

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

ИНСТИТУТ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК И МАТЕМАТИКИ

Кафедра астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды

**ПОИСК МОЛОДЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД В СИНОПТИЧЕСКИХ
ОБЗОРАХ**

Специальность 03.05.01 «Астрономия»

Зав. кафедрой:
к. ф.-м. н., доцент
Э. Д. Кузнецов

Дипломная работа

**Алкубелат
Хала Сулейман**

Нормоконтролер:
ст. преподаватель
А. С. Перминов

Научный руководитель:
к. ф.-м. н., доцент кафедры
А. Ф. Селезнёв

Екатеринбург
2022

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа специалиста содержит 88 страниц, 43 рисунка, 6 таблиц, 28 источников цитирования.

ПОИСК МОЛОДЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД В СИНОПТИЧЕСКИХ ОБЗОРАХ

Целями данной работы являются классифицировать молодые звездные объекты (YSOs) по цветам широкоугольного инфракрасного обзора (AllWISE), выявить переменные молодые звездные объекты (VARYSO) в нашей выборке из синоптического обзора ZTF и классифицировать их на основе вариаций потока и физического механизма, вызывающего наблюдаемую переменность. Мы идентифицировали 284 YSOs. Среди них, мы обнаружили 16 VARYSO с помощью онлайн-инструмента SNAD ZTF и визуального осмотра. Мы использовали множество индексов переменности, основанных на разбросе и корреляции, для обнаружения VARYSO. Мы обнаружили 8 кандидатов в VARYSO. Их переменность выявлялась с помощью индексов, основанных на корреляции, в основном индексов Стетсона. Кандидаты в VARYSO имеют низкоамплитудные вариации блеска. Были классифицированы как классические звезды типа Т-Тельца (CTTS) с переменностью, вызванной затмением околозвездной среды. Не было обнаружено связи между классификацией YSO на основе AllWISE и VARYSO как CTTS и звезды со слабой линией Т-Тельца (WTTS) из-за небольшого количества классифицированных VARYSO.

Abstract

The final qualifying work of a specialist contains 88 pages, 43 figures, 6 tables, 28 citation sources.

SEARCH FOR YOUNG VARIABLE STARS IN SYNOPTIC SURVEYS

This work aims at classifying young stellar objects (YSOs) by Wide-field Infrared Survey Explorer (AllWISE) colors, identifying variable young stellar objects (VARYSO) in our sample using the ZTF synoptic survey, and classifying them based on flux variations and the physical mechanism causing the observed variability. We identified 284 YSOs. Among them, we found 16 VARYSOs using the SNAD ZTF online tool and the visual inspection. We used a variety of scatter and correlation based variability indices to detect VARYSO. We have found 8 VARYSO candidates. Their variability was revealed using correlation-based indices, mainly Stetson indices. VARYSO candidates have low-amplitude brightness variations. They were classified as classical T Tauri stars (CTTS) with variability caused by an occultation of the circumstellar medium. No relationship has been found between the AllWISE and VARYSO classification of YSOs as CTTS and weak-line T-Tauri stars (WTTS) due to the small number of VARYSO.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	2
Abstract	2
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
1 Обзор литературы	7
1.1 IC 1805	7
1.2 Переменность Т-Тельца	7
1.3 Индексы переменности при обнаружении VARYSO	11
1.4 Индексы переменности на основе разброса	11
1.5 Индексы переменности на основе корреляции	13
2 Постановка задачи работы	17
3 Способы и методы решения задачи	18
3.1 Обнаруженные молодые звездные объекты по цветам AllWISE . .	18
3.2 Выборка молодых звездных объектов в обзоре ZTF	22
3.3 Описание выборки переменных в поле IC 1805	23
3.4 Индексы переменности при идентификации VARYSO	69
3.5 Алгоритм тестирования индексов переменности	70
3.6 Классификация кандидаты в VARYSO	74
4 Результаты и их обсуждение	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ	86

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей работе применяют следующие обозначения и сокращения:

AllWISE – широкоугольный инфракрасный обзор

BRCs – яркие окаймленные облака

CTTS – классические звезды Т-Тельца

DSP – распределенное звездное население

SED – спектральное распределение энергии

TTS – звезда Т-Тельца

VARYSO – переменный молодой звездной объект

WTTS – слабые звезды Т-Тельца

YSOs – молодые звездные объекты

ZTF – транзистный обзор имени Цвикки

ВВЕДЕНИЕ

Идентификация и классификация молодых звездных объектов (YSOs) дает представление об истории звездообразования и обеспечивает лучшее понимание процесса звездной эволюции.

Молодые звездные объекты, которые представляют собой раннюю стадию звездообразования, можно разделить на 3 разных класса в зависимости от их инфракрасного избытка. Класс I: Образующаяся протозвезда в виде коллапса газа в молекулярном облаке под действием силы гравитации, объекты класса II - это звезды Т-Тельца с оптическим тонким диском, и объекты класса III представляют собой более развитые (бездисковые) YSOs, которые обычно трудно отличить от объектов главной последовательности [1].

Gutermuth [2] разработали многофазную схему классификации YSOs на основе данных Spitzer[3]. Kang [4] применил процедуру поэтапной классификации на основе данных AllWISE [5], в которой исключаются астрофизические загрязнения, и которая позволяет разделить YSOs на класс I, класс II, класс III и объекты с переходными дисками.

Звезда Т-Тельца представляет собой промежуточную стадию между погруженной протозвездой и звездой главной последовательности. Они очень молоды $< 10^7$ лет и < 3 массы Солнца [6]. Звезды Т-Тельца (TTS) демонстрируют переменность, происходящую во всех диапазонах волн, от рентгеновского до инфракрасного. За этой преобладающей характеристикой стоят несколько явлений, таких как модуляция вращением, изменение скорости аккреции, околозвездное затмение и т. д.

Мониторинг фотометрической переменности YSO выявил разнообразие такого явления, заключающееся в том, что наблюдаемый поток может изменяться с амплитудами от тысячных долей звездной величины до целых звездных величин во временных масштабах от нескольких минут до, по крайней мере, века [7].

Обзоры в инфракрасном диапазоне, такие как AllWISE, и обзоры фотометрической переменности, такие как ZTF [8], служат ключевым инструментом для проверки соответствия классификации YSOs в ИК-диапазоне и проявлений оптической переменности. Современные наблюдения за переменностью показывают звездную и околозвездную активность [9].

Фотометрия временных рядов YSO также позволяет наблюдать явления, отличные от вращательной модуляции, такие как вспышки, нестабильность диска и затменные двойные системы. Данные могут использоваться в качестве тестов для изохрон звезд до главной последовательности (PMS). Сопровождение процесса идентификации YSO с помощью ИК-наблюдений с фотометрией временных рядов может обнаружить изменения температуры, эволюцию диска и формирование планет.

Что неизвестно, так это то, как обнаруженные в ИК обзорах YSO могут коррелировать с классификацией звезд Т-Тельца (TTS), основанной на вариациях потока в

разных временных масштабах.

Мы предполагаем, что проверка классификации по цветам AllWISE и классификации TTS на основе кривой блеска может обеспечить более точное исследование молодого населения IC 1805. В этой работе мы стремимся идентифицировать YSO по цветам AllWISE, выявить переменные молодые звездные объекты (VARYSO) в нашей выборке и классифицировать TTS на основе вариаций потока и физического механизма, вызывающего наблюдаемую переменность.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Обзор литературы

1.1 IC 1805

Молодое рассеянное скопление IC 1805 расположено на расстоянии 2 кпк [10] в комплексе W4 ассоциации Cas OB6, которая является одной из активных областей массивного звездообразования [11]. Было обнаружено, что возраст IC 1805 составляет от 1 до 3 млн лет. [10]. Угловой диаметр IC 1805 колеблется от 20 до 25 угловых минут. В результате динамической эволюции, IC 1805 окружено распределенным звездным населением (DSP) [11]. Большое количество OB-звезд в W4 влияет на процесс звездообразования в IC 1805. Молодые маломассивные звезды в окрестностях массивных OB-звезд подвержены УФ-излучению, вызывающего фотоиспарение дисков. Из-за сжатия и эрозии ранее существовавших облаков массивными звездами несколько кометообразных облаков с яркой каймой (BRCs) в W4 указывают на яркие звезды IC 1805. Межзвездное поглощение в направлении IC 1805 неоднородно по всей области скопления со средним значением A_v , близким к 2.5 звездной величины. В работе Panwar [12], выявил 384 кандидата в YSOs. Кандидаты были разделены на 101 Класс I/II, и 234 Класса II.

Данное скопление было выбрано нами в качестве область для изучения переменности звезд типа Т-Тельца.

1.2 Переменность Т-Тельца

Звезды Т-Тельца — это маломассивные звезды до главной последовательности, которые демонстрируют переменную яркость. Они представляют собой фазу эволюции молодых звезд между погруженными протозвездами, которые можно изучать только в инфракрасном и радиодиапазоне, и звездами главной последовательности, недавно ставшими видимыми в оптическом диапазоне [13]. Им можно присвоить спектральный класс и, следовательно, разместить на диаграмме Герцшпрунга-Рассела [14].

Переменность является одной из основных особенностей звезд типа Т-Тельца и наблюдается во всех длинах волн, от рентгеновского до инфракрасного. Характерное время вариаций блеска колеблется от нескольких минут до не менее века.

Оптическая переменность звезд типа Т-Тельца может иметь как периодическую, так и аperiodическую составляющие. Вариации блеска достигают 2.8 звездной величины во временной шкале часов или дней.

Оптические спектры звезд типа Т Тельца также характеризуются значительной переменностью и ярко выраженными эмиссионными линиями, в первую очередь водорода, ионизированного кальция и нейтрального железа.

Важным признаком молодости звезд типа Т Тельца является наличие линии лития LiI 6707Å. Температура фотосфер относительно низкая, обычно менее 6000 К.

Сильные линии ультрафиолетового излучения и избыточный континуум указывают на хромосферную активность, часто наблюдается корональное радио- и рентгеновское излучение [15].

