

А.А. Солодовник¹ , Б.М. Усеинов^{1*} , Т.Б. Касенов¹ ,

П.Л. Журавлёв² , Н.П. Солодовник¹ 

¹Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан

²Назарбаев интеллектуальная школа, Петропавловск, Казахстан

*e-mail: buseinov@gmail.com

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ КАМЕРЫ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

На основании анализа снимков кометы C/2023 A3 Tsuchinshan-ATLAS, полученных как в видимом свете, так и в ближней инфракрасной области (длина волны более 850 нм) с помощью камер CANON EOS 2000D и CANON EOS 1000DI (инфракрасной), исследуется влияние спектрального диапазона наблюдения на контраст изображений. Критерием качества изображения объекта принята его контрастность. Расчёт коэффициентов контрастности снимков выполнен с помощью стандартной программы ImageJ, применяемой для обработки и анализа изображений в различных научных приложениях. Использовано несколько подходов к определению контрастности изображений кометы. Сравнение полученных результатов не обнаружило заметных преимуществ съёмки в указанных выше участках спектра. Вместе с тем анализ изображений серебристых облаков, полученных в рамках той же методики выявил значительное преимущество применения инфракрасной съёмки, резко повышающей контраст снимков. Детальный анализ условий съёмки позволил предположить, что снижение эффективности применения инфракрасной съёмки обусловлено переходом от условий рассеяния света дневным небом к сумеречному, а затем и к ночному. Предлагается обоснование задачи дальнейшего изучения способов повышения эффективности съёмки при переходе от видимого диапазона спектра к ближней инфракрасной области спектра.

Ключевые слова: кометы, цифровые камеры, оптические фильтры, получение изображений, инфракрасный диапазон, исследование изображений, коэффициент контрастности, влияние фона неба.

А.А. Солодовник¹, Б.М. Усеинов^{1*}, Т.Б. Касенов¹,

П.Л. Журавлёв², Н.П. Солодовник¹

¹М.Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан

²Назарбаев зияткерлік мектебі, Петропавл, Қазақстан

*e-mail: buseinov@gmail.com

Астрономиялық объектілерді зерттеудің инфрақызыл камераны пайдалану тәжірибесі

CANON EOS 2000D және CANON EOS 1000DI (инфрақызыл) камераларының көмегімен көрінетін жарықта да, жақын инфрақызыл аймақта да (толқын ұзындығы 850 нм-ден астам) алынған C/2023 A3 Tsuchinshan-ATLAS кометасының суреттерін талдау негізінде, бақылау диапазонындағы кескіннің әсері бақылау диапазонында көрсетілген. Объектінің кескін сапасының критерийі оның контрасты болып табылады. Суреттердің контраст коэффициенттерін есептеу әртүрлі ғылыми қолданбаларда кескіндерді өңдеу және талдау үшін қолданылатын стандартты ImageJ бағдарламасы арқылы орындалды. Комета кескіндерінің контрастын анықтау үшін бірнеше тәсілдер қолданылды. Алынған нәтижелерді салыстыру жоғарыда аталған спектрлік аймақтарда түсірудің айтарлықтай артықшылығын анықтаған жоқ. Сонымен қатар, сол әдістемені қолдану арқылы алынған

түнгі бұлттардың суреттерін талдау инфрақызыл фотосуреттерді қолдануда айтарлықтай артықшылықты анықтады, бұл кескіндердің контрастын күрт арттырады. Түсіру жағдайларын егжей-тегжейлі талдау инфрақызыл түсіру тиімділігінің төмендеуі күндізгі аспанмен жарықтың шашырау жағдайларынан ымырт аспанға, содан кейін түнгі аспанға өтуімен байланысты деп болжауға мүмкіндік берді. Спектрдің көрінетін диапазонынан спектрдің жақын инфрақызыл аймағына көшу кезінде түсіру тиімділігін арттыру әдістерін одан әрі зерттеудің негіздемесі ұсынылады.

Түйін сөздер: кометалар, сандық камералар, оптикалық сүзгілер, бейнелеу, инфрақызыл диапазон, кескінді зерттеу, контраст қатынасы, аспан фонының әсері.

