

Научная статья

УДК 004.932

DOI 10.25205/1818-7900-2025-23-3-32-43

Обзор современных методов восстановления астрономических изображений в условиях атмосферной турбулентности

Константин Юрьевич Москаленко¹

Ольга Дмитриевна Погибельная¹

Денис Сергеевич Мигинский^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

² Институт систем информатики им. А. П. Ершова СО РАН
Новосибирск, Россия

k.moskalenko@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-7898-7860>

o.pogibelnaya@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9148-0526>
d.miginskii@g.nsu.ru

Аннотация

Статья посвящена обзору и сравнительному анализу современных методов восстановления оптических искажений астрофотографий, полученных в условиях атмосферной турбулентности. Исследованы физические и теоретические основы формирования искажений, как то: атмосферная турбулентность, оптические аберрации и шумы, сопровождающие процесс съемки. Целью работы является систематизация существующих подходов и определение наиболее эффективных методов для применения в любительской и профессиональной астрофотографии. Рассмотрены алгоритмы восстановления разрешения изображений: классическая деконволюция (алгоритм Ричардсона – Люси и фильтрация Винера), слепая деконволюция, многокадровая обработка и нейросетевые методы. Результаты сравнительного анализа показывают, что многокадровые алгоритмы и нейросетевые подходы обладают наибольшей эффективностью при ограниченных вычислительных ресурсах и неполной информации о функции рассеяния точки.

Ключевые слова

астрофотография, атмосферная турбулентность, оптические аберрации, деконволюция изображений, слепая деконволюция, многокадровая обработка, нейронные сети, функция рассеяния точки

Для цитирования

Москаленко К. Ю., Погибельная О. Д., Мигинский Д. С. Обзор современных методов восстановления астрономических изображений в условиях атмосферной турбулентности // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2025. Т. 23, № 3. С. 32–43. DOI 10.25205/1818-7900-2025-23-3-32-43

© Москаленко К. Ю., Погибельная О. Д., Мигинский Д. С., 2025

An Overview of Modern Methods for Restoring Astronomical Images Under Atmospheric Turbulence

Konstantin Yu. Moskalenko¹, Olga D. Pogibelnaya¹
Denis S. Miginsky^{1,2}

¹ Novosibirsk State University,
Novosibirsk, Russian Federation

² A. P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

k.moskalenko@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-7898-7860>
o.pogibelnaya@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9148-0526>
d.miginskii@g.nsu.ru

Abstract

This article presents a review and comparative analysis of modern methods for correcting optical distortions in astrophotography acquired under conditions of atmospheric turbulence. The study investigates the physical and theoretical foundations of distortion formation, including atmospheric turbulence, optical aberrations, and noise inherent to the image acquisition process. The objective of this work is to systematize existing approaches and identify the most effective methods applicable to both amateur and professional astrophotography. The analysis covers image resolution restoration algorithms such as classical deconvolution (including the Richardson–Lucy algorithm and Wiener filtering), blind deconvolution, multi-frame processing, and neural network-based techniques. The results of the comparative analysis demonstrate that multi-frame algorithms and neural network approaches exhibit the highest efficiency under constrained computational resources and incomplete knowledge of the point spread function.

Keywords

astrophotography, atmospheric turbulence, optical aberrations, image deconvolution, blind deconvolution, multi-frame processing, neural networks, point spread function

For citation

Moskalenko K. Yu., Pogibelnaya O. D., Miginsky D. S. An Overview of Modern Methods for Restoring Astronomical Images Under Atmospheric Turbulence. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2025, vol. 23, no. 2, pp. 32–43 (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2025-23-3-32-43

Введение

Астрофотография – это жанр фотографии, направленный на съемку различных астрономических объектов и явлений. Получение высококачественных изображений поверхностей планет и Луны является важнейшей целью как для профессиональных астрономов, так и для астрофотографов-любителей. Существуют два способа получения снимков: из космоса с использованием дорогостоящего оборудования и с поверхности Земли. Однако получение четких изображений с наземных телескопов является сложной задачей из-за атмосферной турбулентности и, как следствие, возникающих оптических аберраций. При этом изображения приобретают искажения, создаваемые оптическими системами, что вызывает размытость, шум, потерю качества, искажение формы объектов или цвета. В результате снижается и научная ценность снимков, что напрямую сказывается на исследовании космоса в целом.

