труды Института астрономии РАН. — 2020. — Т. 5, № 5. — С. 306—310.
5. WSO-UV PROJECT: NEW TOUCHES / B. M. Shustov [и др.] // Solar System Research. — 2021. — Т. 55, № 7. — С. 677—687.

6. WSO-UV FIELD CAMERA UNIT FOR COMET AND EXOPLANET OBSERVATIONS / S. Sichevsky [и др.] // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. — 2021. — Т. 51, № 3. — С. 266—269.
7. Шмагин В. Е., Сичевский С. Г., Шугаров А. С. РЕЖИМЫ НАБЛЮДЕНИЙ БЛОКА КАМЕР ПОЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «СПЕКТР-УФ» // Научные труды Института астрономии РАН. — 2023. — Т. 8, № 5. — С. 205—210.
8. УФ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ / О. Е. Терещенко [и др.] // Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — Москва, 2024. — С. 113—114.
9. КАЛЬКУЛЯТОР ЭКСПОЗИЦИЙ «СПЕКТР-УФ»: ПЕРВАЯ WEB-ВЕРСИЯ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ / Г. Н. Цуриков [и др.] // Научные труды Института астрономии РАН. — 2024. — Т. 9, № 1. — С. 12—31.
10. ETC SPECTR-UF 1.0 : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / Г. Н. Цуриков [и др.]. — 13.11.2024. — RU 2024686952. — Заявка № 2024685360 от 28.10.2024.

Synopsis

Field Camera Unit (FCU) is one of the primary scientific instruments of the WSO-UV project. Its main purpose is taking images of astronomical objects in several spectral ranges using 3 channels: Far Ultraviolet channel (FUV, 115–176 nm) with high spatial resolution and MCP detector with CsI photocathode; Near Ultraviolet channel (NUV, 150–320 nm) with high spatial resolution and MCP detector with GaN photocathode; Ultraviolet and Optical channel (UVO, 180–1000 nm) with $4.5' \times 4.5'$ field of view and CMOS detector. In addition to the imaging mode with filters, a low-resolution field spectroscopy mode is implemented. Field camera unit general parameters and modes of operation are described, taking into account the latest updates after 2022 made by the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences working group.

General thesis summary

Relevance of the chosen topic. Currently, the Hubble Space Telescope (HST) is the only major ultraviolet instrument available for astrophysical research. After the end of its operational lifetime and before the launch of the next major project (LUVOIR, HabEx) in 2035, there will be a significant gap in ultraviolet observational data. If launched in a timely manner, the WSO-UV space telescope will provide the scientific community with photometric and spectroscopic observational data during this gap, bridging the period until the next major UV telescope becomes operational.

Goal. The aim of the work is the development of the Field Camera Unit (FCU) of the WSO-UV space telescope, focusing on the formulation of its conceptual framework and the creation of tools for observation planning.

Objectives. The work addresses tasks related to determining current and feasible operating modes of the FCU, developing an optical layout and instrument configuration within the previously limited space allocated in the instrument compartment, and creating an exposure time calculator for both the Field Camera Unit (FCU) and the Spectrograph Block.

Research methods.

Assertions that are presented for defense.

The novelty of research. For the first time, a major astrophysical observatory will be launched into a high geosynchronous orbit, which will significantly reduce the impact of background emission from the Earth's hydrogen geocorona near the Ly- α line (121.5nm) on observations.

The scientific and technical objective.

The research object.

The research subject.

The theoretical significance.

The practical significance.

The accuracy of the obtained results.

Implementation of research results.

Approbation of research results. The results of the work were presented in conference talks at the "Ultraviolet Astronomy" conference in 2023 and published in the articles "Observation Modes of the Field Camera Block of the WSO-UV Space Observatory" and "The WSO-UV Exposure Time Calculator: The First Web Version for Users" in the journal "Scientific Proceedings of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences".

Personal contribution of the author. The concept of the Field Camera Unit (FCU) has been formulated, its operational modes have been defined, and the optical layout has been developed. A part of the exposure time calculator's software code has been created, responsible for accounting for the efficiency of optical components in the FCU and Spectrograph Block, as well as for the quantum efficiency of the photodetectors.

Thesis structure and number of pages. Thesis consists of the introduction, 3 chapters, conclusion and 0 appendix. Thesis is 52 pages long, including 9 figure and 4 tables. Bibliography consists of 10 item.

Main contents of the work

In Chapter 1, the developed layout of the Field Camera Unit (FCU) is presented.

In Chapter 2, the implemented and potentially feasible observation modes of the Field Camera Unit (FCU) are discussed.

In Chapter 3, the exposure time calculator for the FCU and the Spectrograph Unit is presented.

Publications.

Key results of research are described in 10 publications. Among them 0 is published in a journal indexed by Scopus.

Publications in international journals indexed by Scopus:

List of all relevant author's publications:

1. ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ БКП ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ ПРОЕКТА «СПЕКТР-УФ» / С. Г. Сичевский [и др.] // Научные труды Института астрономии РАН. — 2019. — Т. 4. — С. 140—145.
2. FIELD CAMERA UNIT OF THE WSO-UV MISSION / M. Sachkov [и др.] // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Ultraviolet to Gamma Ray. — 2020. — С. 1144474. — (Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray).
3. ПРОЕКТ «СПЕКТР-УФ»: НОВЫЕ ШТРИХИ / Б. М. Шустов [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. — 2020. — 2 (48). — С. 22—33.
4. ПРОЕКТ «СПЕКТР-УФ» В 2020 Г / Б. М. Шустов [и др.] // Научные труды Института астрономии РАН. — 2020. — Т. 5, № 5. — С. 306—310.
5. WSO-UV PROJECT: NEW TOUCHES / B. M. Shustov [и др.] // Solar System Research. — 2021. — Т. 55, № 7. — С. 677—687.

6. WSO-UV FIELD CAMERA UNIT FOR COMET AND EXOPLANET OBSERVATIONS / S. Sichevsky [и др.] // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. — 2021. — Т. 51, № 3. — С. 266—269.
7. Шмагин В. Е., Сичевский С. Г., Шугаров А. С. РЕЖИМЫ НАБЛЮДЕНИЙ БЛОКА КАМЕР ПОЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «СПЕКТР-УФ» // Научные труды Института астрономии РАН. — 2023. — Т. 8, № 5. — С. 205—210.
8. УФ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ / О. Е. Терещенко [и др.] // Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — Москва, 2024. — С. 113—114.
9. КАЛЬКУЛЯТОР ЭКСПОЗИЦИЙ «СПЕКТР-УФ»: ПЕРВАЯ WEB-ВЕРСИЯ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ / Г. Н. Цуриков [и др.] // Научные труды Института астрономии РАН. — 2024. — Т. 9, № 1. — С. 12—31.
10. ETC SPECTR-UF 1.0 : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / Г. Н. Цуриков [и др.]. — 13.11.2024. — RU 2024686952. — Заявка № 2024685360 от 28.10.2024.

Введение

Блок камер поля (БКП) входит в состав научной аппаратуры космического комплекса (КК) «Спектр–УФ». Основное назначение КК «Спектр–УФ» – проведение наблюдений в вакуумном и ближнем УФ диапазонах электромагнитного спектра (115–310 нм). Развитие обсерватории «Спектр–УФ» и ее основные характеристики описаны в работах [1–5]. Обсуждение научной программы проекта можно найти в работе [6].

БКП вместе с блоком спектрографов (БС) – главные научные приборы и вместе с телескопом Т-170М они составляют основу комплекса научной аппаратуры (КНА). БКП предназначен для получения высококачественных прямых снимков космических объектов в УФ–диапазоне. В первую очередь БКП предназначен для исследования слабых точечных УФ–источников и протяженных источников с использованием светофильтров. Также в БКП возможна работа в режиме полевой спектроскопии низкого разрешения. Данный режим позволяет проводить спектральный анализ слабых точечных и протяженных объектов. Среди основных научных задач, для решения которых предназначен БКП, можно отметить следующие:

- образование галактик;
- образование и эволюция Млечного пути;
- физика аккреции и истечений;
- атмосферы планет Солнечной системы и экзопланет;
- астрохимия в присутствии сильных УФ–полей излучения.