A.A. Solodovnik¹, B.M. Useinov¹, T.B. Kassenov¹,
P.L. Zhuravlev², N.P. Solodovnik¹

¹Manash Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavl, Kazakhstan

²Nazarbaev Intellectual school, Petropavl, Kazakhstan

*e-mail: buseinov@gmail.com

Experience of using an infrared camera in the study of astronomical objects

Based on the analysis of images of comet C/2023 A3 Tsuchinshan-ATLAS, obtained in both visible light and near-infrared range (wavelength over 850 nm) using CANON EOS 2000D and CANON EOS 1000DI (infrared) cameras, the influence of the observation spectral range on image contrast is studied. The image quality criterion is its contrast. Contrast coefficient calculations were performed using the standard ImageJ program used for image processing and analysis in various scientific applications. Several approaches to determining comet image contrast were used. Comparison of the obtained results did not reveal significant advantages of shooting in the mentioned spectral ranges. However, the analysis of noctilucent cloud images obtained using the same methodology revealed a significant advantage of infrared imaging, which sharply increases image contrast. A detailed analysis of shooting conditions suggested that the reduced effectiveness of infrared imaging is due to the transition from light scattering conditions of the daytime sky to twilight, and then to night conditions. A rationale is proposed for further studying methods of improving imaging efficiency when transitioning from the visible spectrum range to the near-infrared spectrum range.

Keywords: comets, digital cameras, optical filters, image acquisition, infrared range, image research, contrast coefficient, sky background influence.

Введение

В настоящее время изучение малых тел Солнечной Системы характерно необычайно высокой активностью. В номинацию малых тел традиционно включают спутники планет, астероиды и кометы. Проблематично выделить среди этих объектов самые приоритетные, но можно сказать определённо, что интерес к изучению комет продиктован как научными соображениями фундаментального характера, так и вполне практическими замыслами. В самом деле кометы с одной стороны дают ценнейшую информацию об эпохе формирования планет в нашей системе и химических процессах, определивших биологическую эволюцию материи. Также с другой стороны кометы рассматриваются с позиций перспективы астроинженерной деятельности цивилизации в

будущем, как неиссякаемый источник летучих веществ и, главное, воды [1-6].

Интересно отметить и то обстоятельство, что весьма обширный опыт исследования комет, убедил астрономов в огромном разнообразии их типов, что проявляется, прежде всего, в характере их взаимодействия с потоком излучения Солнца, солнечным ветром, межпланетной средой. При этом и физико-химические свойства комет, и характер их эволюции часто преподносят сюрпризы. В целом можно сказать, что двух одинаковых комет не бывает. Поэтому изучение каждой вновь появляющейся кометы имеет непреходящую научную ценность [5, 7 -9].

Это тем более актуально, когда речь идёт о ярких кометах, перемещающихся во внутренние области планетной системы из облака Оорта.

Именно таким объектом стала недавняя комета C/2023 A3 Tsuchinshan-ATLAS, которая своей относительно высокой яркостью привлекла внимание наблюдателей всего мира.

Отметим некоторые общие характеристики кометы, которые, в свою очередь, могут определять её физико-химические свойства. Комета имеет слабо гиперболическую

Методы получения изображений кометы C/2023 A3 Tsuchinshan-ATLAS в обсерватории СКУ

Получение важной информации о специфике оптических характеристик кометы, а, следовательно, о физико-химическом состоянии вещества её комы и хвоста, по нашему мнению, возможно на основе сравнения её изображений, полученных в видимой области спектра и в ближней инфракрасной области. И если получение снимков комет в оптическом диапазоне – давно освоенная практика астрофизики, то снимки комет в инфракрасном пока что редки. Таким образом постановка наблюдений кометы в ИК диапазоне заведомо обладает научной новизной.

Для регистрации оптических изображений кометы применялась хорошо зарекомендовавшая себя в мониторинге серебристых облаков и метеорных явлений камера CANON EOS 2000D [10]. В практике астрономических наблюдений очень полезен как широкий диапазон настраиваемой чувствительности камеры (до 12800 единиц), так и её способность обрабатывать экспозиции от 0.0005 до 300 секунд. Имеющиеся в обсерватории камеры оснащены набором объективов с различными фокусными расстояниями, которые подбираются в соответствии со спецификой решаемых задач.