Существует два основных класса звезд типа Т Тельца: классические (CTTS) и со слабыми водородными спектральными линиями (WTTS). Критерием является эквивалентная ширина линии $H\alpha$: для CTTS $EW_{H\alpha} > 5 - 10 \text{ \AA}$, для WTTS $EW_{H\alpha} < 5 - 10 \text{ \AA}$.

CTTS ($M_{\star} \leq 2 M_{\odot}$) со спектральными классами от F до M окружены околозвездным диском, из которого они еще аккрецируют вещество.

CTTS имеют сильные магнитные поля, которые разрушают аккреционный диск на расстоянии нескольких звездных радиусов от звезды и направляют аккрецирующий материал, образуя аккреционные столбы. В то время как горячие пятна присутствуют на звездной поверхности CTTS из-за удара аккрецирующего газа о поверхность, холодные пятна образуются в результате магнитной активности.

Наличие массивного диска сильно влияет на оптическую переменность. Изменение темпов аккреции, характерное для классических звезд типа Т Тельца, приводит как к нерегулярным высокоамплитудным вариациям светимости (вспышкам), так и к низкоамплитудным дисковым вариациям светимости в ИК-диапазоне. При определенной ориентации массивного диска относительно луча зрения могут наблюдаться нерегулярные перепады блеска, вызванные затмением центральной звезды облаками с повышенным поглощением излучения. Чаще этот тип изменчивости наблюдается у CTTS более раннего типа, таких как RY Tau и CO Ori. Одной из характеристик этого типа переменности является внезапное падение яркости звезды до трех звездных величин, за которым следует более медленное и неравномерное восстановление.

Периодическая составляющая переменности классических звезд Т Тельца может быть объяснена наличием холодных и горячих пятен на их поверхности. Прежде всего горячих пятен от взаимодействия аккрецирующего вещества с поверхностью звезды в районе магнитных полюсов [16].

CTTS теряют свои диски до того, как достигают главной последовательности, и становятся звездами типа Т Тельца со слабыми линиями (WTTS), которые больше не демонстрируют заметных признаков аккреции.

Основной причиной нерегулярной изменчивости WTTS является хромосферно-коронная активность солнечного типа.

Регулярные почти синусоидальные изменения в оптическом диапазоне с амплитудой от 0.01 до 0.5 звездной величины на шкалах времени от 1 до 15 дней обусловлены вращением звезды с холодными пятнами на поверхности и наблюдаются на многих WTTSs.

Форма и амплитуда флуктуаций блеска медленно изменяются с характерным временем от месяцев до лет, но период остается стабильным, что подтверждает мнение о том, что причиной переменности является вращательная модуляция.

Амплитуда переменности различна при наблюдениях в разных фильтрах, по цветовым вариациям можно оценить температуру пятен, и они обычно примерно на 1000 К ниже температуры фотосферы [7].

Ниже приведенная таблица 1.1 характерных признаков переменных звезд типа Т-Тельца разных типов.

Таблица 1.1 – Схема классификации звезд Т Тельца по кривым блеска [7]

Характер переменности	Особенности переменности	Причина переменности	CTTS	WTTS
Периодические колебания почти синусоидальной формы с амплитудой 0.01 – 0.5 звездной величины и периодом от дней до десятков дней	Форма кривой блеска и амплитуда может меняться, но период остается стабильными в течение месяцев или лет. Сильная корреляция во всех фильтрах. Цвет звезды более красный в минимуме блеска (амплитуда колебаний больше в фильтре g)	Вращательная модуляция холодной пятнистой звезды	-	+
Иррегулярные или квазипериодические падения блеска на временной шкале от дней до десятков дней, с амплитудой до 3 звездных величин с последующим медленным восстановлением	Хорошая корреляция по g и r. Дополнительный разброс в g. Цвет звезды более красный в минимуме блеска	Затмения, вызванные наличием околозвездной среды	+	-
Иррегулярное увеличение блеска	Хорошая корреляция в g и r. Более случайный разброс в g. Обычно краснеют по мере затухания, показывая большую амплитуду в фильтре g	Увеличение скорости аккреции	+	-

1.3 Индексы переменности при обнаружении VARYSO

Измерению переменности погруженного YSO может помешать свет непременных источников. Таким образом, понимание механизма, вызывающего переменность, зависит от того, насколько надежным и эффективным является обнаружение изменений блеска источника. Ошибка измерения и систематический эффекты затрудняют обнаружение истинной низкоамплитудной переменности. Следовательно, можно использовать несколько индексов переменности с последующим разложением Фурье для определения периодичности. На последнем этапе проводится визуальный осмотр.

На разных этапах эволюции YSO, переменность меняется. Каждому этапу эволюции соответствует характерное поведение переменности, вызванное несколькими механизмами. Механизмы варьируются от аккреции до пятен на звезде. Индексы переменности характеризуют общий разброс измерений на кривой блеска и/или степень корреляции между последовательными измерениями потоков.

Индексы делятся на: индексы переменности на основе разброса, такие как хи-квадрат, стандартное отклонение, нормированная избыточная вариация, нормализованная амплитуда от пика к пику, среднее абсолютное отклонение, робастная медианная статистика, индексы на основе корреляции, такие как индекс автокорреляции, индекс переменности Уэлча-Стетсона, индексы Стетсона, и индекс фон-Неймана.

1.4 Индексы переменности на основе разброса

1.4.1 Критерий хи-квадрат, χ^2

Тест χ^2 определяет вероятность того, что отклонения кривой блеска согласуются с ошибкой фотометрических измерений (т.е. случайной ошибкой измерения). Нулевая гипотеза для теста состоит в том, что нет переменности [17]. χ^2 определяется следующим образом [18]:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{m_i - \bar{m}}{\sigma_i^2}, \quad (1.1)$$

где N — количество наблюдений, m — звездная величина, σ_i - ошибка звездной величины, и \bar{m} - среднее значение звездной величины.

Большое значение χ^2 указывает на большее отклонение по сравнению с фотометрическими ошибками и, следовательно, меньшую вероятность того, что нулевая гипотеза верна (т.е. звезда переменная) [17].

Тест χ^2 не использует преимущества коррелированных изменений в многополосных временных рядах, как например критерий Стетсона, чтобы попытаться идентифицировать коррелированные переменные с низкой амплитудой.

В наземной фотометрии плохое знание ошибок измерений (гауссовых) ограничивает применимость критерия хи-квадрат.

Статистика χ^2 , применяемая к данным фотометрических временных рядов, учиты-

вает только распределение измеренных звездных величин, игнорируя информацию о том, когда были получены эти измерения. Таким образом, статистика χ^2 не может отличить случаи, когда мелкомасштабные отклонения в одном направлении от среднего значения случайным образом распределяются по кривой блеска, от случаев, когда многие из отклонений одного знака сосредоточены вокруг определенного времени. Таким образом, этот критерий не устойчив к выбросам[17]. Он сочетает в себе преимущества индексов переменности, основанных на разбросе и корреляции.

1.4.2 Стандартное отклонение По сравнению с непременной звездой обнаруживаемая переменная звезда должна иметь большой разброс измерений на кривой блеска. Один из способов вычисления стандартного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m}_i)^2}. \quad (1.2)$$

если предполагается, что предполагаемые ошибки отражают относительная точность измерений, ее взвешенный вариант:

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N w_i}{(\sum_{i=1}^N w_i)^2 - \sum_{i=1}^N (w_i)^2} \sum_{i=1}^N w_i (m_i - \bar{m}_i)^2}. \quad (1.3)$$

Предполагая, что m_i взяты из распределений Гаусса, имеющих дисперсию σ_i^2 и том же среднем \bar{m} выбор весов $w_i = 1/\sigma_i^2$ максимизирует вероятность получения множества измерений (m_i) . Таким образом, при заданном наборе измерений (m_i, σ_i) , наилучшей оценкой среднего значения:

$$m_i = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\sigma_i^2} / \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}. \quad (1.4)$$

1.4.3 Среднее медианное абсолютное отклонение (MAD)

Определяется как:

$$MAD = median(|m_i - median(m_i)|), \quad (1.5)$$

где m - звездная величина. Единственный недостаток (MAD) заключается в том, что он нечувствителен к реальным вариациям, которые случаются лишь изредка, например, к редким затмениям двойной системы типа Алголь, которая может показывать практически постоянную яркость вне затмений [17] или транзитам экзопланет.

1.4.4 Переменность от пика к пику, ν

Изменение от пика к пику может быть представлено как:

$$\nu = \frac{(m_i - \sigma_i)_{max} - (m_i + \sigma_i)_{min}}{(m_i - \sigma_i)_{max} + (m_i + \sigma_i)_{min}}. \quad (1.6)$$

ν чувствительный индикатор переменности, если мы считаем, что кривая блеска свободна от выбросов. Хотя ν можно вычислить для кривой блеска, состоящей всего из двух наблюдений, ожидаемое значение ν для непременного источника сильно зависит от количества измерений [17].

1.4.5 Нормированная избыточная дисперсия, σ_{NXS}

Нормированная избыточная дисперсия используется в рентгеновской и оптической астрономии для характеристики амплитуды переменности при наличии изменяющихся ошибок измерений. σ_{NXS} определяется как:

$$\sigma_{NXS} = \frac{1}{N\bar{m}^2} \sum_{i=1}^N [(m - \bar{m}_i)^2 - \sigma_i^2], \quad (1.7)$$

где N - количество наблюдений, m - звездная величина, σ - ошибка звездной величины. σ_{NXS} может быть отрицательным, если предполагаемые ошибки σ_i больше, чем фактический разброс измерений, m_i .

1.4.6 Робастная медианная статистика, $RoMS$

$RoMS$ определяется следующим образом:

$$RoMS = (N - 1)^{-1} \sum_{i=-1}^N \frac{\text{median}(|m_i - \text{median}(m_i)|)}{\sigma_i}, \quad (1.8)$$

где N - количество наблюдений, m - звездная величина, σ - ошибка звездной величины. Ожидаемое значение $RoMS$ для непременного объекта составляет около 1, так как большинство измерений должно быть в пределах 1σ от медианное значение (если σ оценивается правильно).