В предыдущий вариант КНА входил БКП под названием ISSIS (Imaging and Slitless Spectroscopy Instrument), предназначенный для построения изображений в диапазоне 115–320 нм и проведения бесщелевой спектроскопии. В ISSIS использовались два МКП–приемника, оптимизированных для разных спектральных диапазонов. Один – с фотокатодом на основе CsI для наблюдений в вакуумном ультрафиолете, второй – на основе CsTe, оптимизированный для ближнего ультрафиолета. Стороной, ответственной в проекте за разработку и создание ISSIS, была Испания [7], но из-за финансовых затруднений Испания отказалась от дальнейшего развития своего проекта. ГК «Роскосмос» поставил задачу создания российского варианта БКП. В процессе решения этой задачи была развита концепция нового БКП и разработаны его конструктивные осно-

вы (см. например, [8; 9]). Основываясь на опыте испанской стороны по созданию ISSIS обсерватории «Спектр-УФ», специалисты ИНАСАН совместно со специалистами ИКИ РАН и ФИАН провели в 2019 - 2020 годах проектирование нового БКП, который позже был уточнен и дополнен из-за введенных в 2022 году ограничений на возможность поставки иностранных комплектующих изделий.

Функционально БКП имеет следующие каналы:

- канал вакуумного ультрафиолета (ВУФ) (115–176 нм) с высокими пространственным разрешением, оснащенный МКП приемником с CsI фотокатодом;
- канал ближнего ультрафиолета (БУФ) (150–320 нм) с высокими пространственным разрешением, оснащенный МКП приемником с GaN фотокатодом;
- канал ближнего ультрафиолетового и оптического диапазона (УФО) (180–1000 нм) с полем зрения $4,5' \times 4,5'$ и КМОП приемником.

Разработанный новый вариант БКП имеет высокую чувствительность и большое поле зрения, есть возможность работать не только в УФ, но и в оптическом и ближнем ИК диапазонах до 1000 нм. МКП–приемники ВУФ и БУФ каналов являются солнечно-слепыми (чувствительность в оптическом диапазоне на 3-8 порядков меньше, чем в ультрафиолетовом) и будет предусмотрен режим счета фотонов, что позволит получать фотометрические данные с миллисекундным временным разрешением. Помимо режима получения изображений с использованием светофильтров, предусмотрен режим полевой спектроскопии низкого разрешения. Кроме того, оптическая схема позволяет реализовать режим коронографа по схеме Лию и режим поляриметра. БКП будет уникальной астрономической камерой УФ–диапазона, обладающей субсекундным угловым разрешением и высокой эффективностью в поисково-обзорном режиме работы.

В статье кратко изложены общие характеристики и возможные режимы работы блок камер поля, доработанного после 2022 года группой сотрудников Института астрономии РАН. Общие характеристики оптической схемы и компоненты БКП описаны в разделе 2, в разделе 3 кратко описаны режимы работы, выводы приведены в разделе 4.

Актуальность темы. На данный момент единственным крупным ультрафиолетовым инструментом для астрофизических исследований является Косми-

ческий Телескоп им. Хаббла (HST). После завершения его эксплуатации и до запуска следующего крупного проекта (LUVOIR, HabEx) в 2035 году возникнет дефицит наблюдательных данных в ультрафиолетовом диапазоне. В случае своевременного запуска, космический телескоп «Спектр-УФ» обеспечит научное сообщество фотометрическими и спектроскопическими наблюдательными данными до запуска следующего крупного УФ телескопа.

Цель работы. Целью работы является разработка блока камер поля (БКП) космического телескопа «Спектр-УФ» в части формирования концепции и создания инструментария для планирования наблюдений.

Задачи работы. В работе решаются задачи определения актуальных и реализуемых режимов работы БКП, разработки оптической схемы и компоновки в условиях ограниченного ранее отведенного пространства в инструментальном отсеке, создание калькулятора экспозиций для БКП и блока спектрографов (БС).

Научная новизна работы. Впервые крупный астрофизический наблюдательный инструмент будет запущен на высокую геосинхронную орбиту, что позволит избавиться от значительной части влияния на наблюдения фона, создаваемого водородной геокороной Земли вблизи линии Ly- α (121.5нм).

Теоретическая и практическая значимость работы.

Положения выносимые на защиту.

1. Разработана оптическая схема блока камер поля (БКП), реализующая фотометрический и спектроскопический режимы наблюдений.
2. Разработана и введена в эксплуатацию первая версия калькулятора экспозиций блока камер поля (БКП) и блока спектрографов (БС).

Апробация работы. Результаты работы были представлены в докладах на конференции «ультрафиолетовая астрономия» в 2023 году и в статьях «Режимы наблюдений блока камер поля космической обсерватории «Спектр-УФ»» и «Калькулятор экспозиций «Спектр-УФ»: первая web-версия для пользователей» в журнале «Научные труды Института Астрономии РАН».

Достоверность научных достижений.

Внедрение результатов работы. На основе разработанной оптической схемы производится проектирование конструкции БКП. Веб интерфейс калькулятора экспозиций находится в открытом доступе по адресу <http://etc.wso-uv.org/>

Публикации. Список всех публикаций автора по теме диссертации:

1. ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ БКП ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ ПРОЕКТА «СПЕКТР-УФ» / С. Г. Сичевский [и др.] // Научные труды Института астрономии РАН. — 2019. — Т. 4. — С. 140—145.
2. FIELD CAMERA UNIT OF THE WSO-UV MISSION / M. Sachkov [и др.] // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Ultraviolet to Gamma Ray. — 2020. — С. 1144474. — (Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray).
3. ПРОЕКТ «СПЕКТР-УФ»: НОВЫЕ ШТРИХИ / Б. М. Шустов [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. — 2020. — 2 (48). — С. 22—33.
4. ПРОЕКТ «СПЕКТР-УФ» В 2020 Г / Б. М. Шустов [и др.] // Научные труды Института астрономии РАН. — 2020. — Т. 5, № 5. — С. 306—310.
5. WSO-UV PROJECT: NEW TOUCHES / B. M. Shustov [и др.] // Solar System Research. — 2021. — Т. 55, № 7. — С. 677—687.
6. WSO-UV FIELD CAMERA UNIT FOR COMET AND EXOPLANET OBSERVATIONS / S. Sichevsky [и др.] // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. — 2021. — Т. 51, № 3. — С. 266—269.
7. *Шмагин В. Е., Сичевский С. Г., Шугаров А. С.* РЕЖИМЫ НАБЛЮДЕНИЙ БЛОКА КАМЕР ПОЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «СПЕКТР-УФ» // Научные труды Института астрономии РАН. — 2023. — Т. 8, № 5. — С. 205—210.
8. УФ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ / О. Е. Терещенко [и др.] // Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — Москва, 2024. — С. 113—114.

9. КАЛЬКУЛЯТОР ЭКСПОЗИЦИЙ «СПЕКТР-УФ»: ПЕРВАЯ WEB-ВЕРСИЯ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ / Г. Н. Цуриков [и др.] // Научные труды Института астрономии РАН. — 2024. — Т. 9, № 1. — С. 12—31.
10. ЕТС СПЕКТР-UF 1.0 : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / Г. Н. Цуриков [и др.]. — 13.11.2024. — RU 2024686952. — Заявка № 2024685360 от 28.10.2024.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 0 приложений. Полный объем диссертации составляет 52 страницы, включая 9 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 10 наименований.

Глава 1. Оптическая схема и компоновка БКП

1.1 Оптическая схема и компоновка БКП

Оптическая схема БКП с расположением основных узлов представлена на рисунке 1.1.

БКП включает в себя 3 канала, по одному приемнику излучения в каждом. Первый элемент оптической схемы, плоское диагональное зеркало (M0), установлен на приводе, позволяющем производить выбор канала путем вращения зеркала вокруг оптической оси и фокусировать изображение путем смещения вдоль оптической оси. Канал УФО состоит из КМОП детектора в фокусе Несмита и четырех колес фильтров между зеркалом M0 и детектором. Внеосевое эллиптическое зеркало (M1) и тороидальное зеркало (M2) предназначены для увеличения фокусного расстояния системы в каналах ВУФ и БУФ с высоким пространственным разрешением. Между зеркалом M2 и детекторами расположен механизм выбора режима (МВР), предназначенный для переключения между каналами БУФ и ВУФ, а так же включение режима “Спектроскопия” в каналах ВУФ и БУФ. Между зеркалами M1 и M2 расположен выходной зрачок телескопа, в котором размещено общее для каналов ВУФ и БУФ колесо нейтральных фильтров (КНФ), предназначенных для наблюдения слишком ярких для МКП детекторов объектов. В фокусе Несмита между зеркалами M0 и M1 располагается колесо полевых диафрагм (КПД), которое позволяет дополнительно ограничить поле зрения каналов ВУФ и БУФ для снижения рассеянного света и избежания наложения спектров в режиме полевой спектроскопии. По одному колесу фильтров располагаются перед детекторами каналов ВУФ и БУФ.