В отличие от оптического диапазона съёмка в ближней инфракрасной области большинства астрономических объектов обычными камерами практически невозможна. Такое ограничение имеет конструктивный характер. Дело в том, что сами приёмники (сенсоры) цифровых камер обычно имеют чувствительность к излучению с длиной волны вплоть до 1200 нм при максимуме около 800 нм (рис. 1a). Но производители камер, как правило, помещают перед сенсором специальный фильтр, почти полностью обрезающий излучение с длиной волны более 720-740 нм (рис. 1b). Это позволяет достигать максимальной резкости снимков в оптическом диапазоне длин волн. При этом оптика объектива не препятствует съёмке в ИК диапазоне (рис. 1c) [11].

(эксцентриситет 1.000093) орбиту с наклоном 139.1°, расстояние в перигелии составило 0.391 астрономической единицы. Таким образом, она, по-видимому, прибыла к нам из облака Оорта, имея в составе своего ядра большой запас льдов летучих веществ. Последнее обстоятельство не могло не отразиться на спектральных и фотометрических особенностях кометы [5].

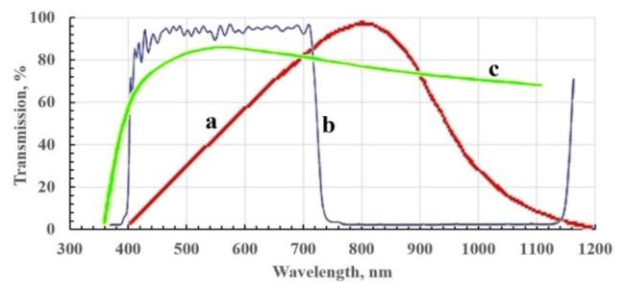


Рисунок 1 – В обоснование повышения чувствительности цифровых камер в ближней инфракрасной области

Таким образом, оказывается возможным резко повысить чувствительность сенсора камер CANON к излучению в ближнем инфракрасном диапазоне путём удаления такого ограничительного фильтра. При этом предполагалось, что чувствительность камер в рассматриваемой области спектра, возможно, увеличиться, по меньшей мере, на порядок. Такая работа была проведена в специализированной мастерской (Москва, РФ) в июле 2024 года с камерой CANON EOS 1000 D. Проведённые тестовые снимки объектов при дневном освещении, на фоне сумеречного сегмента, а также ночного неба и звёзд показали, что чувствительность этой камеры в ближней инфракрасной области на самом деле возросла практически на три порядка. Это открыло совершенно новые возможности в проведении исследований ряда небесных объектов и явлений.

Для получения изображений в инфракрасной области спектра в свою очередь необходимо установить перед объективом камеры соответствующий фильтр. На этот раз фильтр обрезающий излучение в оптическом диапазоне длин волн. Для работы с инфракрасной камерой в Обсерватории имеется набор из трёх стандартных инфракрасных фильтров: RG 780, RG 830 и RG 850 [12]. В маркировке фильтров числа

указывают условное начало соответствующих полос пропускания. Вид полос пропускания всех указанных фильтров и общий вид камеры представлены на рисунке 2.

Изображения кометы были получены в Обсерватории университета 15 октября 2024 года в интервале всемирного времени от 13ч 29м до 13ч 41м. Область неба, где располагалась комета, визуально выглядела безоблачной. При съёмке в оптическом диапазоне камерой CANON EOS 2000D использовалась чувствительность 6400 единиц, а экспозиции варьировались от 1 до 2 секунд. При получении инфракрасных изобра-

жений камерой CANON EOS 1000DI использовался располагающийся перед объективом фильтр RG 850. Камера была настроена на чувствительность 1600 единиц. Применялись экспозиции в 30 секунд.

Сравнение полученных изображений и режимов съёмки свидетельствует о том, что чувствительность инфракрасной камеры оказалась лишь в разы ниже чувствительности стандартной оптической камеры. Это позволяет утверждать, что с помощью такой инфракрасной камеры действительно можно решать широкий круг научных задач.