1.5 Индексы переменности на основе корреляции

1.5.1 Автокорреляция Lag-1, l_1

Индекс автокорреляции первого порядка характеризует сходство последовательных измерений потоков. l_1 определяется следующим образом:

$$l_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (m_i - \bar{m})(m_{i+1} - \bar{m})}{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}. \quad (1.9)$$

l_1 теряет эффективность, если кривая блеска выбрана неравномерно, поскольку пары точек данных, далеко разнесенные во времени и слабо коррелированные или пол-

ностью некоррелированные, вносят вклад в значение l_1 в равной степени с парами измерений, близких во времени, которые могут быть хорошо коррелированы.

1.5.2 Индекс переменности Уэлча-Стетсона, I

Характеризует степень корреляции между n квазисовременными парами измерений, полученными в двух фильтрах b и v :

$$I = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_i - \bar{b}}{\sigma_{b_i}} \right) \left(\frac{v_i - \bar{v}}{\sigma_{v_i}} \right). \quad (1.10)$$

Фотометрические наблюдения обычно проводятся таким образом, чтобы промежуток времени между двумя последовательными измерениями потока был меньше, чем временной масштаб переменности, ожидаемый для объекта.

I можно применить к наблюдениям в одном фильтре, разделив данные на две подвыборки, которые будут имитировать измерения в двух фильтрах. Один из очевидных способов добиться этого – разделить данные на четные и нечетные измерения. Если кривая блеска с одним фильтром не полностью состоит из пар близко расположенных точек, мы не используем пары измерений, выполненные далеко друг от друга во времени.

ΔT_{max} : максимальная разница во времени между двумя наблюдениями, которые считаются достаточно близкими по времени для формирования пары. Если ΔT_{max} слишком мало, только несколько точек кривой блеска сформируют пары и будут способствовать тому, что индекс станет непригодным для использования [17].

Оптимальное значение ΔT_{max} было бы достаточно большим, чтобы сформировать множество пар измерений на неравномерно дискретизированной кривой блеска, но достаточно маленьким, чтобы оставаться чувствительным к широкому диапазону временных масштабов переменности, поскольку I чувствителен к вариациям на временных шкалах от ΔT_{max} до общей продолжительности наблюдений [17].

Гистограмма интервала между наблюдениями может быть полезна при выборе подходящего значения ΔT_{max} для данного набора данных [17].

1.5.3 Индексы Стетсона J , K , L

Индекс Стетсона должен быть разбросан около нуля и иметь более высокие положительные значения для звезд с коррелированной физической переменностью (J). индекс J показывает более высокую дисперсию в сторону более слабых звездных величин, и для более слабых объектов следует использовать другое минимальное значение [17].

Отдельные точки можно сохранить в анализе. Каждой группе, состоящей из одной или нескольких точек, присваивается вес w .

J – мера степени корреляции между последовательными измерениями яркости. Определяется как:

$$J = \frac{\sum_{k=1}^n w_k \operatorname{sgn}(P_k) \sqrt{|P_k|}}{\sum_{k=1}^n w_k}, \quad (1.11)$$

где sgn - знаковая функция. Здесь набор фотометрических данных делится на n групп, каждая из которых состоит из двух или более квазиодновременных наблюдений (в одном или нескольких фильтрах).

Кривая блеска с одним фильтром может быть разделена на подвыборки, чтобы имитировать многоканальные данные, с той разницей, что при анализе могут сохраняться изолированные точки. Каждая группа, состоящая из одной или нескольких точек, присвоен вес w_k . P_k определяется как:

$$P_k = \begin{cases} (\sqrt{\frac{n_v}{n_v-1}} \frac{v_i - \bar{v}}{\sigma_{v_i}}) (\sqrt{\frac{n_b}{n_b-1}} \frac{b_i - \bar{b}}{\sigma_{b_i}}) & \text{парное наблюдение} \\ \frac{n_v}{n_v-1} \left(\frac{v_i - \bar{v}}{\sigma_{v_i}} \right)^2 - 1 & \text{единичное наблюдение.} \end{cases} \quad (1.12)$$

K – надежная мера эксцесса гистограммы величин:

$$K = \frac{1/N \sum_{i=1}^N \left| \sqrt{\frac{n_v}{n_v-1}} \frac{v_i - \bar{v}}{\sigma_{v_i}} \right|}{\sqrt{1/N \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{\frac{n_v}{n_v-1}} \frac{v_i - \bar{v}}{\sigma_{v_i}} \right)^2}}. \quad (1.13)$$

L – комбинация K и J . Этот индекс разработан для максимизации шансов обнаружения хорошо измеренных непрерывно переменных звезд. Он менее эффективен для объектов, которые показывают изменения яркости лишь изредка (двойные системы типа Алголя, вспыхивающие звезды, переходные процессы) [17].

$$L = \sqrt{\pi/2} J K \left(\sum w/w_{all} \right), \quad (1.14)$$

где (w/w_{all}) – отношение весов всех точек кривой блеска к общему весу, который имела бы звезда, если бы она была успешно измерена на всех изображениях. Это соотношение предназначено для уменьшения значения комбинированного индекса переменности L для звезд с небольшим количеством измерений [17].

1.5.4 Отношение фон Неймана, η

Отношение η количественно определяет гладкость временного ряда и определяется как отношение среднего квадрата последовательной разности к дисперсии распределения:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (m_i - m_{i+1})^2 / (N-1)}{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2 / (N-1)}. \quad (1.15)$$

Чтобы иметь большие значения индекса, соответствующие большей вероятности то-

го, что объект является переменным, можно использовать $1/\eta$ в качестве показателя переменности.

2 Постановка задачи работы

Основная цель данной работы является изучение переменности молодых звездных объектов в IC 1805 со статистической точки зрения. Основные задачи, необходимые для достижения поставленной цели, сформулируем следующим образом:

- провести анализ литературы, посвященной туманности IC 1805;
- провести анализ литературы, посвященной переменностью звезд Т-Тельца и статистические подходы к выявлению их переменности;
- получить выборку звезд путем кроссидентификации данных Gaia DR2 и AllWISE;
- Исключить астрофизические загрязнения, идентифицировать и классифицировать YSO по их положению на цветовой диаграмме.;
- получить кривые блеска молодых звездных объектов из обзора ZTF и исключить звезд поля с помощью сервиса SNAD ZTF;
- применить индексы перменности для выявления переменных молодых звездных объектов;
- провести тестирование индексов переменности, чтобы выявить VARYSO среди выборки;
- классифицировать VARYSO по форме кривой блеска.

3 Способы и методы решения задачи

3.1 Обнаруженные молодые звездные объекты по цветам AllWISE

Мы начали с кроссидентификации данных из каталогов Gaia DR2 [19] и AllWISE [5], используя параметр углового расстояния между источниками. Экваториальные координаты для эпохи 2000.0 используются в качестве критерия и выбираются пары с угловым расстоянием менее $2''$ (таблица 3.1).

На следующем этапе, мы идентифицировали и классифицировали молодые звездные объекты (YSOs) в IC 1805 на несколько классов на основе их положения на цветовых диаграммах, как это было предложено Kang [4].

Объекты Класса I представляют собой раннюю стадию с падающей околозвездной оболочкой. Класс II - объекты с оптически толстыми дисками. Класс III - объекты с небольшим избытком инфракрасного излучения, которые обычно трудно отличить от ранних звезд главной последовательности, основываясь только на наблюдениях в ИК-диапазоне. объекты с переходными дисками представляют собой промежуточный этап между объектами Класса II и Класса III. Эти объекты лишены внутреннего диска и имеют усеченный внешний толстый диск, что может быть вызвано образованием планеты-гиганта.

Мы использовали полосы AllWISE: w1, w2, w3, w4, чтобы сначала исключить несколько астрофизических загрязнений, которые имитируют поведение YSO, таких как: галактики звездообразования (SFG), активные галактические ядра (AGN), полициклический ароматический водород (ПАВ) и ударно-эмиссионные узлы. Индивидуальные разрезы для исключения загрязняющих веществ: $[4.6] - [12]/[3.4] - [4.6]$ (см.таблица 3.2).

В нашей выборке YSO Класса I, II и переходные диски определяются по критериям указаны в таблице 3.2 т.е положение каждого источника на векторной диаграмме. Остальные источники отнесены к Классу III, то есть к звездам Т-Тельца со слабой линией (WTTS) со звездами поля.

Мы идентифицировали и классифицировали 635 объектов¹, из них 25 объектов II Класса, 526 объектов III Класса и 1 YSO I Класса. На рисунке 3.1 показана цветовая диаграмма $[3.6] - [4.5]$ и $[5.8] - [8.0]$ для всех незагрязненных источников AllWISE. Источники Класса I, Класса II, переходные диски и Класса III показаны красными квадратами, зелеными звездами, синими крестиками и пурпурными точками соответственно.

¹Каталог доступен по адресу: https://optlab.kourovka.ru/Hala/IC1805_class_ZTF.dat

Таблица 3.1 – Описание данных в каталоге кроссидентифицированных объектов

Колонка	Описание, источник	Тип данных
RAJ2000	Прямое восхождение, I/345 (Gaia)	градусы
W_RAJ2000	Прямое восхождение, II/328 (AllWISE)	градусы
DEJ2000	Склонение, I/345 (Gaia)	градусы
W_DEJ2000	Склонение, II/328 (AllWISE)	градусы
Separation	Угловое расстояние между кроссидентифицированными источниками	секунды
W1mag	Видимый блеск в полосе AllWISE 3.4 мкм, II/328	зв. величина
e_W1mag	Ошибка блеска в полосе AllWISE 3.4 мкм, II/328	зв. величина
W2mag	Видимый блеск в полосе AllWISE 4.6 мкм, II/328	зв. величина
e_W2mag	Ошибка блеска в полосе AllWISE 4.6 мкм, II/328	зв. величина
W3mag	Видимый блеск в полосе AllWISE 12 мкм, II/328	зв. величина
e_W3mag	Ошибка блеска в полосе AllWISE 12 мкм, II/328	зв. величина
W4mag	Видимый блеск в полосе AllWISE 22 мкм, II/328	зв. величина
e_W4mag	Ошибка блеска в полосе AllWISE 22 мкм, II/328	зв. величина
Jmag	Видимый блеск в полосе 2MASS 1.25 мкм, II/328	зв. величина
e_Jmag	Ошибка блеска в полосе 2MASS 1.25 мкм, II/328	зв. величина
Hmag	Видимый блеск в полосе 2MASS 1.65 мкм, II/328	зв. величина
e_Hmag	Ошибка блеска в полосе 2MASS 1.65 мкм, II/328	зв. величина
Kmag	Видимый блеск в полосе 2MASS 2.17 мкм, II/328	зв. величина
e_Kmag	Ошибка блеска в полосе 2MASS 2.17 мкм, II/328	зв. величина
Plx	Параллакс, I/345	mas
e_Plx	Параллакс, I/345	mas
ID	Идентификатор объекта в базе данных ZTF	-
Class	Эволюционный статус YSO	-
g_obs	Количество наблюдений ZTF в фильтре g'	-
r_obs	Количество наблюдений ZTF в фильтре r'	-