Глава 2. Режимы БКП

2.1 Режимы БКП

Основной задачей БКП является получение изображений астрономических объектов. В качестве дополнительных режимов, в текущем проекте БКП предусмотрена спектроскопия низкого разрешения, есть возможность реализации коронографического режима наблюдений и поляриметрии.

2.1.1 Режим “Камера”

Режим “Камера” является основным для проведения фотометрии точечных и протяженных источников. Канал УФО размещен в фокусе Несмита и имеет лучшее разрешение, чем наземные телескопы, не оснащенные адаптивной оптикой. Масштаб изображения в каналах ВУФ и БУФ в несколько раз меньше, чем в канале УФО, что позволяет получать пространственное разрешение, ограниченное качеством оптики телескопа Т-170М. Основные характеристики БКП и сравнение с аналогичными камерами телескопа им. Хаббла представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Основные характеристики БКП и камер телескопа им. Хаббла — ACS SBC и WFC3 UVIS

Характеристика	Канал ВУФ	Канал БУФ	Канал УФО	ACS SBC	WFC3 UVIS
Тип ФПУ	МКП, CsI	МКП, GaN	КМОП	МКП, CsI	ПЗС
Диапазон, нм	115–176	150–320	180–1000	115–170	200–1000
Поле зрения, "		Ø 84	270 × 270	34.59 × 30.8	162 × 162
Масштаб, "/рх		0.028	0.13	0.033 × 0.030	0.0395
Размер ФПУ, мм		Ø 25	22.5 × 22.5	25	61 × 61
Кол-во пикселей		Ø 3k	2k × 2k	1k × 1k	4k × 4k
Кол-во фильтров		до 10	до 19	6	62

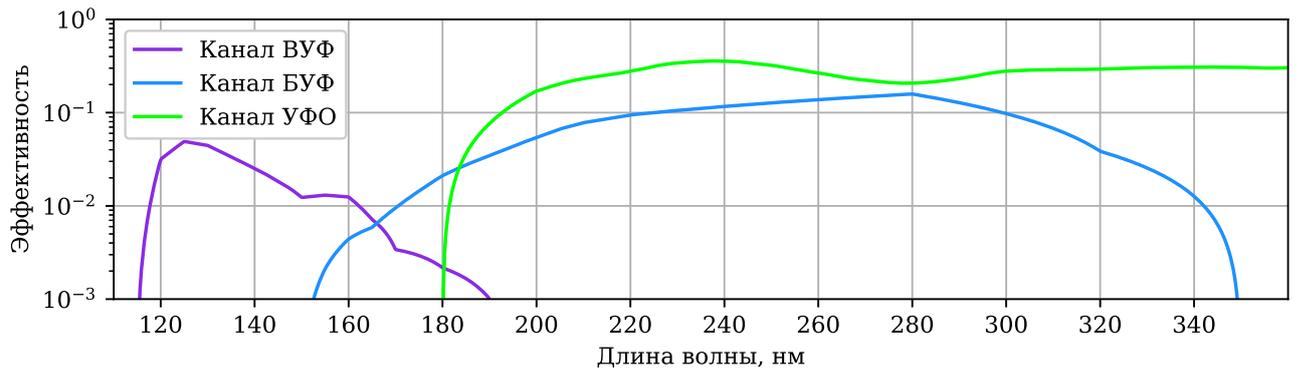


Рисунок 2.1 — Эффективность БКП.

Рабочий спектральный диапазон канала ВУФ с длинноволновой стороны ограничен крайне слабой чувствительностью фотокатода CsI к излучению с длиной волны более 180 нм, а с коротковолновой – поглощением фильтров и входного окна детектора из MgF_2 .

Рабочий спектральный диапазон канала БУФ с длинноволновой стороны ограничен слабой чувствительностью фотокатода GaN к излучению с длиной волны более 320 нм, а с коротковолновой – входным окном детектора из сапфира (Al_2O_3).

Рабочий спектральный диапазон канала УФО с длинноволновой стороны ограничен красной границей внутреннего фотоэффекта в кремнии, а с коротковолновой – входным окном детектора из кварца (SiO_2) и УФ-покрытием на КМОП-чипе.

В канале УФО последовательно размещено 4 колеса фильтров, что позволяет вводить в пучек несколько фильтров одновременно. Такая возможность может быть полезна, например, для калибровки внеполосного пропускания некоторых фильтров.

Во всех колесах фильтров всех каналов предусмотрена возможность установки пустого слота для максимизации эффективности. В каждом канале есть затвор для получения калибровочных кадров, выполненный в виде непрозрачного слота в соответствующих колесах фильтров. Список и основные параметры фильтров БКП представлен в таблице 2. Зависимость эффективности телескопа и БКП без учета фильтров от длины волны представлена на рисунке 2.1.

Таблица 2 — Список фильтров БКП

Фильтры канала ВУФ

Фильтр ВУФ	λ_{min} , нм	Материал	Назначение
F115LP	115	MgF ₂	Ly- α
F125LP	125	CaF ₂	UV2 [10]
F140LP	140	BaF ₂	UV3 [10]
F150LP	150	SiO ₂ кр.	CIV
F165LP	165	SiO ₂ ам.	HeII

Фильтры канала ВУФ

Фильтр ВУФ	λ_{cwl} , нм	FWHM, нм	Назначение
F255W	255	50	Hartley, UV6 [10]
F336W	336	50	Huggins, UV7 [10]
F232N	232	5	CII
F280N	280	5	MgII
F308N	308	5	TiII

Фильтры канала УФО

Фильтр УФО	λ_{cwl} , нм	FWHM, нм	Назначение
F255W	255	50	Hartley, UV6 [10]
F336W	336	50	Huggins, UV7 [10]
F438W	438	70	B
F555W	555	150	V
F606W	606	230	Широкий V
F814W	814	260	Широкий I
F232N	232	5	CII
F280N	280	5	MgII
F308N	308	5	TiII
F656N	656	5	H- α
F673N	673	10	SII

2.1.2 Режим “Спектроскопия”

Спектроскопия в канале ВУФ реализована за счет введения в оптический тракт одной из двух призм, расположенных в МВР. Призма для коротковолновой части диапазона (115–145 нм) будет изготовлена из фторида магния (MgF_2). Спектральная разрешающая способность на длине волны 121.5 нм ($\text{Ly-}\alpha$) будет иметь значение около 1000. Вторая призма, рассчитанная на диапазон 145–176 нм будет изготовлена из фторида бария (BaF_2) или флюорита (CaF_2) и будет иметь спектральную разрешающую способность около 600 на длине волны 164 нм (HeII).

Так как для максимизации эффективности оптическая схема канала ВУФ не содержит плоского ломающего зеркала перед детектором, применение отражательной дифракционной решетки с основным детектором канала невозможно. Дифракционная решетка обеспечивает лучшую равномерность спектральной разрешающей способности по сравнению с призмой. Для канала ВУФ, в случае использования решетки, спектральное разрешение на краях диапазона будет варьироваться менее чем в 2 раза, в то время как для призмы из MgF_2 разница будет примерно в 10 раз. Существует возможность установки отдельного детектора для спектроскопии низкого разрешения в ВУФ диапазоне с применением отражательной решетки.

В канале ВУФ возможно использование как отражательной дифракционной решетки в МВР, так и призмы в колесе фильтров канала.

Для повышения контраста спектра или лучшего разделения спектров разных источников в фокус Несмита могут быть установлены полевые диафрагмы разной формы и размера, а также щель. Такой режим работы БКП частично дублирует спектрограф с длинной щелью (СДЩ), расположенный в блоке спектрографов (БС) из состава комплекса научной аппаратуры «Спектр-УФ». Отличительная особенность режима щелевой спектроскопии низкого разрешения в БКП – использование детектора в режиме счета фотонов, что позволит получить высокое временное разрешение, что может быть полезно при наблюдении транзиентов, и условно нулевой шум считывания для наблюдения сверхслабых источников.

2.1.3 Режим “Коронаграфия”

Для случаев, когда рядом с наблюдаемым объектом находится яркий источник, вызывающий насыщение МКП детектора или снижение контраста изображения за счет рассеянного света, может быть предусмотрен режим “коронаграфия”. Оптическая схема БКП позволяет реализовать коронаграф Лио путем добавления маски, экранирующей яркий источник, в колесо полевых диафрагм и диафрагмы Лио для подавления дифракции в колесо нейтральных фильтров.