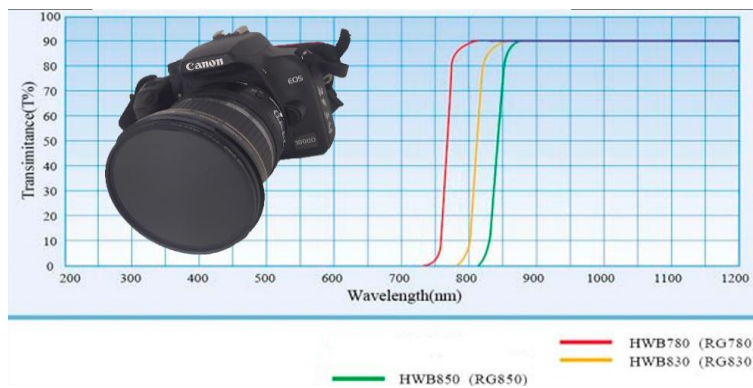


Рисунок 2 – Полосы пропускания применяемых инфракрасных фильтров

Результаты и обсуждение. Анализ изображений.

Одной из проблем в получении изображений комет является достижение максимальной детализации картины, что в свою очередь требует повышения уровня контраста снимков. Впрочем, эта проблема является общей при изучении практически всех диффузных объектов на небе [13, 14]. Нам эта проблема, в частности, знакома по практике регистрации изображений полей серебристых облаков. При этом переход к практике получения снимков таких объектов в ближней инфракрасной области преследовал цель повышения контраста изображений облачности на фоне заревого сегмента. И, как показал эксперимент, эта цель была успешно достигнута [11]. На рисунке 3 в качестве примера приведено сравнение изображений поля тропосферных перистых облаков в условиях сумерек в оптическом диапазоне (слева) и в ближней ИК области (справа). Более высокая детализация инфракрасных изображений очевидна даже на беглый взгляд. Разумеется, при съёмке кометы задача повышения контраста изображения также актуальна.

Однако, заранее вовсе не очевидно, что и при фотографировании комет может быть достигнут

результат аналогичный тому, который был получен при съёмке облачности. Примеры снимков кометы C/2023 A3 Tsuchinshan-ATLAS в видимой области спектра (A) и в длинах волн свыше 850 нм приведенные на рисунке 4 убеждают в том, что дело с контрастом снимков обстоит не просто, уже при общем их обзоре.

На первый взгляд детализация изображений в обоих случаях практически одинакова. Но снимок в инфракрасных лучах выявил наличие на небе помех в виде легких перистых облаков. Они совершенно не были видны глазом во время съёмки, неразличимы они и на снимке в видимом свете. При этом сложно ответить на вопрос о том, когда появились перистые облака и не ухудшили ли они инфракрасные изображения, которые были получены несколько позднее снимков в видимом свете.

Как известно интенсивность излучения кометных форм (комы и хвоста) определяется суммой нескольких компонент: солнечного излучения, рассеянного на аэрозолях и молекулах и эмиссии от различных радикалов и некоторых молекул. Как правило первая компонента преобладает, но по мере приближения кометы к

Солнцу интенсивность эмиссионной составляющей их спектра быстро возрастает [5, 9]. Однако, в ближней инфракрасной области спектра существенный вклад эмиссионной компоненты излучения при изучении большинства комет не отмечен. Таким образом, нет теоретических

предпосылок, позволяющих обосновать преимущество одного из двух указанных методов получения снимков комет. Решение следует искать в практике эксперимента, в частности, через сравнение коэффициентов контрастности снимков.



Рисунок 3 – Изображение тропосферной облачности (перистых облаков) в видимой области (слева) и в ближней ИК области длин волн (справа)



Рисунок 4 – Снимки кометы: слева в видимом свете, справа в ближней ИК области спектра

Анализ изображений проводился при помощи программы ImageJ – кроссплатформенной, общедоступной программы для обработки и анализа изображений, разработанной на языке программирования Java. Изначально созданная для микроскопии, программа со временем превратилась в мощный инструмент, используемый в разных областях науки [15].

Программа может читать и обрабатывать широкий спектр форматов изображений: TIFF, JPEG, GIF, PNG, DICOM и другие, она имеет несколько инструментов для анализа и улучшения контрастности изображений. Гистограмма: визуализирует распределение интенсивности пикселей изображения, что позволяет оценить его общий контраст и динамический диапазон.

Регулировка яркости и контрастности: позволяет интерактивно изменять яркость и контрастность изображения, наблюдая за изменениями в реальном времени. Выравнивание гистограммы: изменяя распределение яркости

пикселей картины к равномерному, улучшает видимость деталей в областях с малым контрастом. Фильтры: фильтр повышения резкости или фильтр нерезкой маски, используются для усиления краев и деталей, улучшая локальный контраст.