Проблема возникновения оптических аберраций в случае профессиональных обсерваторий решается с помощью адаптивной оптики – системы, позволяющей в реальном времени измерять и корректировать искажения волнового фронта с помощью деформируемых зеркал [1], однако такие решения дороги и недоступны для большинства астрофотографов-любителей. Тем не менее зачастую именно астрофотографы-любители первыми обнаруживают новые объекты, такие как кометы, астероиды или вспышки сверхновых звезд, а также проводят долгосрочные наблюдения за переменными звездами, планетами и другими объектами. Так, например, в 2009 году астроном-любитель Энтони Вэсли из Австралии, установив телескоп во дворе

своего дома, обнаружил в атмосфере Юпитера темное пятно с диаметром, приблизительно равным диаметру Земли. Позже ученые из NASA установили, что оно является следствием столкновения с кометой¹.

С учетом постоянного повышения доступности и качества любительских астрономических инструментов растет также и потребность эффективных с точки зрения вычислительной сложности методов восстановления поврежденных изображений. При этом большинство существующих программных инструментов предоставляют узкий функционал для исправления искажений и имеют ограничения в устранении сложных аберраций и восстановлении функции рассеяния точки (ФРТ) – функции, описывающей, как точечный источник света отображается в фокальной плоскости. Таким образом, возникает необходимость внедрения более совершенных алгоритмов, включая методы многокадровой обработки, которые извлекают информацию из серии кадров, тем самым значительно улучшая качество и детализацию астрономических изображений (см. рисунок).



Сравнение изображений Юпитера до и после алгоритмической обработки
Comparison of Jupiter images before and after algorithmic processing

В работе рассмотрена задача восстановления астрономических изображений, в частности, повышения разрешающей способности при наземных наблюдениях, а также исследованы следующие вопросы:

1. Физические предпосылки появления атмосферных искажений, а именно: атмосферная турбулентность и параметры seeing; математический аппарат, в частности, постановка задачи деконволюции, а также реализованные алгоритмы: классические и нейросетевые;
2. Ключевые отличия методов исправления атмосферных искажений по вычислительной сложности, точности восстановления мелких деталей, чувствительности к шуму и т. п.;
3. Недостатки существующих методов исправления и пути их преодоления (например, адаптация профессиональных алгоритмов для любителей).

¹ Кометное или астероидное столкновение с Юпитером, 2009 [Электронный ресурс]. NASA Science. URL: <https://science.nasa.gov/resource/comet-or-asteroid-impact-on-jupiter-2009/> (дата обращения: 06.04.2025).

1. Физические и теоретические предпосылки

1.1. Атмосферная турбулентность и ее модель

Атмосферная турбулентность оказывает негативное влияние на качество астрономических изображений [2]. Ее возникновение обусловлено неравномерным перемешиванием слоев воздуха с различной температурой и плотностью, что приводит к случайным флуктуациям показателя преломления световых волн. В результате формируются геометрические искажения, снижается пространственное разрешение и возникает размытие изображения.

Одной из основных моделей, описывающих атмосферную турбулентность, является модель Колмогорова. Она описывает процесс распределения энергии в турбулентных потоках между вихрями разного размера. Несмотря на то что модель является фундаментальной для понимания турбулентности, она имеет свои ограничения применительно к атмосферным условиям, особенно в контексте астрономических наблюдений. Влияние турбулентного вихря на изображение зависит от его углового (видимого) размера, который уменьшается с увеличением расстояния до телескопа. Например, турбулентный вихрь размером 1 м на высоте 10 км на телескопе представляет собой угловую неоднородность 0,02 угловых градусов, что считается при данном масштабе «оптическим дефектом». Однако локальные турбулентности в виде маленьких вихрей могут иметь большой видимый размер и оказывать значительное влияние на получаемое изображение.