2.1.4 Поляриметрия

По причине массовых и габаритных ограничений на оборудование в инструментальном отсеке телескопа, полноценный поляриметр, измеряющий все параметры Стокса, в состав БКП включить невозможно. В случае наличия научной актуальности, в колесо нейтральных фильтров может быть добавлен набор из трех линейных поляризационных фильтров со смещенным направлением поляризации.

Глава 3. Калькулятор экспозиций

3.1 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. недополучаемые другими методами) научные данные. Поэтому за последние 55 лет в мире проведены многие десятки космических экспериментов по наблюдениям в УФ, главным образом в участке спектра 91–310 нм.

В обзоре [Shustov2021] перечисляются некоторые уникальные астрономические открытия, полученные методами УФ астрономии в предыдущие годы, такие как, например, обнаружение молекул H₂ 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 «Космический телескоп Хаббл» (КТХ, HST).

Советские ученые и специалисты по космической технике также добились в этом направлении значительных достижений. С помощью спутника «Астрон» (1983 – 1989 гг.), на борту которого летал крупнейший в те годы космический телескоп «Спика» 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 Ар и Am; выявлены свойства нестационарных звезд (например, карликовых новых), квазаров и галактик, галактических туманностей и диффузного ультрафиолетового излучения Галактики (см. [Boyarchuk+2014]). С помощью КА «Астрон» удалось пронаблюдать такие явления как водяная кома кометы Галлея с 1985 по 1986 год и вспышка сверхновой в Большом Магеллановом облаке в конце февраля 1987 года (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»; он стал одним из проектов серии «Спектр» Федеральной космической программы (ФКП) наряду с проектами «Спектр-Р» (Радиоастрон) и «Спектр-РГ». Проект привлек большое внимание международной научной общественности и изначально (в 1990-е годы) целый ряд стран выразил желание участвовать в 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 и сейчас проект полностью российский.

На данный момент все технические проекты комплекса научных приборов «Спектр-УФ» приняли окончательный вид. В состав комплекса научной аппаратуры (КНА) обсерватории «Спектр-УФ» входят ([Shustov+2021], [Sachkov+2022]):

- Телескоп Т-170М — апертура 170 см, фокальное отношение 10, диаметр поля зрения 30', обеспечивает дифракционное качество изображения в центре поля ([vlasenko+2014]);
- Блок спектрографов (БС) — включает три канала: вакуумный ультрафиолетовый эшелъный спектрограф ВУФЭС ($R \sim 50000$) для работы в диапазоне длин волн 115–175 нм, ультрафиолетовый эшелъный спектрограф УФЭС ($R \sim 50000$, 175–310 нм) и спектрограф с длинной щелью СДЩ ($R \sim 1000$, 115–310 нм) и пространственным разрешением 0.5–1" ([Savanov+2018]);
- Блок камер поля (БКП) — включает три канала с различными рабочими спектральными диапазонами: ВУФ (115–175 нм), БУФ (175–310 нм), УФО (150–1000 нм) и предназначенный для задач фотометрии с высоким угловым разрешением и большим полем зрения. Кроме того, с помощью БКП возможно проводить спектральные наблюдения с низким спектральным разрешением, а также возможны наблюдения с использованием коронографа ([Shmagin+2023], [Sichevsky+2020]);
- Блок управления научными данными (БУНД);



Рисунок 3.1 — Структура комплекса научной аппаратуры космической обсерватории «Спектр-УФ»

– 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 [Aptekar+1995].

Актуальные изменения конструкции и характеристик научных приборов БКП и БС подробно описаны в [Shmagin+2023] и [Shugarov+2023], соответственно.

На рисунке 3.1 схематически представлен состав комплекса научной аппаратуры «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 [Kazakevich+2014], [Marcos-Arenal+2019] для обсерватории «Спектр-УФ» были описаны калькуляторы экспозиций, предназначенные для планирования фотометрических наблюдений с использованием блока камер поля (вариант Испании). Однако, с течением времени состав зарубежных исполнителей менялся и соответственно проводились замены исполнителей на российских, вызвавшие необходимость изменений конструкции научного оборудования обсерватории (см., например, [Shugarov+2014], [Shugarov+2023] и [Shmagin+2023]). Поэтому разработанные программы требовали обновления или замены. Более того, до настоящего момента отсутствовал калькулятор экспозиций, предназначенный для планирования спектральных наблюдений с использованием блока спектрографа «Спектр-УФ».

В рамках подготовки к запуску обсерватории «Спектр-УФ» для эффективного использования создана первая версия полнофункционального калькулятора экспозиций с возможностью работы через web-интерфейс. При разработке этого программного обеспечения естественно использовался опыт других миссий (прежде всего, проекта HST¹).

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.

¹<https://www.stsci.edu/hst>

3.2 Структура и математическая модель калькулятора экспозиций «Спектр-УФ»

3.2.1 Структура калькулятора экспозиций

Калькулятор экспозиций «Спектр-УФ»² 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 сигнал к шуму S/N для наблюдений выбранного астрономического объекта при заданном времени экспозиции t_{exp} ;
2. Расчет времени экспозиции, необходимого для наблюдения астрономического объекта с заданным отношением S/N .

На рисунке 3.2 представлена структура калькулятора экспозиций «Спектр-УФ». Как можно заметить из сравнения Рисунков 3.1 и 3.2 практически все функции, выполняемые калькулятором, соответствуют задачам отдельных научных приборов обсерватории, за исключением режимов «Спектроскопия» и «Коронограф» блока камер поля [Shmagin+2023].

Для того, чтобы реализовать режимы работы калькулятора экспозиций, необходимо задать целый набор начальных данных и условий. Данный набор включает в себя:

1. Выбор измерительного канала и входящих в него научных приборов обсерватории.
2. Выбор параметров экспозиции (отношения сигнал/шум S/N , времени экспозиции t_{exp} , а также длины волны λ в случае планирования спектральных наблюдений) и типа астрономического объекта (протяженный или точечный).
3. Использование спектрального распределения исследуемого астрономического объекта, $F(\lambda)$ (в эрг/(см² с Å) для точечного источника и эрг/(см² с Å угл.сек²) для протяженного источника). В калькуляторе

²<http://etc.wso-uv.org>

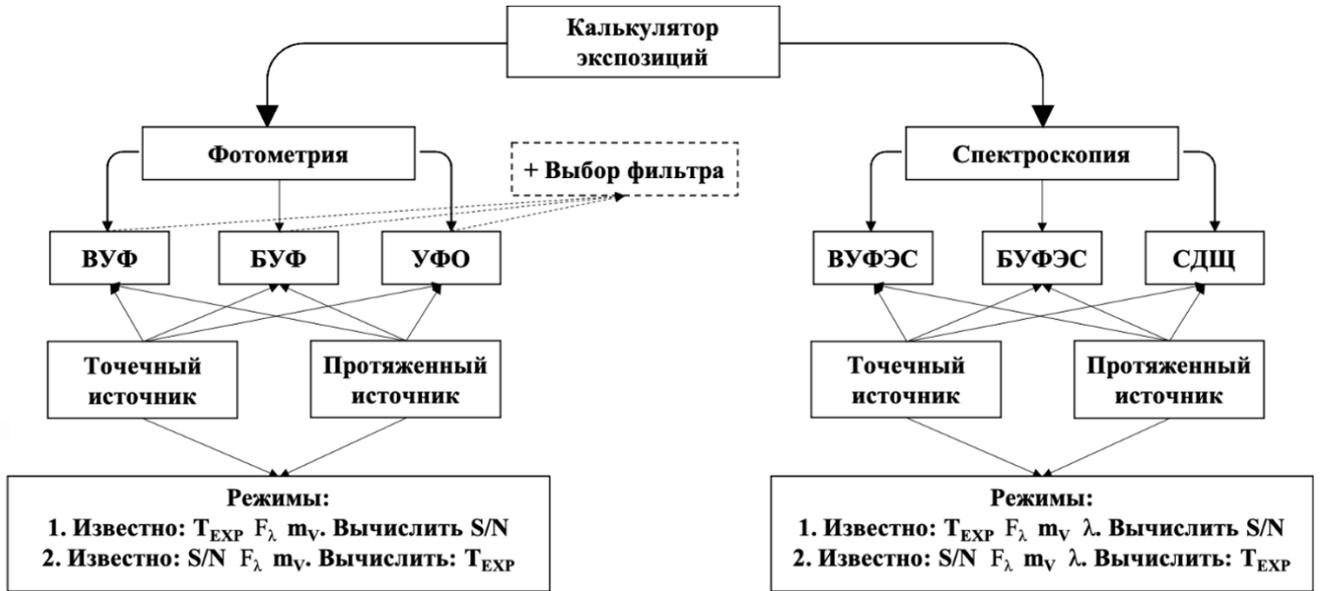


Рисунок 3.2 — Структура калькулятора экспозиций «Спектр-УФ»