Таблица 3.2 – Идентификация молодых звездных объектов по данным AllWISE

Задача	Критерии	Этап
Идентификация вероятных галактик со звездообразованием	$w2-w3 > 1.0$ и $w1-w2 < 1.0$ и $w1-w2 < 0.46 * (w2-w3)-0.466$ и $w1 > 12.0$ или $w2 > 11.0$	(1)
Идентификация галактик с активными ядрами	$w1 > 1.8 * (w1-w3) + 4.1$ и $w1 > 13.0$ или $w2 > 12.0$ и $w1 > w1-w3 + 11.0$	(2)
Идентификация узлов ударной эмиссии	$w1-w2 > 1.0$ или $w2-w3 < 2.0$	(3)
Идентификация эмиссий РАН	$w2-w3 < 1.0$ и $w2-w3 > 4.9$ или $w1-w2 < 0.25$ и $w2-w3 > 4.75$	(4)
Объекты I класса	$w2-w3 > 2.0$ и $w1-w2 > -0.42 * (w2-w3) + 2.2$ и $w1-w2 > 0.46 * (w2-w3) + 0.9$	(5)
Объекты II класса	$w1-w2 > 0.25$ и $w1-w2 < 0.9 * (w2-w3)-0.25$ и $w1-w2 > -1.5 * (w2-w3) + 2.1$ и $w1-w2 > 0.46 * (w2-w3) + 0.9$ и $w2-w3 < 4.5$	(6)
Кассификация объектов с переходным диском	$w3-w4 > 1.5$ и $0.15 < w1-w2 < 0.8$ и $w1-w2 > 0.46 * (w2-w3)-0.9$ и $w1 \leq 13.0$	(7)
объекты III класса	Все оставшиеся в выборке объекты. Важно отметить, что могут присутствовать не идентифицированные звезды поля	(8)

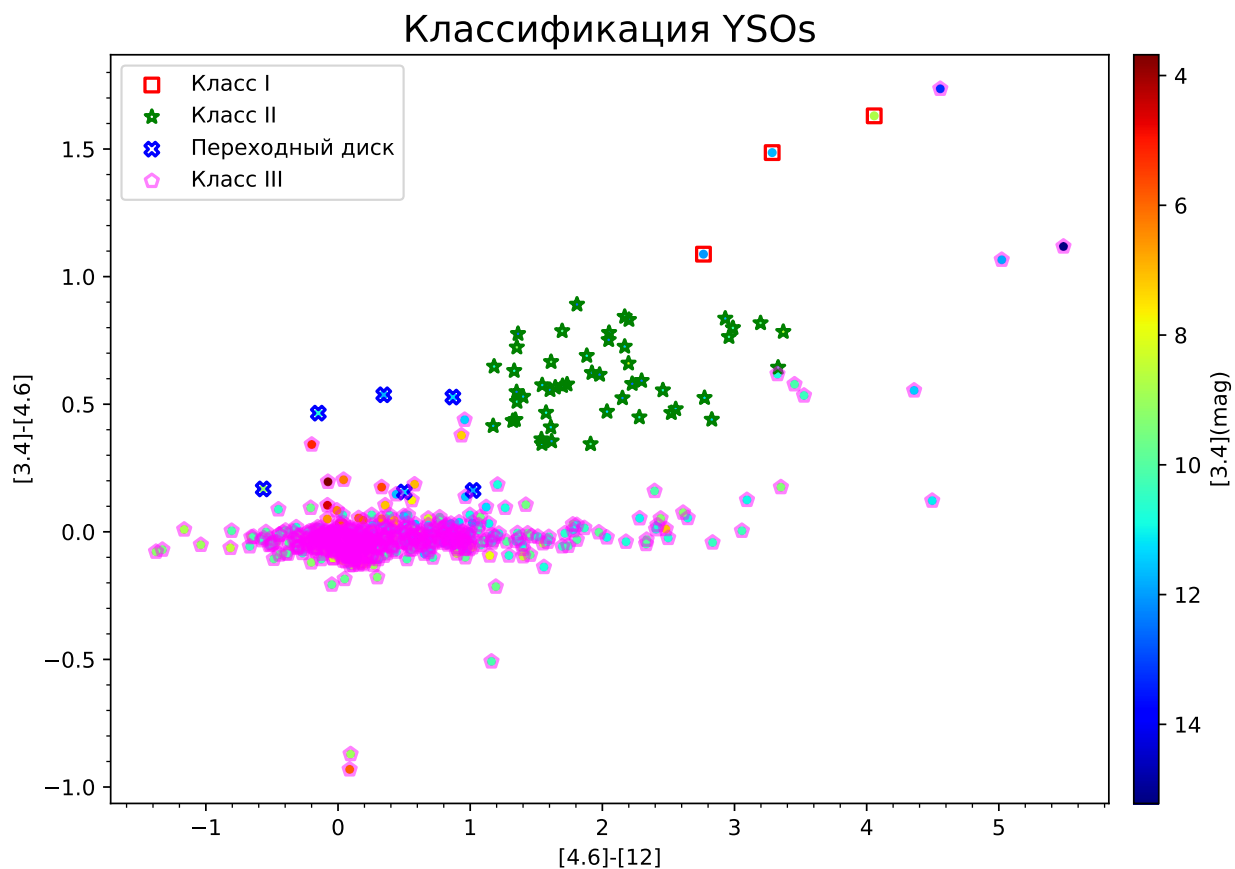


Рисунок 3.1 – Источники класса I, класса II и класса III в IC 1805, идентифицированные цветами AllWISE. Источники Класса I, Класса II, переходные диски и Класса III показаны красными квадратами, зелеными звездами, синими крестиками и пурпурными точками соответственно

3.2 Выборка молодых звездных объектов в обзоре ZTF

Мы использовали синоптический обзор ZTF для получения и изучения кривых блеска YSOs нашей выборки. Используя библиотеку `ztfquery` [20] для Python, мы искали ближайшие объекты в базе данных ZTF в радиусе 1 угловой секунды от ранее идентифицированных YSOs, и построили их кривые блеска для визуального анализа.

Мы получили 545 кривых блеска. Мы исключили 277 кривых блеска из выборки YSOs в IC 1805 после изучения предоставленных о них данных в сервисе SNAD ZTF [21], таких как: геометрическое расстояние по Gaia DR3 [22], классификации в некоторых статьях и каталогах, и их кривые блеска. Все эти исключенные объекты, которые мы называем звездами поля, были классифицированы как объекты Класа III по цветам AllWISE. Среди этих звезд поля мы встретили затменные переменные типа EW, полуправильные гигантские переменные (SR), и некоторых кандидатов в YSO. На расстоянии свыше 2300 пк, принадлежащих фону. Среди остальных 268 кривых блеска, мы наблюдали кривые блеска одного канала (наблюдаемые либо в зеленом, либо в красном фильтре ZTF), некоторые показывают постоянное изменение блеска, или низкоамплитудное изменение блеска.

3.3 Описание выборки переменных в поле IC 1805

Для контроля поиска переменных молодых звездных объектов в нашей выборке из 268 YSOs методами статистических индексов, мы выделили 32 переменных объекта в поле IC 1805, в качестве тестовой выборки. 16 из них являются VARYSO, а остальные являются переменными разных типов: затменная переменная типа EW, полуправильная гигантская переменная звезда (SR).

Следующая таблица 3.3 включает координаты объектов, их идентификатор в базе данных ZTF, расстояние по Gaia DR2, цвет по полосам ZTF, виды переменности, классификацию с помощью полосах AllWISE, наши окончательные классификации на основе данных для каждого объекта и каталоги, в которых они были упомянуты соответственно. Мы классифицируем VARYSO как WTTS и CTTS по схеме, указанной в разделе 1.2 (см.таблица 1.1).

В следующих подразделах дается краткое описание для каждого объекта в выборке сравнения.

Таблица 3.3 – Список переменных YSO в нашей выборке в регионе IC 1805. Характерное время переменности $\sim 1-10$ дней, если не указано иное

	RA	DEC	oid	Расстояние (пк)	$z_g - z_r$ (цвет полосах ZTF)	Классифика- ция по цветам WISE	Вид переменности	Наша классифика- ция	Примечания
1	38.1796 985	61.5164 014	808105200034 440	2253	$z_g=16.90$ $z_r=15.36$ $(z_g-z_r)=$ 1.54	II	Нерегулярные изменения блеска с амплитудой около 0.5^m в фильтрах g и r и характерным временем ~ 100 дней. Кратковременные па- дения блеска до 1.5^m в g и r	CTTS	YSO (Simbad) UXOR (VSX) SR (ZTF)
2	38.3438 255	61.4551 305	808105200010 917	1510	$z_g=18.18$ $z_r=16.52$ $(z_g-z_r)=$ 1.66	II	Нерегулярные падения блеска с амплитудой до 0.5^m в g и r	CCTTS	YSO (2MASS)
3	38.211 788	61.537 755	808105200009 324	2137	$z_g=18.93$ $z_r=17.24$ $(z_g-z_r)=$ 1.69	II	Нерегулярные падения блеска с амплитудой до 0.5 в фильтрах g и r. Кратковре- менные падения блеска до 1.5	CTTS	YSO (Simbad/ 2MASS)
4	38.0717 584	61.3442 101	808105200013 226	1093	$z_g=19.08$ $z_r=17.26$ $(z_g-z_r)=$ 1.82	II	Нерегулярные падения блеска с амплитудой до 1.5 в фильтрах g и r	CTTS	Кандидат в YSO (Simbad/ 2MASS)
5	38.5426 912	61.4112 916	808105200011 596	2063	$z_g=14.65$ $z_r=13.80$ $(z_g-z_r)=$ 0.85	II	Увеличение блеска до 0.3 в g периодом около 180 дней, ам- плитуда в g – меньше	см. раздел 2.1.2	Be (Simbad) YSO (VSX) SR (ZTF)