На рисунке 5 на фоне снимка кометы в ИК-диапазоне представлен скриншот работы программы.

Здесь же внизу справа приведена гистограмма распределения яркости в выделенном участке снимка размером 150x150 пикселей. Вверху справа показана таблица значений минимальных и максимальных показателей яркости для всех анализируемых снимков. В таблице 1 приведены характеристики условий съёмки и расчётные значения среднеквадратических отклонений яркости, которые характеризуют контрастность изображений. Чем больше величина отклонения, тем выше контраст снимка. Две верхние строки соответствуют инфракрасным изображениям.

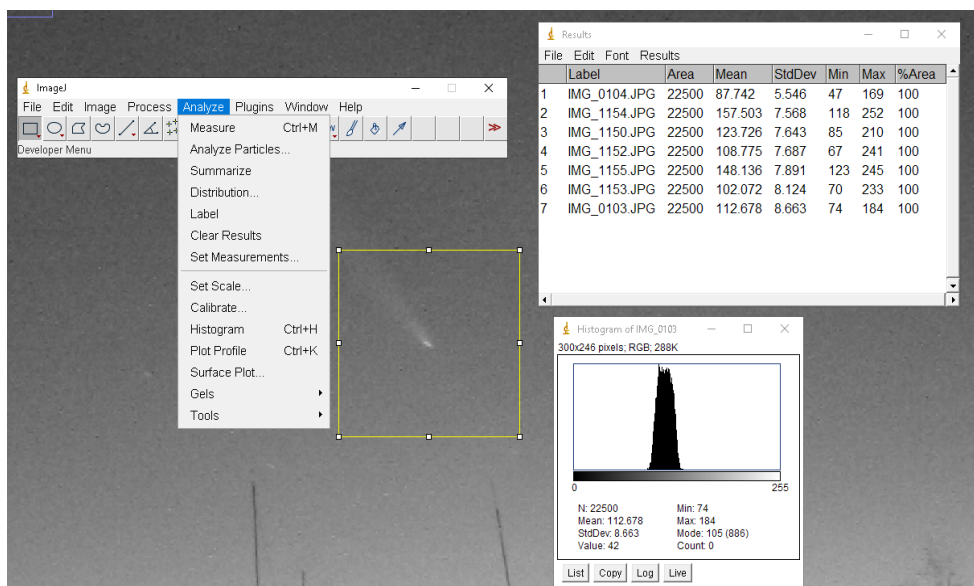


Рисунок 5 – К оценке контрастности изображений. Скриншот программы ImageJ и формы представления результатов обработки снимков

Таблица 1 – Общая информация об изображениях и результатах их обработки

Изображение	Экспозиция (сек)	ISO	Диафрагма	Среднее квадратичное отклонение
IMG_0103 I	30	1600	f/4	8.663
IMG_0104 I	30	1600	f/4	5.546
IMG_1150	1 с	6400	f/5.6	7.643
IMG_1152	1 с	6400	f/5.6	7.687
IMG_1153	1 с	6400	f/5.6	8.124
IMG_1154	2 с	6400	f/5.6	7.568
IMG_1155	2 с	6400	f/5.6	7.891

В целом для оценки контрастности всех изображений использовались два метода.

1. Расчёт среднеквадратичных отклонений яркости (СКО, Standard Deviation):

Как известно, чем больше разброс (вариация) значений яркости пикселей на изображении, тем выше контраст [16, 17]. СКО — это математическая мера разброса значений яркости, которая рассчитывается по стандартной процедуре математической статистики. Такой метод даёт общее представление о контрасте картины. Но он не учитывает пространственное распределение яркости, контрастные детали могут быть малыми на фоне общей низкой контрастности изображения. В частности, данные таблицы 1 указывают на малое различие контрастов изображений кометы, полученных в видимом диапазоне и в ближней ИК области спектра.