экспозиций реализованы следующие варианты задания данного распределения:

- Загрузка собственного спектра объекта или выбор спектра звезды определенного спектрального класса из баз данных [Castelli+2003], [Pickles1998] и [Kurucz1993], опубликованных в [Diaz2019]. Отметим, что:
 - Из базы данных моделей звездных атмосфер [Castelli+2003] 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 $\log(g) = 2 - 5$, металличностью $\log(Z) = 0$.
 - В базе данных [Pickles1998] 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.
 - В свою очередь, из базы данных звездных атмосфер [Kurucz1993] на выбор доступны спектры звезд спек-

тральных классов O3–M5 с эффективной температурой 3 200–52 000 К, ускорением силы тяжести на поверхности $\log(g) = [0-5]$, 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 [Coleman+1980], [Benitez+2004] и базы данных [Diaz2019]; галактик со вспышкой звездообразования из [Kinney+1996], [Benitez+2004]; квазара из работы [Zheng+1997] (спектр составлен на основе наблюдений на телескопе HST со спектрографом FOS (Faint Object Spectrograph)); туманности Ориона и планетарной туманности NGC 7009 из базы данных [Diaz2019];
- Выбор спектрального распределения звезд-стандартов для телескопа HST из [Bohlin+2020], [Diaz2019]. Для выбора доступны составные спектры белых карликов, суб-карликов, и звезд главной последовательности, включая Солнце, полученные на спектрографах телескопа 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 распределения потока в эмиссионной спектральной линии $F(\lambda) = F_{line}/(\sigma\sqrt{2\pi}) \times \exp(-(\lambda - \lambda_c)^2/(2\sigma^2))$, $\sigma = \text{FWHM}/(2\sqrt{2\ln 2})$, при этом задается длина волны λ_c в центре линии, интегральный поток в линии F_{line} и полная ширина линии на полувысоте FWHM.

4. Нормализацию заданного модельного спектрального распределения астрономического объекта на его видимую звездную величину в фильтре V [Kazakevich+2014], [Marcos-Arenal+2019] по формуле

$$F_{\lambda} = SED_{\lambda} \times 10^{(-0.4m_V)} \times \frac{\int_{\lambda} R_{\lambda V} \times SED_{Vega_{\lambda}} d\lambda}{\int_{\lambda} R_{\lambda V} \times SED_{\lambda} d\lambda}, \quad (3.1)$$

где SED_{λ} – заданное спектральное распределение объекта, m_V – видимая звездная величина; $SED_{Vega_{\lambda}}$ – спектр Веги, $R_{\lambda V}$ – пропускная способность фильтра V на данной длине волны. 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_{norm} на заданной длине волны λ_{set} :

$$F_{\lambda} = SED_{\lambda} \times \frac{F_{norm}(\lambda_{set})}{SED_{\lambda}(\lambda_{set})} \quad (3.2)$$

5. Учет изменения длины волны из-за красного смещения z , используя известное отношение $\lambda_{obs} = (1 + z)\lambda_{rest}$, а также учет межзвездного поглощения, используя стандартную формулу $F_{\lambda} = F_{\lambda_{source}} * exp(-A_V/1.086)$, 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 [Cardelli+1989]. Стоит отметить, что данная кривая 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 [Diaz2015] для трех значений поверхностной яркости: 22.1 зв.вел./угл.сек² (высокий уровень зодиакального света); 22.7 зв.вел./угл.сек² (средний уровень); 23.3 зв.вел./угл.сек² (низкий уровень). Кроме того, имеется возможность нормализации интенсивности зодиакального света на заданную поверхностную яркость в фильтре V , $F_{zodiac_{\lambda}} = SED_{zodiac_{\lambda}} \times 10^{(-0.4(m_V - 22.1))}$. Стоит отметить, что поверхностная яркость зодиакального света, строго говоря, зависит от направления наблюдений (см., например, [Leinert+1998], 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» [Kazakevich+2014], 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 HI Ly α (1216Å), триплета OI (1302.2, 1304.9 и 1306.0Å), OI (1356Å) и OII (2471Å) задается согласно данным STIS Instrument Handbook проекта HST [Medallon+2023]. 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 HI Ly α (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.

3.2.2 Математическая модель калькулятора экспозиций

На основе заданных параметров, а также известных характеристик научных приборов КНА «Спектр-УФ» в калькуляторе экспозиций далее последовательно вычисляется отношение сигнал к шуму от астрономического объекта при заданном времени экспозиции t_{exp} :

$$S/N = \frac{Ct_{exp}}{\sqrt{Ct_{exp} + (B_{det} + B_{sky})N_{pix}t_{exp} + \frac{N_{pix}}{N_{bin}}N_{read}R^2}} \quad (3.3)$$

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

$$t_{exp} = \frac{(S/N)^2(C + N_{pix}(B_{det} + B_{sky})) + \sqrt{(S/N)^4(C + N_{pix}(B_{det} + B_{sky}))^2 + 4(S/NC)}}{2C^2} \quad (3.4)$$

где B_{sky} – фон неба ($e^-/с/пиксел$); B_{det} – темновой ток детектора ($e^-/с/пиксел$); $N_{pix} = n_x \times n_y$ – количество пикселов по осям x , y , на которых достигается определенный уровень приходящего сигнала. По умолчанию, согласно функции рассеяния точки PSF, этот уровень соответствует 80% сигнала для площадки 5×5 пикселов. Однако, пользователю предоставлена возможность изменить размер данной площадки и, соответственно, уровень приходящего сигнала; N_{bin} – общее число объединенных пикселов, полученное в процессе считывания информации с ПЗС детектора (по умолчанию $N_{bin} = 1$); N_{read} – количество считываний детектора (по умолчанию $N_{read} = 1$); R – шум считывания e^- ; C – полезный сигнал от астрономического объекта, который для разных задач вычисляется следующим образом:

- Для фотометрии точечного источника:

$$C = E_f \frac{1}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda} A_{eff}(\lambda) QE(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (3.5)$$

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

- Для фотометрии протяженного источника:

$$C = (p_{sx} * scale)(p_{sy} * scale) N_{pix} \frac{1}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} A_{eff}(\lambda) QE(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (3.6)$$

где p_{sx}, p_{sy} – размер пикселей в направлении x и y , соответственно, в микронах; $scale$ – масштаб изображения, угл.сек/микрон; I_λ – спектральное распределение энергии протяженного астрономического объекта с одной квадратной секунды (поверхностная яркость), эрг/(см² с Å угл.сек²).

– Для спектроскопии точечного астрономического объекта [Medallon+2023]:

$$C = E_{f_{spec}} * F_\lambda * \frac{A_{eff_{spec}} * QE * d * \lambda}{hc} * N_{\lambda pix}, \quad (3.7)$$

где $E_{f_{spec}}$ – доля энергии, заключенная в N_{spix} пикселей в направлении, перпендикулярном дисперсии; $A_{eff_{spec}} = A * Q_{tel}(\lambda) * S_{spec}(\lambda)$, см² – эффективная площадь комплекса «телескоп+спектрограф»; $S_{spec}(\lambda)$ – эффективность спектрографа; d – дисперсия, Å/пиксел; $N_{\lambda pix}$ – количество пикселей в направлении дисперсии.

– Для спектроскопии протяженного источника [Medallon+2023]:

$$C = I_\lambda * \frac{A_{eff_{spec}} * QE * d * \lambda}{hc} * scale_s * W * N_{spix} * N_{\lambda pix}, \quad (3.8)$$

где $scale_s$ – масштаб изображения в направлении, перпендикулярном дисперсии, угл.сек/пиксел; W – ширина щели в угловых секундах.