Продолжение таблицы 3.3

6	38.4026 044	61.6468 809	808105200006 798	1642	zg=18.39 zr=16.86 (zg-zr)= 1.53	II	Непериодические блеска с амплитудой до 1.5 в г и до 2 в g	CTTS	YSO(MGAB- V1440) (VSX)
7	37.9967 135	61.6582 876	808105200006 873	955	zg=17.30 zr=16.04 (zg-zr)= 1.26	II	Непериодические блеска с амплитудой до 1.5 в г и до 2 в g	CTTS	Кандидат в YSO (Simbad/ 2MASS) Переменная звезда неопре- деленного типа (VSX ASAS-SN)
8	38.3779 118	61.6562 041	808105200033 737	2117	zg=17.82 zr=16.39 (zg-zr)= 1.43	II	Непериодические блеска с амплитудой до 0.7 в г и до 1.1 в g	CTTS	Кандидат в YSO (Simbad/ 2MASS)
9	38.7474 514	61.3331 676	808105200012 960	1831	zg=16.11 zr=15.16 (zg-zr)= 0.96	II	Непериодические блеска с амплитудой до 0.7 в г и до 0.8 в g	CTTS	YSO (Simbad/ 2MASS)
10	38.5920 105	61.7572 515	808105200004 038	1824	zg=18.96 zr=17.30 (zg-zr)= 1.66	II	Непериодические блеска с амплитудой до 1.5 в г и до 2 в g	CTTS	YSO (Simbad/ 2MASS)
11	38.8138 085	61.8009 551	808105200002 907	1999	zg=18.51 zr=16.83 (zg-zr)= 1.69	II	Непериодические блеска с амплитудой до 0.5 в г и до 0.8 в g	CTTS	Em(Ae/Be) (Simbad)

Продолжение таблицы 3.3

12	37.4859 708	61.8063 969	808105200019 207	2006	zg=19.59 zr=17.73 (zg-zr)= 1.86	II	Непериодические колебания блеска с амплитудой до 1.3 в г и до 1.6 в g	CTTS	Кандидат в YSO (Simbad/ 2MASS)
13	38.0328 193	61.4143 304	808205200019 854	2219	zg= 16.69 zr 15.45 (zg-zr)= 1.24	II	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.2 в г и до 0.25 в g	WTTS	Кандидат в YSO(Simbad/ 2MASS)
14	38.55 587	61.69902	808205200009 260	980	zg=20.74 zr=19.13 (zg-zr)= 1.62	II	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 1 в г. Обнаруживается период 6.6428 дня	WTTS	YSO (Simbad/ 2MASS) YSO(MGAB- V1442) (VSX)
15	37.75826	61.13256	1811213400003 515	3424	zg=19.77 zr=17.88 (zg-zr)= 1.89	II	Непериодическое уменьше- ние блеска с амплитудой до 0.7 в г и до 1 в g	CTTS	YSO (Simbad/ 2MASS)
16	38.68917	61.49855	808205200035 168	1642	zg=19.91 zr=18.47 (zg-zr)= 1.44	II	Непериодическое уменьше- ние блеска с амплитудой до 2 в г и g	CTTS	YSO (Simbad) YSO(MGAB- V1445) (VSX)
17	38.332 456	61.3449 868	808105200024 057	3256	zg=20.54 zr=18.68 (zg-zr)= 1.86	II	Непериодические падения блеска с амплитудой до 1.0 в филтрах g и г	CTTS	Кандидат в YSO (Simbad/ 2MASS)

Продолжение таблицы 3.3

18	37.5336 671	61.6179 458	808105200008 105	3143	zg=19.47 zr=18.09 (zg-zr)= 1.38	II	Непериодические блеска с амплитудой до 1.9 в г и до 2.1 в g	CTTS	YSO (Simbad/ 2MASS) YSO(MGAB- V1431)(VSX)
19	38.4022 392	61.9367 328	808105200000 385	3474	zg=15.20 zr=12.89 (zg-zr)= 2.31	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой менее 0.5	SR	SR(VSX)
20	38.0457 907	61.3249 941	808105200013 634	6287	zg=19.42 zr=16.36 (zg-zr)= 3.06	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 1 и характерным временем ~ 100 дней	SR	SR (VSX) и (ZTF)
21	38.5148 163	61.3460 392	808105200012 893	5309	zg=18.06 zr=15.19 (zg-zr)= 2.87	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.5 и характерным временем ~ 100 дней	SR	SR (ZTF)
22	38.6823 383	61.5083 526	808105200009 572	4738	zg=18.06 zr=15.19 (zg-zr)= 2.87	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.5 и характерным временем ~ 100 дней	SR	SR (VSX) и (ZTF)
23	37.529 942	61.5188 665	808105200010 147	1631	zg=13.35 zr=12.70 (zg-zr)= 0.65	III	Колебания блеска с амплиту- дой 0.4 и периодом 1.76 дня	Затменная переменная	YSO (Simbad) EB(затменная переменная типа β)(VSX) EW(W)(ZTF)

Продолжение таблицы 3.3

24	37.3994 648	61.2658 887	808105200015 243	3474	zg=14.78 zr=12.44 (zg-zr)= 2.35	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.6 и характерным временем ~100 дней	Звезда поля	Кандидат в YSO (Simbad)
25	38.4503 039	61.7011 261	808105200005 432	1722	zg=14.78 zr=12.44 (zg-zr)= 2.35	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.6 и характерным временем ~100 дней	Звезда поля	Переменная звезда (Simbad/ 2MASS) и SR (VSX) и (ZTF)
26	37.5431 323	61.7209 572	808105200005 687	4790	zg=17.67 zr=15.38 (zg-zr)= 2.30	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.158 в г и до 0.3 в g	SR	
27	37.7225 525	61.2801 481	808105200035 611	5169	zg=17.71 zr=14.82 (zg-zr)= 2.90	II	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 1 в г и до 1.1 в g	SR	Источник ин- фракрасного излучения (Simbad) и SR (VSX) и (ZTF)
28	37.7704 142	61.7267 881	808105200028 052	6083	zg= 17.04 zr=14.37 (zg-zr)= 2.67	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.185 в г и до 0.3 в g	SR	
29	38.5785 859	61.413 684	808105200011 528	3297	zg=16.56 zr=15.23 (zg-zr)= 1.33	III	Непериодические падения блеска с амплитудой до 0.3 в г и 0.5 в g	см. раздел 3.3	

Продолжение таблицы 3.3

30	37.44365	61.21728	808205200026 935	2003	zg=16.61 zr=13.79 (zg-zr)= 2.81	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 1 и характерным временем ~ 100 дней	SR	(Simbad) SR (VSX) и (ZTF)
31	38.27434	61.07621	808205300000 608	1464	zg=20.70 zr=18.50 (zg-zr)= 2.20	II	Периодические синусообраз- ные колебания блеска с пери- одом 0.8606 дня и амплиту- дой 0.4 в г	Затменная переменная типа EW	YSO (Simbad/ 2MASS)
32	38.96119	61.68002	808205200009 380	1734	zg=16.65 zr=14.10 (zg-zr)= 2.55	III	Полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.5 и характерным временем ~ 100 дней	SR	SR (VSX) и (ZTF)

1. 808105200034440 – Класс II YSO / CTTS

Объект 808105200034440 был ранее классифицирован как YSO в 2MASS [23], как UXOR (Ae / Be звезда) в VSX [24] и как полурегулярная гигантская переменная звезда в ZTF [25]. Он показывает непериодические изменения блеска с амплитудой около 0.5^m в полосах g и r и характерным временем ~ 100 дней. Кривая блеска показывает кратковременные падения блеска до 1.5^m в g и r (см. рисунок 3.2). Согласно Gaia DR2 [19], этот объект находится на расстоянии приблизительно 2253 пк. Наша классификация – CTTS.

2. 808105200010917 – Класс II YSO / CTTS

Объект 808105200010917 классифицируется в 2MASS как YSO. Этот объект ранее не классифицировался как переменная звезда. Согласно Gaia DR2 [19], расположен на расстоянии приблизительно 1510 пк. Кривая блеска показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 0.5^m в полосах g и r (см. рисунок 3.3). Мы классифицируем этот объект как CTTS с изменением блеска, вызванным изменением темпа аккреции и / или наличием околозвездной среды.

3. 808105200009324 – Класс II YSO / CTTS

Объект 808105200009324 был классифицирован в 2MASS как YSO на расстоянии 2137 пк. Однако он не упоминается ни в одном каталоге переменных звезд. Этот класс II YSO показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 0.5^m в полосах g и r и кратковременные падения блеска до 1.5^m (см. рисунок 3.4), вероятно, вызванное изменением темпа аккреции и / или наличием околозвездной среды, что чаще встречается в CTTS.