2. Анализ гистограмм изображений:

Гистограмма показывает распределение частоты встречаемости пикселей с определенной яркостью. Чем шире гистограмма и чем больше пиков на ней, тем выше контраст. В данном случае строится график, где по оси X откладываются значения яркости (от 0 до 255 для 8-битного изображения), а по оси Y — количество пикселей с данной яркостью. Этот метод позволяет оценить не только общий контраст изображения, но и распределение тонов на нем. Самое важное значение имеют значения минимальной и максимальной яркости пикселей. Зная их можно рассчитать коэффициенты контрастности изображения пользуясь несколькими подходами:

А) Под локальным контрастом понимается соотношение яркости светлых и тёмных смежных частей исследуемого изображения [16, 17]. Применительно к пикселям яркостных переходов, его оценивают по формуле:

$$K_L = \frac{D_{max} - D_{min}}{G - 1}, \quad (1)$$

здесь D_{max} и D_{min} максимальный и минимальный показатели яркости близких по положению пикселей, а G – максимально возможное число градаций яркости для используемой разрядности. Например, при 8 битных пикселях оно составит 256.

Б) Общий контраст по всему полю изображения может быть оценен следующим образом:

$$K_s = \frac{2\sigma_D}{G - 1}, \quad (2)$$

где σ_D – стандартное отклонение яркости по всем пикселям картины [16, 17].

В) Контраст Михельсона характеризует те изображения, на которых количество тёмных и светлых областей приблизительно одинаково

$$K_M = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}, \quad (3)$$

где K_M — контраст Михельсона, D_{max} — максимальная яркость точки области вычисления контраста, D_{min} — минимальная яркость точки области вычисления контраста [16, 17].

Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – К расчету коэффициентов контрастности изображений

Изображение	Min	Max	K_L	K_s	K_M
IMG_0103.JPG I	74	184	0.43	0.0680	0.43
IMG_0104.JPG I	47	169	0.48	0.0435	0.54
IMG_1150.JPG	85	210	0.49	0.0600	0.43
IMG_1152.JPG	67	241	0.68	0.0603	0.57
IMG_1153.JPG	70	235	0.65	0.0637	0.54
IMG_1154.JPG	118	252	0.52	0.0594	0.36
IMG_1155.JPG	73	233	0.63	0.0619	0.52

Заключение

Как следует из данных анализа гистограмм изображений, нельзя с определённой выделит преимуществ контрастности снимков кометы в ИК-диапазоне по сравнению с видимым диапазоном для рассматриваемых условий наблюдения. Этот факт требует осмысления. Дело в том, что при съёмках объектов на дневном или сумеречном небе контраст ИК изображений облачных полей всегда был заметно выше, чем у оптических изображений. Это объясняется подавлением влияния фона неба при работе в ближней ИК области спектра. Такой эффект проявлялся и при общем визуальном обзоре снимков, и при расчётах коэффициентов контрастности [11].

Следует учесть, что в момент получения инфракрасных изображений высота Солнца относительно горизонтом составляла - 11°54', что соответствовало окончанию навигационных и началу астрономических сумерек. При этом, комета располагалась довольно далеко от

сумеречного сегмента неба. В этой связи мы полагаем, что снижение контраста изображений протяженного объекта на практически ночном небе при работе в ближнем ИК диапазоне объясняется резким снижением влияния фона рассеянного солнечного излучения на этой стадии перехода от светлого к тёмному времени суток [18-21].

В этой связи приобретает актуальность задача экспериментального исследования влияния условий атмосферного рассеяния солнечного освещения на величину контраста изображений протяжённых объектов в ближней инфракрасной области спектра. Постановке и решению этой задачи планируется посвятить следующую работу.

Пока же можно констатировать, что применение съёмки в ближней инфракрасной области безусловно перспективны в условиях гражданских или навигационных сумерек, или дневного неба.

Вклад авторов

А.А. Солодовник: Разработка концепции и методологии исследования, научное руководство, получение экспериментальных данных, интерпретация результатов обработки данных, написание – проверка и

редактирование. **Б.М. Усеинов:** методология, валидация, курирование данных, исследование, анализ результатов эксперимента, проверка и редактирование, администрирование проекта. **Т.Б. Касенов:** методология, курирование данных, обработка результатов эксперимента, проверка и редактирование. **П.Л. Журавлёв:** материальное обеспечение эксперимента, получение экспериментальных данных. **Н.П. Солодовник:** получение экспериментальных данных, администрирование проекта, валидация, формальный анализ.