Вычисление фона неба производится аналогично выражениям (3.6) и (3.8) 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_{line} , так и поток в континууме C_{cont} . Выражение (3.3) в этом случае преобразуется в:

$$S/N = \frac{C_{line} t_{exp}}{\sqrt{(C_{line} + C_{cont}) t_{exp} + (B_{det} + B_{sky}) N_{pix} t_{exp} + \frac{N_{pix}}{N_{bin}} N_{read} R^2}} \quad (3.9)$$

3.2.3 Вывод результатов

Каждый расчет с использованием математической модели калькулятора экспозиций (выражения (3.1) – (3.9) завершается выводом следующих результатов:

1. Основного результата (отношение S/N или время экспозиции t_{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).

3.3 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.

3.3.1 Фотометрия слабого точечного источника

Рассмотрим в качестве примера наблюдения звезды спектрального класса F0V с видимой звездной величиной 23.5^m , эффективной температурой 7250 К, $\log(g) = 4$, солнечной металличностью и спектром, взятым из базы данных [Castelli+2003]. Произведем расчет отношения S/N , которое можно достигнуть с использованием канала БУФ блока камер поля Спектр-УФ и фильтром

F255W [Shmagin+2023] за 20 минут экспозиции. Предположим также средний уровень зодиакального света (22.7 зв.вел./угл.сек²) При расчете используем площадку из пикселей 5×5 , в которой сконцентрировано 80% приходящего сигнала.

Для того, 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 (выражение (3.1)), расчет полезного сигнала от астрономического объекта (выражение (3.5)), расчет приходящего сигнала от зодиакального света и свечения экзосферы Земли (аналогично выражению (3.6)) и, наконец, расчет отношения S/N (3.3).

На рис. 3.3 и 3.4 представлены детальные результаты данных расчетов. На рис. 3.3 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. 3.4 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 [Castelli+2003]; 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 сигнал/шум для рассматриваемой задачи.

На рис. 3.4 (левая верхняя панель) виден недостаток использования базы данных [Castelli+2003] в УФ диапазоне, т.к. в этой базе отсутствуют спектральные распределения на длинах волн $< 1800\text{\AA}$ для звезд более поздних спектральных классов, чем классы O и A. Рассчитанное отношение сигнал/шум для данной задачи составило 6.2. Аналогичные расчеты с помощью калькуляторов экспозиций камер ACS HRC³ (использовался доступный фильтр F250W) и WF3C UVIS⁴ (использовался фильтр F270W) телескопа 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

³<https://etc.stsci.edu/etc/input/acs/imaging>

⁴<https://etc.stsci.edu/etc/input/wf3uvis/imaging/>

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

Рисунок 3.3 — Пример вывода результатов программы FCU Imaging ETC калькулятора. В верхней части рисунка показаны значения времени экспозиции и отношения S/N .

поля телескопа «Спектр-УФ». Аналогичным образом можно показать ограничения и других каналов БКП. Так на рис. 3.5 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. 3 представлены минимальные

значения видимой звездной величины для звезд спектральных классов O3V, A0V, G0V, для которых за 3600 с можно получить $S/N = 10$ в разных каналах и фильтрах БКП.

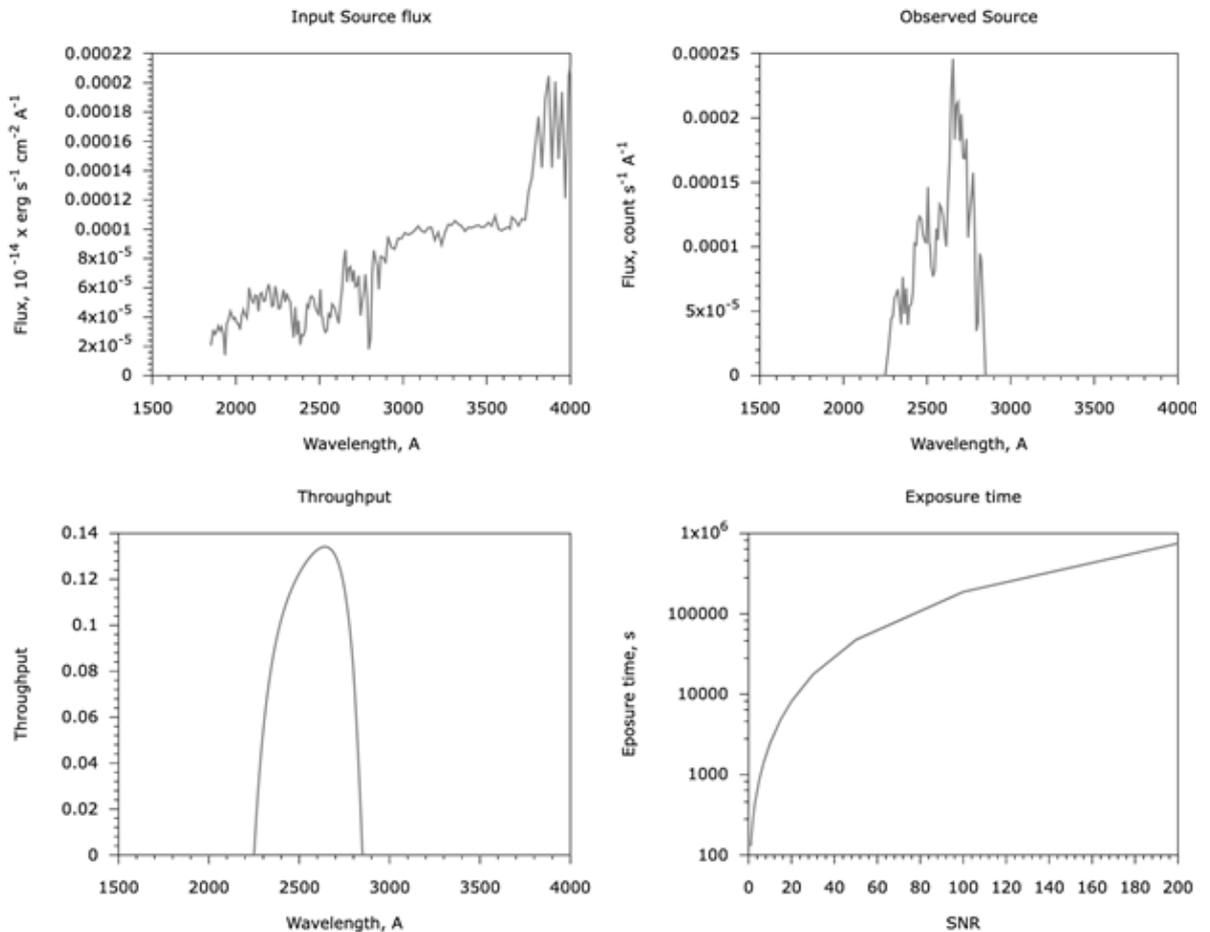


Рисунок 3.4 — Пример вывода результатов программы FCU Imaging ETC калькулятора. На левом верхнем графике показан нормализованный на звездную величину 23.5^m в фильтре V спектр звезды спектрального класса F0V из базы данных [Castelli+2003]. На правом верхнем графике показан вычисленный полезный сигнал 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 сигнал/шум для рассматриваемой задачи.

^a Вообще говоря, использование модели [Castelli+2003] 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.