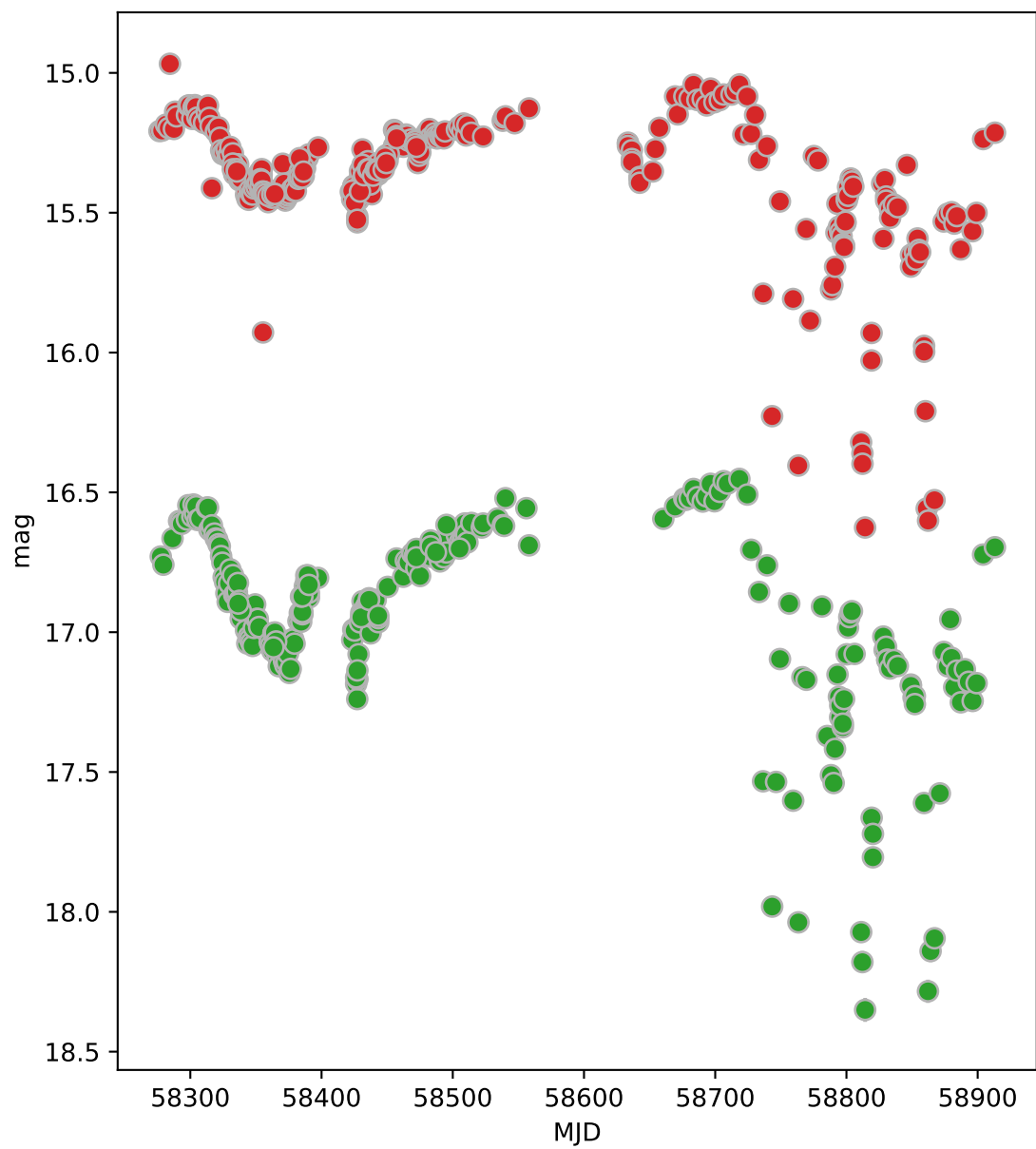


Рисунок 3.2 – Кривая блеска объекта 808105200034440 II класса идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

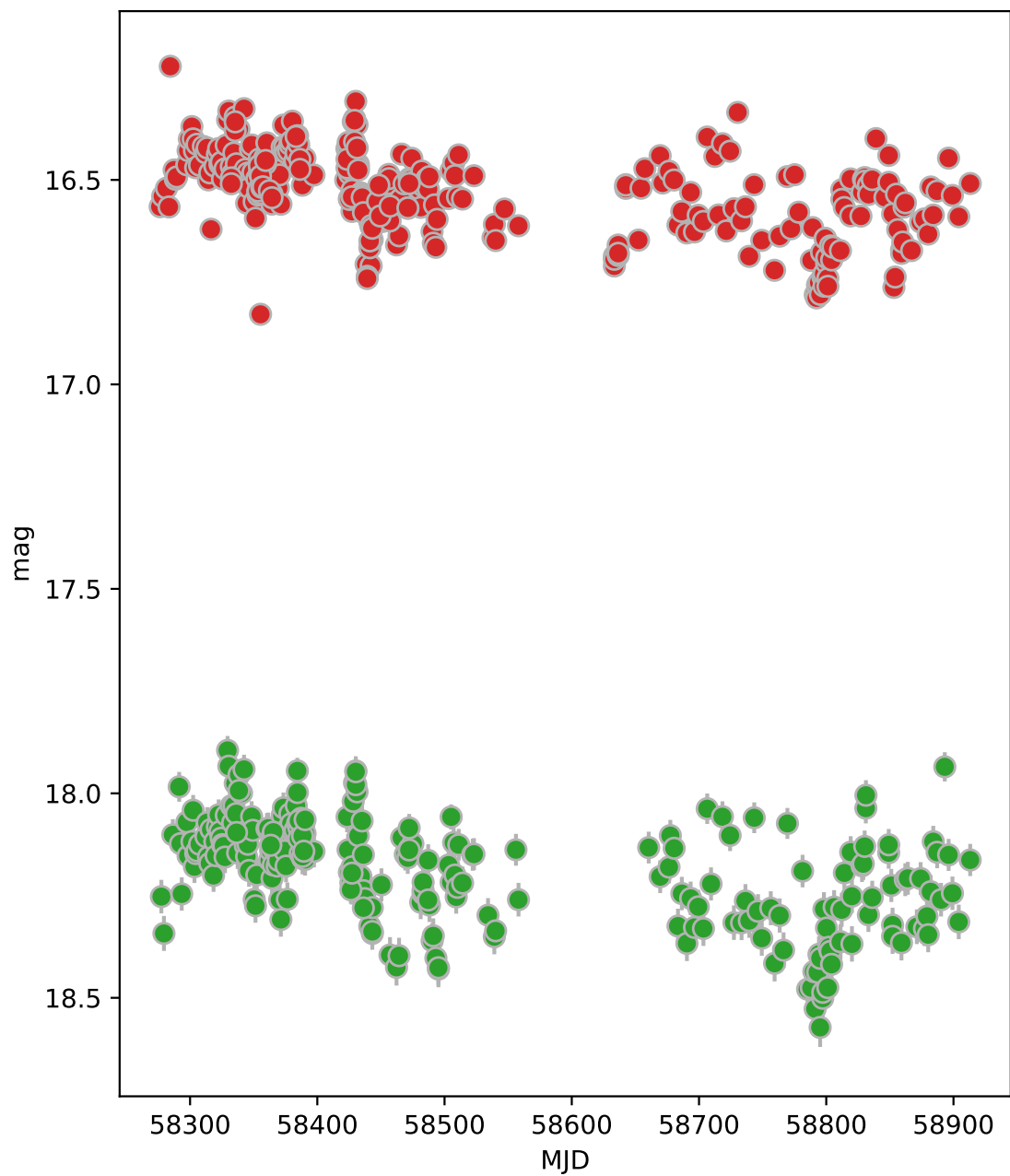


Рисунок 3.3 – Кривая блеска объекта 808105200010917 II класса идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

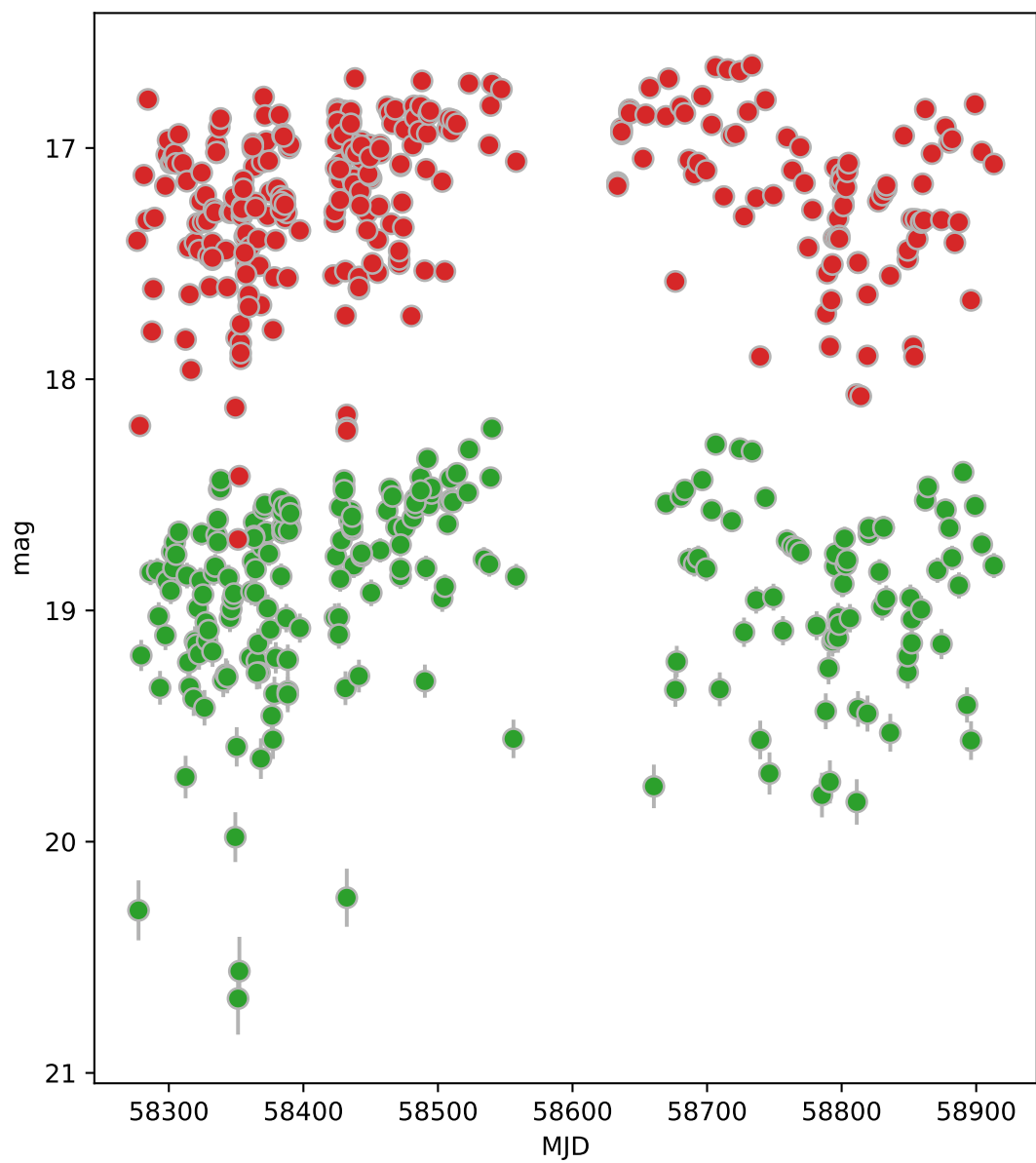


Рисунок 3.4 – Кривая блеска объекта 808105200009324 II класса идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