Для оценки условий наблюдений традиционно используются параметр Фрида, время когерентности атмосферы и значение seeing. Параметр Фрида r_0 характеризует размер области, внутри которой волновой фронт света сохраняет относительно низкий уровень искажений. Чем больше значение r_0 , тем слабее влияние турбулентности и тем выше разрешающая способность телескопа. Время когерентности атмосферы τ_0 определяется скоростью изменения турбулентных флуктуаций в атмосфере [3]. Оно показывает, за какое время фазовые возмущения изменяются на значительную величину, ограничивая эффективность адаптивных и постобрабатывающих методов коррекции: искажения волнового фронта можно корректировать лишь в течение времени τ_0 , когда они остаются примерно постоянными. В видимом диапазоне типичные значения $\tau_0 \approx 2 - 10$ мс, а в инфракрасном диапазоне может достигать десятков миллисекунд. Seeing – это эмпирический параметр, определяющий угловой размер изображения точечного источника в условиях атмосферных искажений и зависящий от наличия турбулентных потоков в атмосфере и их масштабов. Указанное значение связано с параметром Фрида по соотношению

$$\text{Seeing} \approx \frac{\lambda}{r_0},$$

где λ – длина волны наблюдений.

Эти параметры критически важны для анализа качества астрономических изображений и условий съемки, а также для оптимизации методов повышения разрешения, таких как адаптивная оптика и метод удачных экспозиций.

1.2. Оптические аберрации телескопов

В оптических системах аберрации представляют собой отклонения от истинного (неискаженного) изображения, вызванные несовершенством оптических элементов или среды, через которую проходит свет. Их можно описать с помощью полиномов Цернике, которые представляют собой математическую основу для анализа искажений волнового фронта [1]:

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n a_n^m Z_n^m(\rho, \theta),$$

где ρ – нормализованный радиус зрачка; θ – угол вокруг оптической оси; a_n^m – коэффициент полинома Цернике Z_n^m с азимутальной частотой m и радиальным порядком n .

Азимутальная частота m описывает количество повторений угловой функции (синуса или косинуса) в пределах полного круга (от 0 до 2π). Она определяет, сколько раз функция меняет знак при изменении угла θ . Например, при $m = 1$ функция имеет одну полную синусоидальную или косинусоидальную волну на круге, а при $m = 2$ – две волны. Радиальный порядок n определяет степень радиального полинома $R_n^m(\rho)$, который описывает зависимость полинома Цернике от радиальной координаты ρ [4]. Радиальный порядок n всегда неотрицательный и связан с азимутальной частотой m условием $n - m \geq 0$ и четностью $n - m$. Вместе n и m задают уникальную форму полинома Цернике, каждый многочлен описывает форму волнового фронта для конкретной аберрации. Основные типы аберраций, как то: сферическая аберрация, кома, астигматизм оказывают значительное влияние на форму и качество ФРТ.

Сферическая аберрация возникает, когда световые лучи, проходящие через края сферической линзы или отраженные от краев сферического зеркала, фокусируются не в той же точке, что и центральные лучи, в результате чего изображение размывается. Влияние сферической аберрации на ФРТ проявляется в виде симметричного размытия, при котором центральный пик интенсивности становится менее выраженным, а окружающая его область приобретает повышенную яркость. Сферическая аберрация соответствует полиному Цернике с радиальным порядком $n = 4$ и азимутальной частотой $m = 0$. При увеличении апертуры или оптической системы сферическая аберрация становится более заметной, так как большее количество лучей, проходящих через края линзы, вносят вклад в искажение изображения. В астрономии, например, сферическая аберрация может значительно ухудшить качество изображения, особенно при наблюдении объектов с низкой яркостью.

Кома – это аберрация, которая возникает, когда световые лучи, проходящие через разные части линзы, фокусируются в разных точках, создавая при этом асимметричное размытие изображения. В результате ФРТ принимает форму «кометы» с ярким ядром и хвостом, направленным в сторону от оптической оси. Кома соответствует полиномам Цернике с радиальным порядком $n = 3$ и азимутальной частотой $m = \pm 1$. Кома особенно заметна при использовании больших апертур, так как она усиливается с увеличением угла падения света на оптическую систему. В астрономии кома может привести к значительному ухудшению качества изображения звезд, особенно вблизи краев поля зрения.