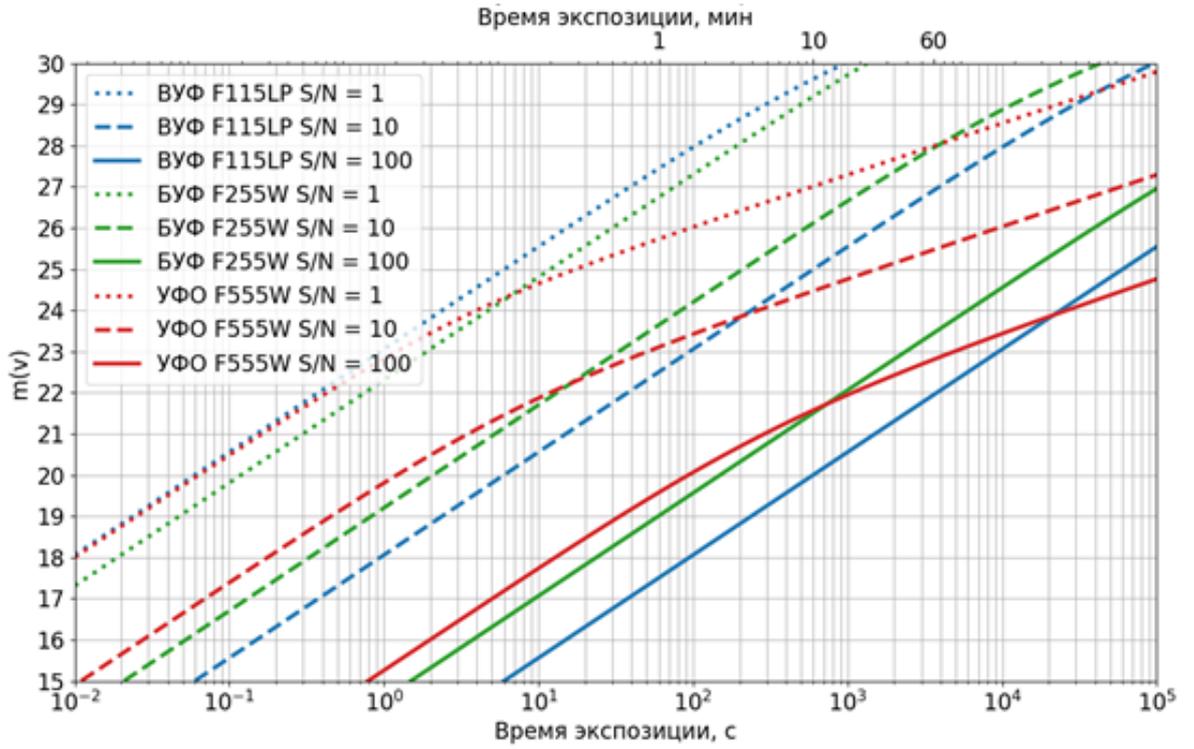


Рисунок 3.5 — Зависимость времени экспозиции от видимой звездной величины для звезды спектрального класса O5V при наблюдении данного объекта в каналах ВУФ с фильтром F115LP, БУФ с фильтром F255W, УФО с фильтром F555W — при заданных значениях $S/N = 1, 10, 100$. Верхняя шкала по оси абсцисс указана в минутах, нижняя — в секундах.

Таблица 3 — Предельные значения видимых звездных величин в фотометрических наблюдениях звезд при условии достижения $S/N = 10$ и при $t_{exp} = 3600$ с. Спектры рассматриваемых звезд взяты из каталога [Castelli+2003].

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

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. 3.5 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. (3.5)) становится меньше темнового тока, который для рассматриваемого канала составляет $0.3 \text{ e}^-/\text{с}/\text{пиксел}$. 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 4×10^{-5} и $4 \times 10^{-4} \text{ e}^-/\text{с}/\text{пиксел}$, соответственно.

3.3.2 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 К, $\log(g) = 4.5$, солнечной металличностью и спектром из базы данных [Castelli+2003]. 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\AA при среднем уровне зодиакального света. Для расчета полезного сигнала в соответствии с выражением (3.7), используется значение $N_{\text{pix}} = 7$ пикселей, в которых сконцентрирована доля энергии приходящего сигнала $E_{f_{\text{spec}}} = 0.8$. Количество пикселей в направлении дисперсии равно 2. Рассчитанное t_{exp} для рассматриваемой задачи составило 15 750 с. Пример выводимых программой WUVS Spectroscopic ETC графических результатов показан на рис. 3.6. Расчеты для данной задачи были сделаны также с помощью калькуляторов экспозиций спектрографов STIS и COS космического телескопа HST. Здесь t_{exp} составило 79 000 с при использовании спектрографа STIS [Medallon+2023] с решеткой E140M ($R = 46\,800$) и 3 460 с при использовании спектрографа COS [Hirschauer2023] 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. 3.7 приведены значения пропускной способности спектрографов ВУФЭС «Спектр-УФ», COS G160M и STIS E140M. Значения данного параметра на длине волны 1650\AA составляют 0.8, 0.6 и 0.06%, соответственно.

В табл. 4, аналогичной табл.3, представлены предельные значения звездных величин для спектральных наблюдений звезд разных спектральных классов с параметрами экспозиции: $S/N = 15$, $t = 10\,800$ 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.

Таблица 4 — Предельные значения видимых звездных величин в спектроскопических наблюдениях звезд при условии достижения $S/N = 15$ и при $t_{exp} = 10\,800$ с. Спектры рассматриваемых звезд взяты из каталога [Castelli+2003].

Спектральный класс и параметры звезды	Спектрографы обсерватории «Спектр-УФ»					
	ВУФЭС ($R = 50\,000$)		БУФЭС ($R = 50\,000$)		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 ($T_{eff} = 41\,000$ K)	15	16.6	18.5	18.9	21.4	22.3
A0V ($T_{eff} = 9\,500$ K)	0.8 ^a	12.6	14.9	16.3	17.2	19.4
G0V ($T_{eff} = 6\,000$ K)	- ^a	1.7	8.3	13.7	4.5	16.5

^aКак отмечалось ранее, недостатком каталога [Castelli+2003] 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.

3.4 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, причем 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), обращение к ней:

<http://etc.wso-uv.org/groundsegment/scienceoperation/etc/fcu/imag>

и спектральных наблюдений (WUVS Spectroscopic ETC), обращение к ней:

<http://etc.wso-uv.org/groundsegment/scienceoperation/etc/wuvs/spe>

Данные программы позволяют пользователю планировать наблюдения конкретных астрономических объектов с помощью инструментов обсерватории «Спектр-УФ». Кроме задания стандартных входных параметров (время экспозиции, отношение сигнал/шум) пользователь может задавать типичное спектральное распределение излучения выбранного объекта, нормализовать такой спектр на видимую звездную величину или 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 геокорональной эмиссии.

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 телескопа 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.
- Получены ограничения на спектральные наблюдения объектов различной яркости.

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. Кроме того, 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 [Cardelli+1989];
- 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).

Таким образом, 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».