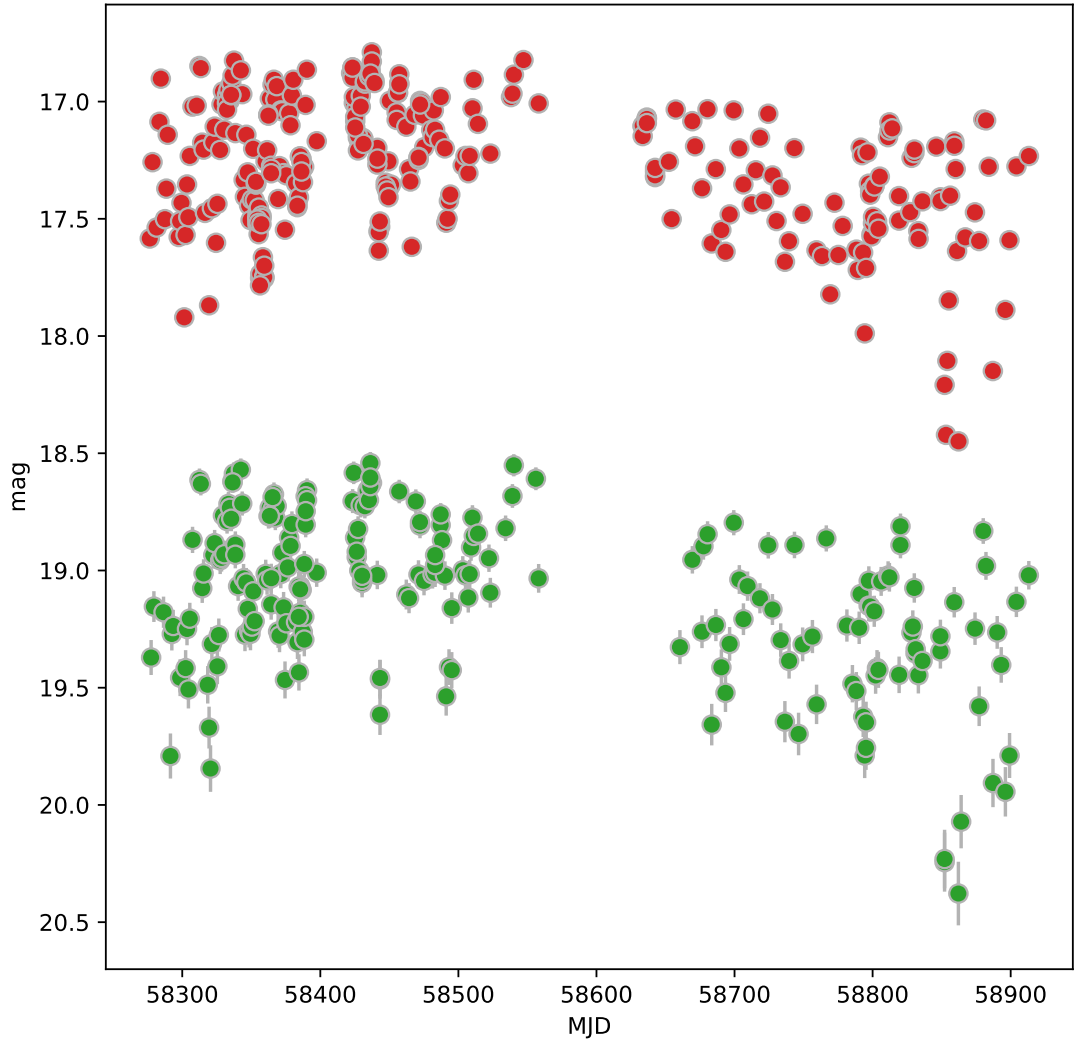


Рисунок 3.5 – Кривая блеска объекта 8808105200013226 II класса идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

4. 8808105200013226 – Класс II YSO / CTTS

объект 8808105200013226 был упомянут в каталоге 2MASS как кандидат в YSO на расстоянии 1093 пк. Он не был классифицирован ни в одном каталоге переменных звезд. Наблюдается неперіодические падения блеска с амплитудой до 1.5^m в полосах g и r (см.рисунок 3.5). Нами звезда классифицирована как CTTS.

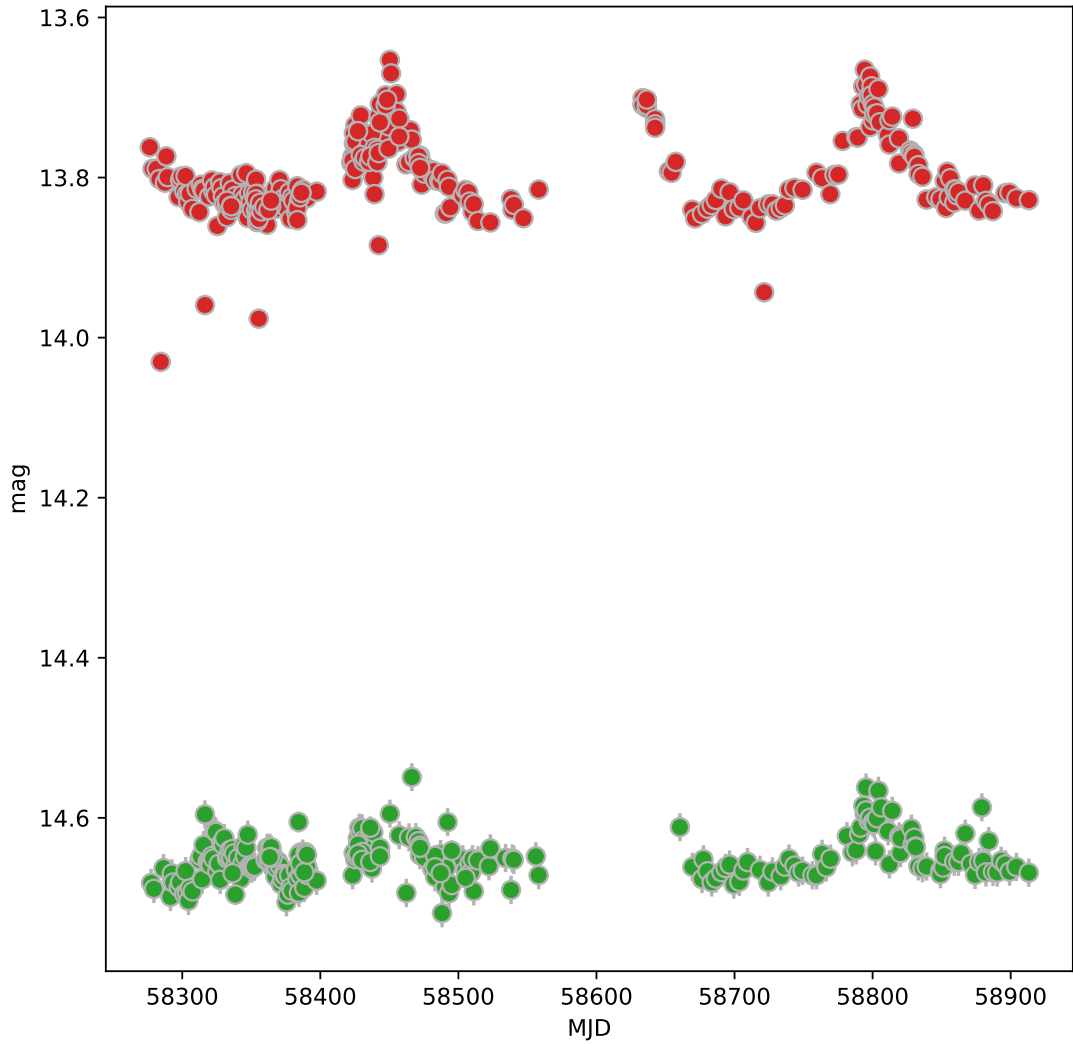


Рисунок 3.6 – Кривая блеска объекта 808105200011596 II класса по данным AllWISE. Мы не можем однозначно классифицировать ее

5. 808105200011596 – Класс II YSO / –

Объект 808105200011596 упоминается в VSX как YSO на расстоянии 2063 пк. Кроме того, объект был упомянут в каталоге переменных звезд ZTF как полуправильная переменная гигантская звезда (SR) с периодом около 183 дней. На кривых блеска ZTF наблюдается регулярное увеличение блеска до 0.3^m в г (см. рисунок 3.6). Согласно данным AllWISE, объект имеет ИК избыток, в то же время, показатель цвета $(g-r) = 0.85$. Кривая блеска TESS имеет форму характерную для затменной переменной с большим эксцентриситетом, глубина затмений около 10% с периодом 3.37 дня. Мы не смогли однозначно классифицировать этот объект.