Другой случай проявления оптических аберраций, при котором световые лучи проходят через разные меридианы линзы и фокусируются в разных точках, называется астигматизмом и приводит к растяжению изображения. В результате световой пучок принимает форму эллипса или линии, в зависимости от плоскости фокусировки. Астигматизм соответствует полиномам Цернике с радиальным порядком $n = 2$ и азимутальной частотой $m = \pm 2$. Влияние астигматизма на ФРТ проявляется в виде двух различных фокальных точек для вертикальной и горизонтальной плоскостей. При увеличении апертуры или увеличении оптической системы астигматизм становится более выраженным, так как разница в фокусировке лучей в разных плоскостях увеличивается.

Анализ аберраций через полиномы Цернике предоставляет универсальный инструмент для описания искажений волнового фронта в телескопах. Как показано, сферическая аберрация, кома и астигматизм по-разному влияют на ФРТ, что требует индивидуальных подходов к их коррекции.

1.3. Постановка задачи восстановления

Рассмотрим модель формирования изображения в условиях атмосферной турбулентности и оптических аберраций. Наблюдаемое изображение I можно представить в виде свертки истинного (неискаженного) изображения объекта O и ФРТ P , с добавлением шума N :

$$I = O \otimes P + N,$$

где символ \otimes обозначает операцию свертки. Данная модель широко применяется при постановке задачи восстановления изображений в астрофотографии и описывает, как каждая точка объекта проецируется на плоскость изображения с учетом размытия, вызванного физическими искажениями [1; 2].

Центральную роль в приведенной модели играет ФРТ P . С физической точки зрения, ФРТ отражает результат влияния атмосферной турбулентности, оптических аберраций телескопа, дифракции и прочих факторов на исходное изображение точечного источника света [1]. Точное знание ФРТ позволяет эффективно решать задачу деконволюции и восстанавливать качественные изображения, близкие к исходным. В профессиональной астрофотографии ФРТ может быть получена по изображению звезды-эталоны или при помощи адаптивной оптики с лазерной системой наведения. Однако на практике форма ФРТ часто неизвестна, поскольку она изменяется со временем и может существенно варьироваться по полю зрения вследствие комы, астигматизма и других полевых аберраций.

Шумовая компонента N в рассматриваемой модели обусловлена случайными процессами, возникающими при регистрации изображения. В зависимости от уровня освещенности и типа используемого датчика шума принято различать два основных вида шумов: гауссовский и пуассоновский. Гауссовский шум характерен для условий достаточной освещенности и обусловлен, прежде всего, считывающей электроникой датчика и тепловыми шумами сенсора. В условиях малых экспозиций, типичных для астрофотографии слабых объектов, шум принимает пуассоновский характер и связан с самой природой регистрации фотонов.

Таким образом, выбранная модель адекватно описывает физику процесса формирования изображения и лежит в основе большинства практических алгоритмов компенсации искажений и восстановления изображений в астрофотографии.

2. Обзор методов восстановления разрешения

2.1. Классические методы деконволюции

В целях повышения разрешающей способности изображений зачастую применяются «классические» или «неслепые» методы деконволюции. Эти методы предполагают наличие заранее заданной ФРТ или, по крайней мере, ее хорошего приближения. Основная идея таких алгоритмов заключается в инверсии процесса свертки, моделирующего искажение изображения в оптической системе. Классические методы особенно актуальны в условиях ограниченных вычислительных ресурсов или при наличии информации о характере размытия.

Одним из наиболее популярных методов классической деконволюции является алгоритм Ричардсона – Люси [5; 6], который использует метод максимального правдоподобия для итеративного улучшения оценки истинного изображения. На каждой итерации пересчитывается оценка истинного изображения $f_k(x)$ по следующей формуле:

$$f_{k+1}(x) = f_k(x) \cdot \left(\frac{g(x)}{(f_k * h)x} * h^*(x) \right),$$

где $g(x)$ – размытое изображение; $h(x)$ – ФРТ, а $h^*(x)$ – ее отраженная версия.

Ключевыми достоинствами данного метода являются относительная простота реализации и высокая устойчивость к шуму при небольшом числе итераций. Однако из-за своей итеративной природы метод имеет медленную сходимость, а неточная оценка ФРТ зачастую приводит к возникновению артефактов.