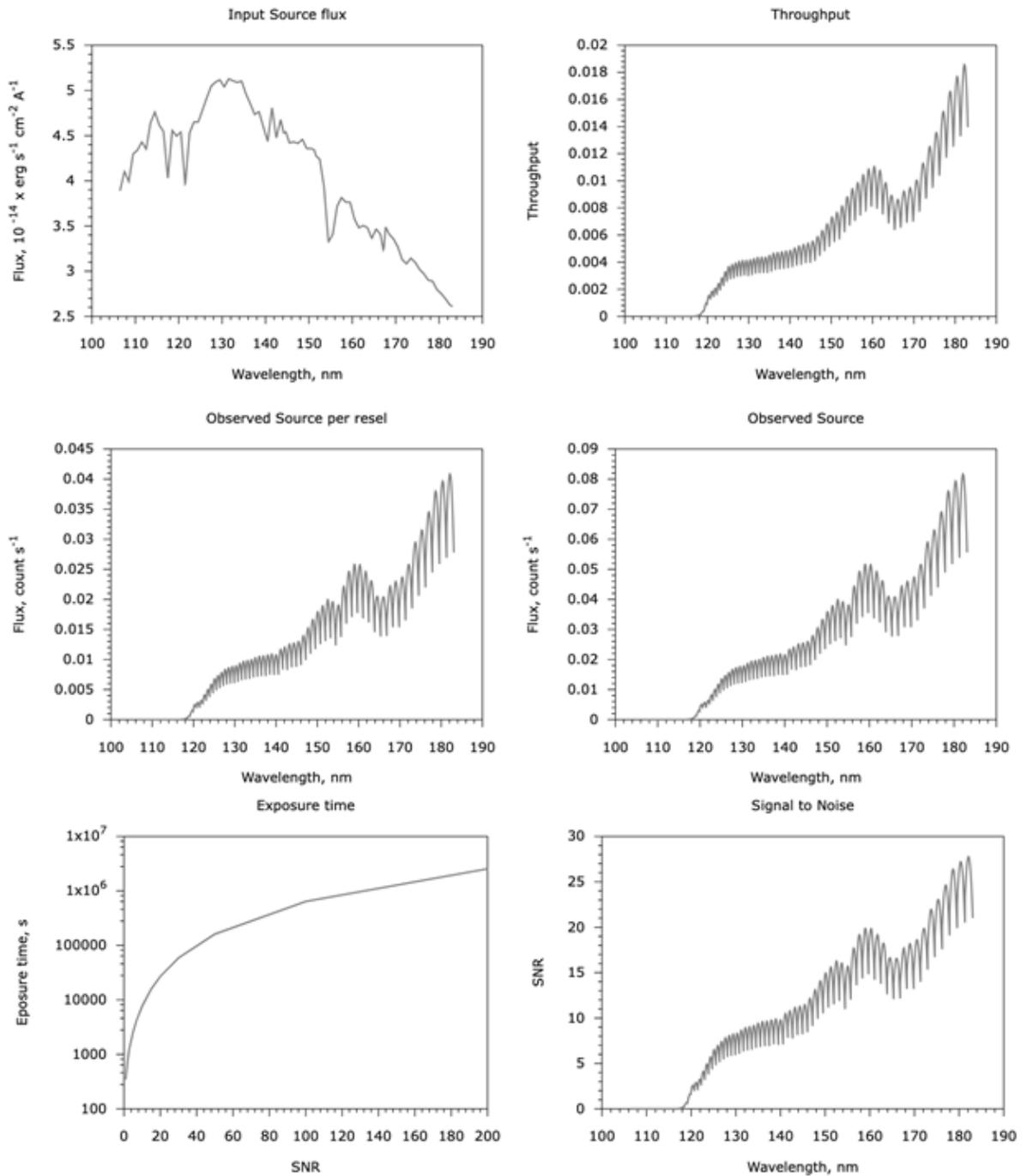


Рисунок 3.6 — Результаты работы калькулятора WUVS Spectroscopic ETC для задачи спектроскопии звезды спектрального класса O5V с помощью спектрографа ВУФЭС. На левом верхнем графике показан нормализованный на звездную величину 16^m в фильтре V спектр звезды спектрального класса O5V из базы данных [Castelli+2003]. 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 $N_{\text{spix}} \times N_{\text{λpix}} = 7 \times 2$ пикселей) и в отсчетах/с, соответственно. На левом нижнем графике, для удобства пользователя, показана зависимость времени экспозиции от отношения сигнал/шум для рассматриваемой задачи. На правом нижнем графике показана зависимость отношения сигнал/шум от длины волны для рассматриваемой задачи.

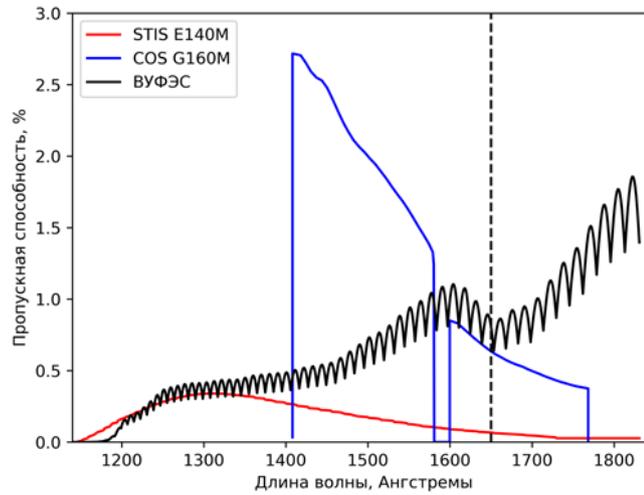


Рисунок 3.7 — Зависимость пропускной способности от длины волны для спектрографов ВУФЭС Спектр-УФ (черная кривая), STIS с решеткой E140M (красная кривая) и COS с решеткой G160M (синяя кривая). Пропускные способности спектрографов STIS и COS получены с помощью калькулятора экспозиций проекта HST. Для наглядности, пропускная способность спектрографа STIS сглажена фильтром Савицкого-Галлея с окном 190 и порядком полинома, равным 3.

Заключение

Обсерватория “Спектр-УФ” является крайне актуальным проектом. В частности, большие надежды на проект возлагаются для задач исследования атмосфер экзопланет. Решены технические вопросы, решен вопрос с замещением импортных критических компонентов. Ритмичное финансирование обеспечит запуск до 2029 года. Большинство составных частей КНА прошли конструкторско-доводочные испытания или находятся на стадии подготовки к ним. Определённый запас времени позволил рассмотреть возможности некоторых улучшений в структуре проекта, в том числе и в БКП.

Разработанный вариант БКП имеет высокую чувствительность, большое поле зрения. Есть возможность работать не только в УФ, но и в оптическом и ближнем ИК диапазонах до 1000 нм. МКП-приемники ВУФ и БУФ каналов будут работать в режиме счета фотонов, что позволит получать фотометрические данные с миллисекундным временным разрешением. БКП будет уникальной астрономической камерой УФ-диапазона, обладающей субсекундным угловым разрешением (в ВУФ даже лучше 0.1”). Характеристики БКП будут аналогичны характеристикам камер ACS (Advanced Camera for Survey) Космического Телескопа Хаббла (КТХ).

Список рисунков

1.1	Оптическая схема БКП.	19
2.1	Эффективность БКП.	21
3.1	Структура комплекса научной аппаратуры космической обсерватории «Спектр-УФ»	27
3.2	Структура калькулятора экспозиций «Спектр-УФ»	30
3.3	Пример вывода результатов программы FCU Imaging ETC калькулятора. В верхней части рисунка показаны значения времени экспозиции и отношения S/N	38
3.4	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 [Castelli+2003]. 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 сигнал/шум для рассматриваемой задачи.	39
3.5	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 заданном значениях $S/N = 1, 10, 100$. Верхняя шкала по оси абсцисс указана в минутах, нижняя – в секундах.	40

- 3.6 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 [Castelli+2003]. 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 $N_{spix} \times N_{\lambda pix} = 7 \times 2$ пикселей) и в отсчетах/с, соответственно. На левом нижнем графике, для удобства пользователя, показана зависимость времени экспозиции от отношения сигнал/шум для рассматриваемой задачи. На правом нижнем графике показана зависимость отношения сигнал/шум от длины волны для рассматриваемой задачи. 46
- 3.7 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, пропускная способность спектрографа STIS сглажена фильтром Савицкого-Галлея с окном 190 и порядком полинома, равным 3. 47

Список таблиц

1	Основные характеристики БКП и камер телескопа им. Хаббла – ACS SBC и WFC3 UVIS	20
2	Список фильтров БКП	22
3	Предельные значения видимых звездных величин в фотометрических наблюдениях звезд при условии достижения $S/N = 10$ и при $t_{exp} = 3\,600$ с. Спектры рассматриваемых звезд взяты из каталога [Castelli+2003].	40
4	Предельные значения видимых звездных величин в спектроскопических наблюдениях звезд при условии достижения $S/N = 15$ и при $t_{exp} = 10\,800$ с. Спектры рассматриваемых звезд взяты из каталога [Castelli+2003].	42

Список литературы

1. World space observatory-ultraviolet among UV missions of the coming years / B. Shustov [и др.] // *ApSS*. — 2011. — Сент. — Т. 335. — С. 273—282.
2. WSO-UV progress and expectations / B. Shustov [и др.] // *ApSS*. — 2014. — Ноябрь. — Т. 354. — С. 155—161.
3. WSO-UV project for high-resolution spectroscopy and imaging / M. Sachkov [и др.] // *Astronomische Nachrichten*. — 2014. — Янв. — Т. 335. — С. 46—50.
4. *Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A. I. World Space Observatory Ultraviolet mission: status 2016* // *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*. Т. 9905. — 07.2016. — С. 990504. — () .
5. The World Space Observatory Ultraviolet (WSO-UV), as a bridge to future UV astronomy / B. Shustov [и др.] // *ApSS*. — 2018. — Апр. — Т. 363, № 4. — С. 62. — arXiv: [1802.06849](https://arxiv.org/abs/1802.06849) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1802.06849)].
6. Scientific problems addressed by the Spektr-UV space project (world space ObservatoryUltraviolet) / A. A. Boyarchuk [и др.] // *Astronomy Reports*. — 2016. — Янв. — Т. 60. — С. 1—42.
7. World Space Observatory-Ultraviolet: ISSIS, the imaging instrument / A. I. Gómez de Castro [и др.] // *Advances in Space Research*. — 2014. — Март. — Т. 53. — С. 996—1002. — arXiv: [1302.1004](https://arxiv.org/abs/1302.1004) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1302.1004)].
8. Field Camera Unit of the «Spektr-UF» space mission / S. G. Sichevsky [и др.] // *A.A. Boyarchuk Memorial Conference* / под ред. D. V. Bisikalo, D. S. Wiebe. — 05.2018. — С. 377—382.
9. New Imaging Instrument Onboard the WSO-UV / M. Sachkov [и др.] // *Stars: From Collapse to Collapse*. Т. 510 / под ред. Y. Y. Balega [и др.]. — 06.2017. — С. 573—575. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
10. The IAU recommended photometric system for ultraviolet astronomy / A. I. Gómez de Castro [и др.] // *Experimental Astronomy*. — 2023. — Июнь. — Т. 56. — С. 171—195.