Литература References

1. А.В. Тутуков, М.Д. Сизова, С.В. Верещагин, Эволюция комет, *Астрономический журнал* **98**(9), 780–792 (2021). [A.V. Tutukov, M.D. Sizova, S.V. Vereshchagin, *Evolution of comets, Astronomical Journal* **98**(9), 780–792 (2021) (in Russ)] <https://doi.org/10.31857/S0004629921090073>
2. Л.В. Ксанфомалити, Некоторые свойства кометы Хейла–Боппа (по наблюдениям 1995–98 гг.), *Астрономический вестник* **54**(2), 135–150 (2020). [L.V. Ksanfomaliti, *Some properties of comet Hale–Bopp (based on observations in 1995–98), Astronomical Bulletin* **54**(2), 135–150 (2020) (in Russ)] <https://doi.org/10.31857/S0320930X2002005X>
3. О.В. Калиничева, В.П. Томанов, Динамическая связь комет с планетами, (Вологда: ВГПУ, 2008), 190 с. [O.V. Kalinicheva, V.P. Tomanov, *Dynamical relation of comets with planets, Vologda State Pedagogical University, Vologda, 190 p. (2008) (in Russ)*].
4. Н.Х. Давруков, Х.И. Ибадинов, Н. А. Коновалова, Кометы семейства Юпитера и их метеорные потоки, *Вестник Таджикского национального университета. Серия Естественных наук* **1/1**, 130–136 (2020). [N.Kh. Davrukov, Kh.I. Ibadinov, N.A. Konvalova, *Comets of the Jupiter family and their meteor streams, Bulletin of the Tajik National University. Series of Natural Sciences* **1/1**, 130–136 (2020) (in Russ)].
5. С. Ибадов, Физические процессы в кометах и родственных объектах, (Москва: Космосинформ, 1996), 181 с. [S. Ibadov, *Physical processes in comets and related objects, Kosmosinform, Moscow, 181 p. (1996) (in Russ)*].
6. Планетарная безопасность человечества, под ред. В. П. Мельникова, (Москва, 2017), 370 с. [Planetary safety of humanity, ed. by V.P. Melnikov, Moscow, 370 p. (2014) (in Russ)].
7. Л. М. Шульман, Ядра комет, (Москва, Наука, 1987), 232 с. [L.M. Shulman, *Comet nuclei, Nauka, Moscow, 232 p. (1987) (in Russ)*].
8. Кометы и происхождение жизни, под ред. С. Поннамперума, (Москва, Мир, 1984), 230 с. [Comets and the origin of life, ed. by S. Ponnampertuma, Mir, Moscow, 230 p. (1984) (in Russ)].
9. К.И. Чурюмов, Кометы и их наблюдение, (Москва, Наука, 1980), 160 с. [K.I. Churyumov, *Comets and their observation, Nauka, Moscow, 160 p. (1980) (in Russ)*].
10. Canon Inc., Инструкция по эксплуатации Canon EOS 2000D, (Токио, Япония, 2017), 326 с. [Canon Inc., *Canon EOS 2000D Instruction Manual, Tokyo, Japan, 326 p. (2017)*].
11. А. Solodovnik, R. Zyryanov, P. Leontyev, B. Useinov, E. Gololobova, & P. Zhuravlev, Experience of noctilucent clouds registering in the near infrared spectrum region, *Physical Sciences and Technology* **11**(1-2), 85-93. (2024). <https://doi.org/10.26577/phst2024v11i1a10>
12. Sensotek, Фильтры: световой фильтр – 780–850 нм – ИК длинноволновой. Модификация камер. URL: <https://photodrom.com/> (дата обращения: 04.03.2023). [Sensotek, *Filters: light filter – 780–850 nm – long-wave IR. Camera modification, URL: https://photodrom.com/ (accessed 04.03.2023) (in Russ)*].
13. D. Evtifeev, Experiments in the field of photography: shooting. Infrared photography. URL: <https://evtifeev.com/49921-infrakrasnaya-fotosemka.html> (accessed 04.03.2023) (in Russ).
14. Э.В. Емельянов, Астрофизика ИК диапазона, (Москва, INFO, 2012), 36 с. (2012). [E.V. Emelyanov *Astrophysics of the IR range, (Moscow, INFO, 2012), 36 p. (in Russ)*] <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17618.30406>
15. ImageJ, Java application for scientific image processing. URL: <https://imagej.net/ij/download.html>
16. Числовые характеристики изображений URL: <https://mypresentation.ru/presentation/chislovye-xarakteristiki-izobrazhenij> [Numerical characteristics of the image. The tonal range. URL: <https://mypresentation.ru/presentation/chislovye-xarakteristiki-izobrazhenij> (accessed 04.03.2023) (in Russ)]
17. RuGraphics.ru, Обработка изображений и видеофайлов, URL: <https://rgraphics.ru/photoshop/kak-chitat-ponimat-raspoznavat-gistogrammu> [RuGraphics.ru, *Processing of images and video files. How to read, understand and recognize the histogram of an image. URL: https://rgraphics.ru/photoshop/kak-chitat-ponimat-raspoznavat-gistogrammu (accessed 04.03.2023) (in Russ)*].
18. FernFlower Group, Съемка в УФ и ИК диапазонах. URL: <https://www.fern-flower.org/ru/articles/semka-v-uf-i-ik-diapazonah> (дата обращения: 04.03.2023). [FernFlower Group, *Shooting in UV and IR ranges, URL: https://www.fern-flower.org/ru/articles/semka-v-uf-i-ik-diapazonah (accessed 04.03.2023)*].
19. G.L. Stephens, Optical properties of eight water cloud types, *Technical Paper of CSIRO, Atmospheric Physics Division* **36**, 1–35 (1979).
20. У. Волф, Г. Цисис, Справочник по инфракрасной технике в 4 томах. Том 2: Проектирование оптических систем (Москва, Мир, 1998), 347 с. [W. Wolf, G. Tsis, *Handbook of Infrared Technology in 4 Volumes. Volume 2: Design of Optical Systems (Moscow, Mir, 1998), 347 p. (in Russ)*].