Еще одним характерным представителем данного класса алгоритмов является фильтрация Винера, первоначально предложенная Норбертом Винером в рамках теории оптимальной фильтрации сигналов [7]. Данный метод минимизирует среднеквадратичную ошибку между исходным и восстановленным изображением и предлагает аналитическое решение в частотной области без необходимости итераций, что увеличивает скорость расчетов. Основными ограничениями метода являются высокая чувствительность к точности задания ФРТ, а также предположение о стационарности характеристик шума в изображении, что может приводить к его усилению.

Таким образом, несмотря на простоту реализации и широкое применение, классические методы деконволюции имеют строгие ограничения на точность задания ФРТ, поэтому применимы лишь в условиях контролируемого эксперимента или при точных измерениях. В связи с этим важную роль играют методы слепой деконволюции или подходы на основе глубокого обучения, позволяющие оценить заранее неизвестную ФРТ.

2.2. Слепая деконволюция

Естественным развитием классических методов деконволюции, таких как алгоритм Ричардсона – Люси и фильтрация Винера, стала слепая деконволюция (*blind deconvolution*). В классических подходах требуется предварительно знать ФРТ, описывающую процесс искажения, что существенно ограничивает их применимость на практике. В отличие от них, методы слепой деконволюции не требуют заранее заданной ФРТ, осуществляя одновременное восстановление как истинного изображения x , так и ядра искажения k по наблюдаемому размытому изображению y [8].

Совместная оценка x и k представляет собой плохо обусловленную задачу: существует множество решений, способных удовлетворить данному уравнению, в частности, тривиальное решение («нет размытия»): ядро k является дельта-функцией, а изображение x совпадает с наблюдаемым изображением y . Исследования показали, что прямое применение подхода максимизации апостериорной вероятности (Maximum a Posteriori, MAP), основанного на разреженных априорных моделях, нередко приводит именно к такому нежелательному решению [8]. В связи с этим были предложены альтернативные алгоритмические стратегии, в частности, оценка только ядра размытия k , при этом учитываются все возможные изображения x . Это позволяет существенно улучшить качество восстановления ядра, поскольку его размер, как правило, значительно меньше, чем размер изображения, и количество неизвестных параметров соответственно меньше. После того как ядро установлено, изображение эффективно восстанавливается классическими методами деконволюции.

На основе таких идей развиты различные практические алгоритмы. Среди наиболее эффективных подходов выделяется группа итеративных процедур попеременного восстановления изображения и ядра с применением байесовского подхода и регуляризации для стабилизации вычислений. Один из таких методов был предложен Фергюсом и соавторами [9]: в нем применяется многоуровневая байесовская схема оценки ядра размытия на основе априорного распределения градиентов изображения, что позволяет стабильно восстанавливать сложные ядра размытия, вызванные движением камеры. Другой заметный подход представлен Шаном и соавторами [10], которые разработали вероятностную модель, специально учитывающую пространственные особенности шума и локальную гладкость изображения, что существенно снижает «кольцевые» артефакты и улучшает качество восстановления при слепой деконволюции.

одиноким кадрам. Указанные алгоритмы демонстрируют высокую эффективность и устойчивость, позволяя восстанавливать изображения даже при значительных атмосферных или механических искажениях и неопределенности относительно характеристик ядра размытия.

2.3. Многокадровая обработка

Одним из наиболее эффективных подходов для компенсации атмосферных искажений и повышения качества астрофотографий является многокадровая обработка (*multi-frame processing*). В отличие от методов, оперирующих одиночными изображениями, многокадровые алгоритмы используют серию коротких экспозиций одного и того же объекта, что позволяет уменьшить влияние атмосферной турбулентности и увеличить отношение сигнал/шум. В каждом из кадров атмосферные флуктуации проявляются по-разному, и их совместный анализ открывает возможность восстановления деталей, которые теряются в случае длинных одиночных экспозиций [11].

Наиболее простой и распространенной реализацией многокадрового подхода является метод «удачных изображений» (*Lucky Imaging*). Основная идея заключается в отборе тех кадров, для которых влияние атмосферной турбулентности минимально [11; 12]. Отобранные кадры затем выравниваются и суммируются для увеличения отношения сигнал/шум, после чего результирующее изображение может быть дополнительно улучшено классической деконволюцией. Несмотря на свою простоту, подход *Lucky Imaging* широко применяется в астрофотографии для получения изображений с разрешением, близким к дифракционному пределу телескопа [12].

Более продвинутой техникой является многокадровая слепая деконволюция (MFBD, *multi-frame blind deconvolution*), в рамках которой одновременно восстанавливается истинное изображение и набор ФРТ, соответствующих каждому кадру серии [13; 14]. Математически данная задача формулируется следующим образом:

$$I_j = O \otimes P_j + N_j, \quad j = 1, \dots, M,$$

где I_j – наблюдаемое изображение на j -м кадре, O – истинное (неискаженное) изображение объекта, P_j – соответствующая кадру ФРТ, а N_j – шумовая компонента.

Такой подход позволяет использовать всю доступную информацию и восстановить качественные изображения даже при значительных искажениях и низком уровне сигнала.

Наибольшее распространение в рамках многокадровой слепой деконволюции получили алгоритмы, основанные на итеративной максимизации апостериорной вероятности (метод максимального правдоподобия с регуляризацией). К классическим примерам таких методов относится алгоритм Шульца [15], который был одним из первых предложен для восстановления астрономических изображений из последовательности кадров с неизвестными ФРТ. Недавние исследования предлагают дополнительно учитывать статистические характеристики некорректируемых высокопорядковых аберраций, что значительно улучшает стабильность решения и качество итоговых изображений [14]. Примером успешного применения современных подходов является метод тангенциальных итеративных проекций [13], в котором слепая многокадровая деконволюция выполняется путем последовательного чередования линейной деконволюции и проекций на физически обоснованные множества. Такой подход обеспечивает высокую устойчивость восстановления даже при низких значениях отношения сигнал/шум и минимуме априорных ограничений.

Таким образом, использование многокадровых подходов существенно расширяет возможности восстановления изображений в астрофотографии. В любительских условиях применение таких методов позволяет достичь качества изображений, близкого к профессиональным

наблюдениям, несмотря на ограниченные технические возможности и непостоянство условий наблюдений.

2.4. Нейросетевые подходы к повышению разрешения

В последние годы заметно возрос интерес к применению нейросетевых методов для восстановления астрономических изображений, искаженных атмосферной турбулентностью. Эти подходы рассматриваются как эффективная альтернатива классическим алгоритмам слепой деконволюции и многокадровой обработки. Центральную роль среди них занимают методы на основе глубоких сверточных нейронных сетей и моделей с механизмами внимания, которые способны автоматически извлекать характеристики искажений и восстанавливать изображение без явной параметризации ФРТ [16; 17]. Основная идея таких методов заключается в предварительном обучении нейронной сети на большом наборе изображений, подвергнутых модельным атмосферным искажениям, с последующим применением обученной модели к реальным данным.

Несмотря на перспективность подхода, его применение в астрономии сталкивается с рядом трудностей. Во-первых, обучение нейронных сетей требует значительных объемов данных, зачастую отсутствующих в реальных наблюдениях, что вынуждает исследователей использовать синтетические наборы данных, полученные при помощи физических моделей атмосферы [18]. Во-вторых, важной проблемой является способность обученной нейросети к обобщению: изменения условий наблюдений, высоты турбулентных слоев и скорости ветра могут приводить

Сравнение методов повышения разрешения астрономических изображений

Comparison of resolution enhancement methods for astronomical images

Метод	Точность восстановления	Вычислительная сложность	Требования к ФРТ	Чувствительность к шуму	Сложность реализации
Классическая деконволюция	Средняя; зависит от точности задания ФРТ	Низкая или средняя	Необходима заранее известная ФРТ	Умеренная; шум может усиливаться	Низкая; простые реализации
Слепая деконволюция	Высокая при правильной настройке регуляризации	Выше, чем у классических; требуется итеративная оценка ядра	Оценивается из изображения; заранее не нужна	Высокая; требуется регуляризация	Средняя; итеративные методы
Многокадровая обработка	Высокая за счет использования серии кадров	Средняя или высокая; зависит от числа кадров	Оценивается по серии кадров; заранее не нужна	Умеренная; шум усредняется	Средняя или высокая; требуется обработка множества кадров
Нейросетевые методы	Высокая; способность учитывать нелинейные искажения	Высокая при обучении, низкая при использовании	Не требуется, модель обучается по данным	Высокая; зависит от качества данных	Высокая; требует больших наборов данных и вычислительных ресурсов