21. K.S. Shifrin & A.Y. Perelman, Determination of particle spectrum of atmosphere aerosol by light scattering, *Tellus* 18:2-3, 566-572 (1966). <https://doi.org/10.3402/tellusa.v18i2-3.9342>

История статьи: поступила: 23 июня 2025; принята: 26 февраля 2026.

Мақала тарихы: түсті: 23 мауысым 2025; қабылданды: 26 ақпан 2026.

Article history: received: 23 June 2025; accepted: 26 February 2026.

Информация об авторах:

Солодовник Андрей Андреевич – профессор, кандидат физико-математических наук, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан, e-mail: asolodovnik@ku.edu.kz

Усеинов Бейбут Мейрамович – профессор, кандидат физико-математических наук, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан, e-mail: buseinov@gmail.com

Касенов Тимур Баймолдаевич – бакалавр физики-информатики, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан, e-mail: timur.kasenov@mail.ru

Журавлёв Павел – магистр физики и астрономии, Назарбаев Интеллектуальная школа, Петропавловск, Казахстан, e-mail: zhuravlevpl@yandex.ru

Солодовник Надежда Павловна – лаборант, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан, e-mail: npsolodovnik@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет:

Андрей Андреевич Солодовник – профессор, физика-математика ғылымдарының кандидаты, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан, e-mail: asolodovnik@ku.edu.kz

Бейбіт Мейрамұлы Усеинов – профессор, физика-математика ғылымдарының кандидаты, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан, e-mail: buseinov@gmail.com

Тимур Баймолдаұлы Касенов – физика және информатика мамандығы бойынша ғылым бакалавры, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан, e-mail: timur.kasenov@mail.ru

Павел Журавлев – физика және астрономия магистрі, Назарбаев зияткерлік мектебі, Петропавл, Қазақстан, e-mail: zhuravlevpl@yandex.ru

Надежда Павловна Солодовник – зертханашы, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан, e-mail: npsolodovnik@mail.ru

Information about authors:

Andrey Solodovnik – Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Manash Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavl, Kazakhstan, e-mail: asolodovnik@ku.edu.kz

Beibut Useinov – Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Manash Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavl, Kazakhstan, e-mail: buseinov@gmail.com

Timur Kassenov – Bachelor of Science in Physics and Informatics, Manash Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavl, Kazakhstan, e-mail: timur.kasenov@mail.ru

Pavel Zhuravlev – Master of Physics and Astronomy, Nazarbayev Intellectual School, Petropavl, Kazakhstan, e-mail: zhuravlevpl@yandex.ru

Nadezhda Solodovnik – Laboratory Assistant, Nazarbayev Intellectual School, Petropavl, Kazakhstan, e-mail: npsolodovnik@mail.ru