к снижению точности восстановления при отклонении от условий, представленных в обучающей выборке. Тем не менее при грамотном формировании набора данных и использовании моделей с хорошей обобщающей способностью, нейросетевые подходы могут демонстрировать значительное превосходство по скорости обработки и способности восстанавливать сложные нелинейные искажения по сравнению с традиционными алгоритмами.

В сравнительной таблице обобщены рассмотренные методы восстановления разрешающей способности астрономических изображений на основе пяти критериев: точность восстановления, вычислительная сложность, требования к ФРТ, чувствительность к шуму и сложность реализации (см. таблицу).

Выводы

В настоящей статье был представлен аналитический обзор современных методов восстановления астрономических изображений, полученных в условиях атмосферной турбулентности при наземных наблюдениях. Рассмотрены физические предпосылки возникновения искажений – атмосферная турбулентность и оптические аберрации, существенно снижающие разрешающую способность наблюдательных инструментов. Проанализированы традиционные методы компенсации аберраций (адаптивная оптика, метод удачных экспозиций) и основные алгоритмы деконволюции изображений, среди которых выделены классические, слепые и многокадровые подходы, а также методы на основе глубокого обучения.

На основе проведенного обзора можно заключить, что выбор метода восстановления в значительной степени определяется доступностью информации о ФРТ, уровне шума и доступными вычислительными ресурсами. Классические методы деконволюции (Ричардсона – Люси, Винера) демонстрируют высокую стабильность при известных параметрах искажений, однако их точность напрямую зависит от качества исходного задания ФРТ. Методы слепой деконволюции и многокадровой обработки обладают большей гибкостью и способны обеспечить высокое разрешение изображений даже при неизвестной ФРТ и наличии значительного уровня шума. Перспективными являются подходы на основе нейросетей, которые позволяют эффективно корректировать сложные нелинейные искажения без явного знания характеристик размытия, хотя и требуют значительных объемов тренировочных данных и ресурсов для обучения моделей.

Сравнительный анализ показывает, что для любительской астрофотографии, где возможности по использованию дорогостоящих аппаратных средств, таких как адаптивная оптика, ограничены, наибольшую практическую ценность имеют программные методы постобработки: многокадровая слепая деконволюция и методы удачных экспозиций. Вместе с тем применение нейросетевых алгоритмов представляется весьма перспективным направлением для будущих исследований, особенно при решении задачи адаптации таких методов к условиям реальной атмосферной турбулентности и нестабильности параметров наблюдений.

В качестве рекомендаций для дальнейших исследований следует отметить необходимость развития и внедрения алгоритмов восстановления изображений, сочетающих преимущества рассмотренных методов, в практику любительской и профессиональной астрофотографии. Особое внимание стоит уделить созданию открытых наборов данных, реалистично моделирующих различные атмосферные условия, что позволит эффективно обучать и тестировать нейросетевые алгоритмы. Несмотря на значительный прогресс в рассматриваемой области, дальнейшие усилия по интеграции достижений вычислительной оптики и современных методов машинного обучения способны существенно повысить качество и научную значимость наземных астрономических наблюдений.

Список литературы / References

1. **Hampson K. M., Turcotte R., Miller D. T., Kurokawa K., Males J. R., Ji N., Booth M. J.** Adaptive optics for high-resolution imaging. *Nat Rev Methods Primers*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 1–26. DOI: 10.1038/s43586-021-00066-7
2. **Al-Hamadani A. H., Zainulabdeen F. Sh., Karam G. S., Nasir E. Y., Al-Saedi A.** Effects of atmospheric turbulence on the imaging performance of optical system. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1968, no. 1, p. 030071. DOI: 10.1063/1.5039258
3. **Akbari L., Darudi A., Shomali R.** Atmospheric coherence time measurement by modified Fast Defocus method. *Optik*, 2021, vol. 233, p. 166494. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.166494
4. **Niu K., Tian C.** Zernike polynomials and their applications. *J. Opt.*, 2022, vol. 24, no. 12, p. 123001. DOI: 10.1088/2040-8986/ac9e08
5. **Richardson W. H.** Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration. *J. Opt. Soc. Am., JOSA*, 1972, vol. 62, no. 1, pp. 55–59. DOI: 10.1364/JOSA.62.000055
6. **Lucy L. B.** An iterative technique for the rectification of observed distributions. *The Astronomical Journal*, 1974, vol. 79, p. 745. DOI: 10.1086/111605
7. **Wiener N.** *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series: With Engineering Applications*. The MIT Press, 1949. DOI: 10.7551/mitpress/2946.001.0001
8. **Levin A., Weiss Y., Durand F., Freeman W. T.** Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami, FL: IEEE, 2009, pp. 1964–1971. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206815
9. **Fergus R., Singh B., Hertzmann A., Roweis S. T., Freeman W. T.** Removing camera shake from a single photograph. *ACM Trans. Graph.*, 2006, vol. 25, no. 3, pp. 787–794. DOI: 10.1145/1141911.1141956
10. **Shan Q., Jia J., Agarwala A.** High-quality motion deblurring from a single image. *ACM Trans. Graph.*, 2008, vol. 27, no. 3, pp. 1–10. DOI: 10.1145/1360612.1360672
11. **Fried D. L.** Probability of getting a lucky short-exposure image through turbulence. *J. Opt. Soc. Am., JOSA*, 1978, vol. 68, no. 12, pp. 1651–1658. DOI: 10.1364/JOSA.68.001651
12. **Law N. M., Mackay C. D., Baldwin J. E.** Lucky imaging: high angular resolution imaging in the visible from the ground. *A&A*, 2006, vol. 446, no. 2, Art. no. 2. DOI: 10.1051/0004-6361:20053695
13. **Wilding D., Soloviev O., Pozzi P., Vdovin G., Verhaegen M.** Blind multi-frame deconvolution by tangential iterative projections (TIP). *Opt. Express, OE*, 2017, vol. 25, no. 26, pp. 32305–32322. DOI: 10.1364/OE.25.032305
14. **Löfdahl M. G., Hillberg T.** Multi-frame blind deconvolution and phase diversity with statistical inclusion of uncorrected high-order modes. *A&A*, 2022, vol. 668, p. A129. DOI: 10.1051/0004-6361/202244123
15. **Schulz T. J.** Multiframe blind deconvolution of astronomical images. *J. Opt. Soc. Am. A, JOSAA*, 1993, vol. 10, no. 5, pp. 1064–1073. DOI: 10.1364/JOSAA.10.001064
16. **Yasarla R., Patel V. M.** Learning to Restore Images Degraded by Atmospheric Turbulence Using Uncertainty. *2021 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2021, pp. 1694–1698. DOI: 10.1109/ICIP42928.2021.9506614
17. **Mao Z., Jaiswal A., Wang Z., Chan S. H.** Single Frame Atmospheric Turbulence Mitigation: A Benchmark Study and a New Physics-Inspired Transformer Model. *Computer Vision – ECCV 2022*, S. Avidan, G. Brostow, M. Cissé, G. M. Farinella, and T. Hassner, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2022, pp. 430–446. DOI: 10.1007/978-3-031-19800-7_25
18. **Gopalakrishnan Nair N., Mei K., Patel V. M.** A Comparison of Different Atmospheric Turbulence Simulation Methods for Image Restoration. *2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2022, pp. 3386–3390. DOI: 10.1109/ICIP46576.2022.9897969

Информация об авторах

Москаленко Константин Юрьевич, магистрант

Погибельная Ольга Дмитриевна, бакалавр

Мигинский Денис Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент; научный сотрудник

Information about the Authors

Konstantin Yu. Moskalenko, Master's Student

Olga D. Pogibelnaya, Bachelor's Student

Denis S. Miginsky, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor

*Статья поступила в редакцию 08.04.2025;
одобрена после рецензирования 30.05.2025; принята к публикации 30.05.2025*

*The article was submitted 08.04.2025;
approved after reviewing 30.05.2025; accepted for publication 30.05.2025*