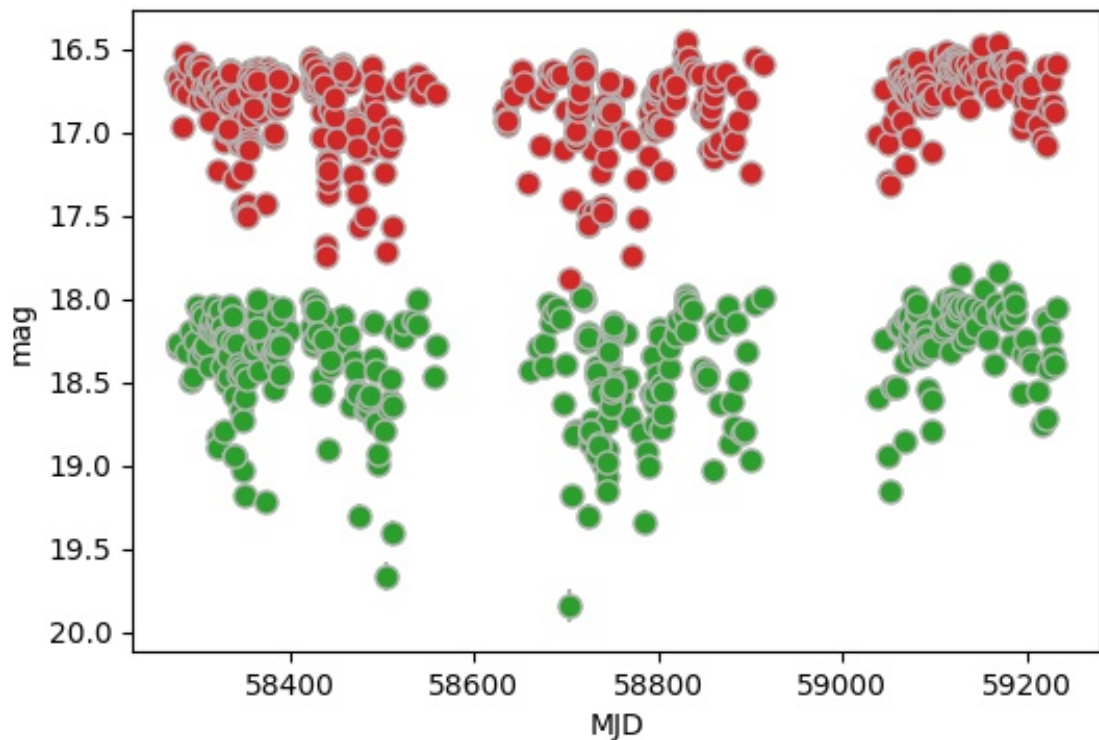


Рисунок 3.7 – Кривая блеска объекта 808105200006798 II класса идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

6. 808105200006798 – Класс II YSO / CTTS

Объект 808105200006798 был классифицирован в VSX как YSO неопределенного типа переменности на расстоянии 1642 пк (см.рисунок 3.7). Он показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 1.5^m в г и до 2^m в g. Нами звезда классифицирована как CTTS.

7. 808105200006873 – Класс II YSO / CTTS

Объект был классифицирован как YSO неизвестного типа в ASAS-SN, как кандидат в YSO в 2MASS. 808105200006873 показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 1.5^m в г и до 2^m в g (см.рисунок 3.8). Нами звезда классифицирована как CTTS.

8. 808105200033737 – Класс II YSO / CTTS

Объект был классифицирован как кандидат в YSO в 2MASS на расстоянии 2117 пк. Он показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 0.7^m в г и до 1.1^m в g (см.рисунок 3.9). Нами звезда классифицирована как CTTS.

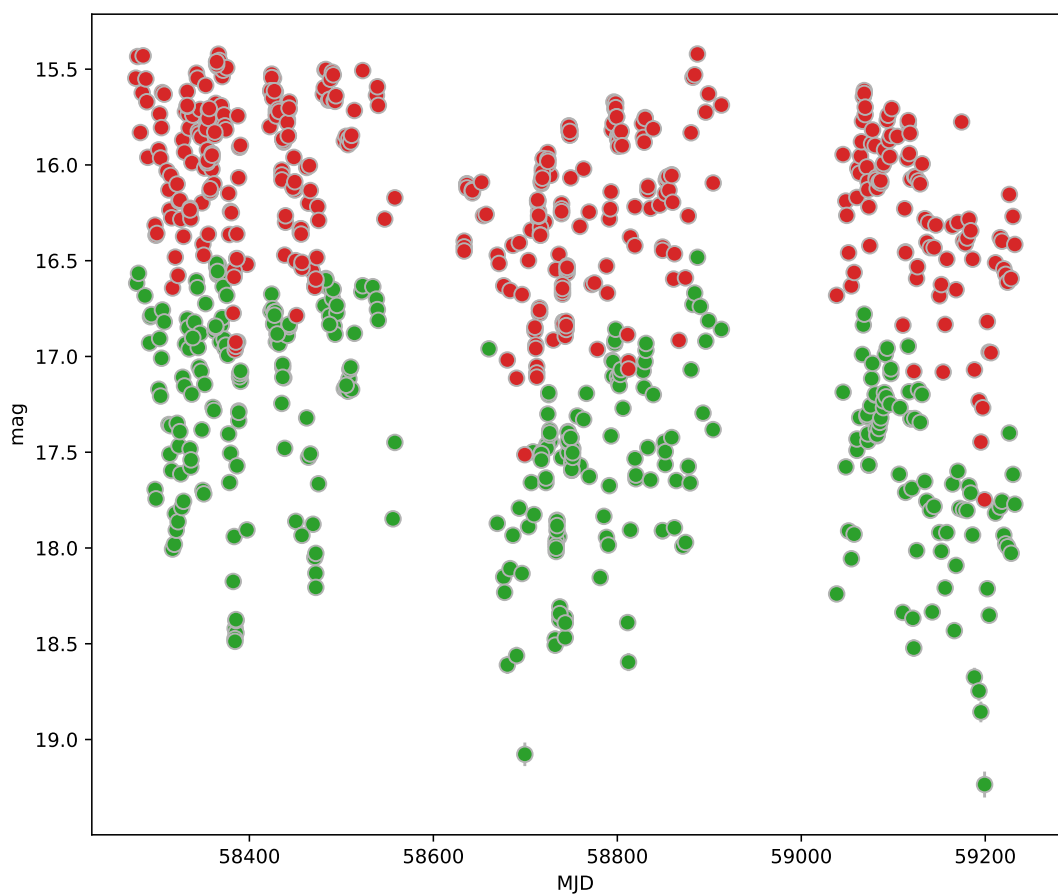


Рисунок 3.8 – Кривая блеска объекта 808105200006873 II класса идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

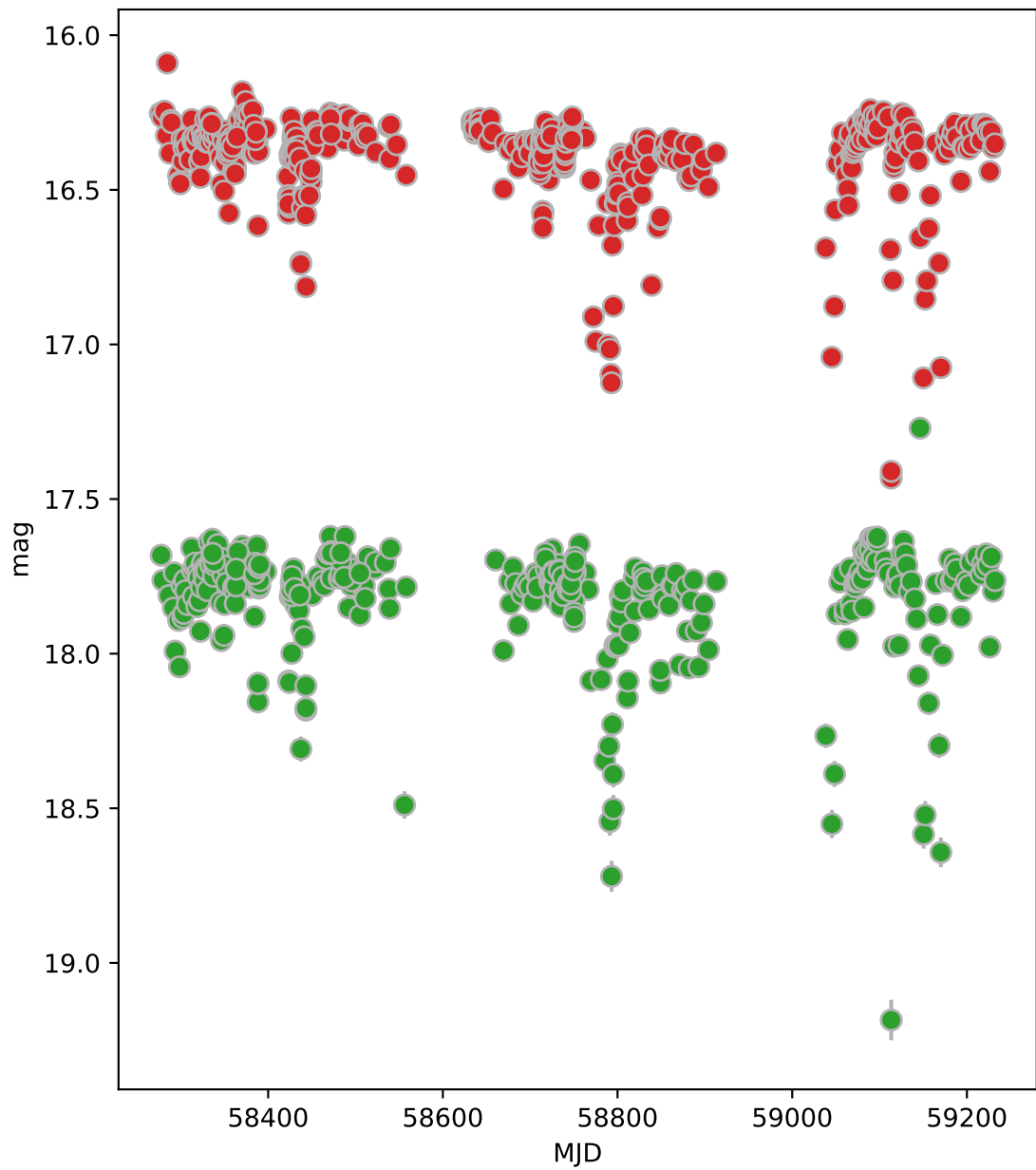


Рисунок 3.9 – Кривая блеска объекта 808105200033737 III класса идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

9. 808105200012960 – Класс II YSO / CTTS

Объект был классифицирован как YSO в 2MASS. 808105200012960 показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 0.7^m в г и до 0.8^m в g (см.рисунок 3.10). Он находится на расстоянии 1831 пк. Нами звезда классифицирована как CTTS.

10. 808105200004038 – Класс II YSO / CTTS

Объект был классифицирован как YSO в 2MASS. Объект показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 1.5^m в г и до 2^m в g (см.рисунок 3.11). Он находится на расстоянии 1824 пк. Нами звезда классифицирована как CTTS.

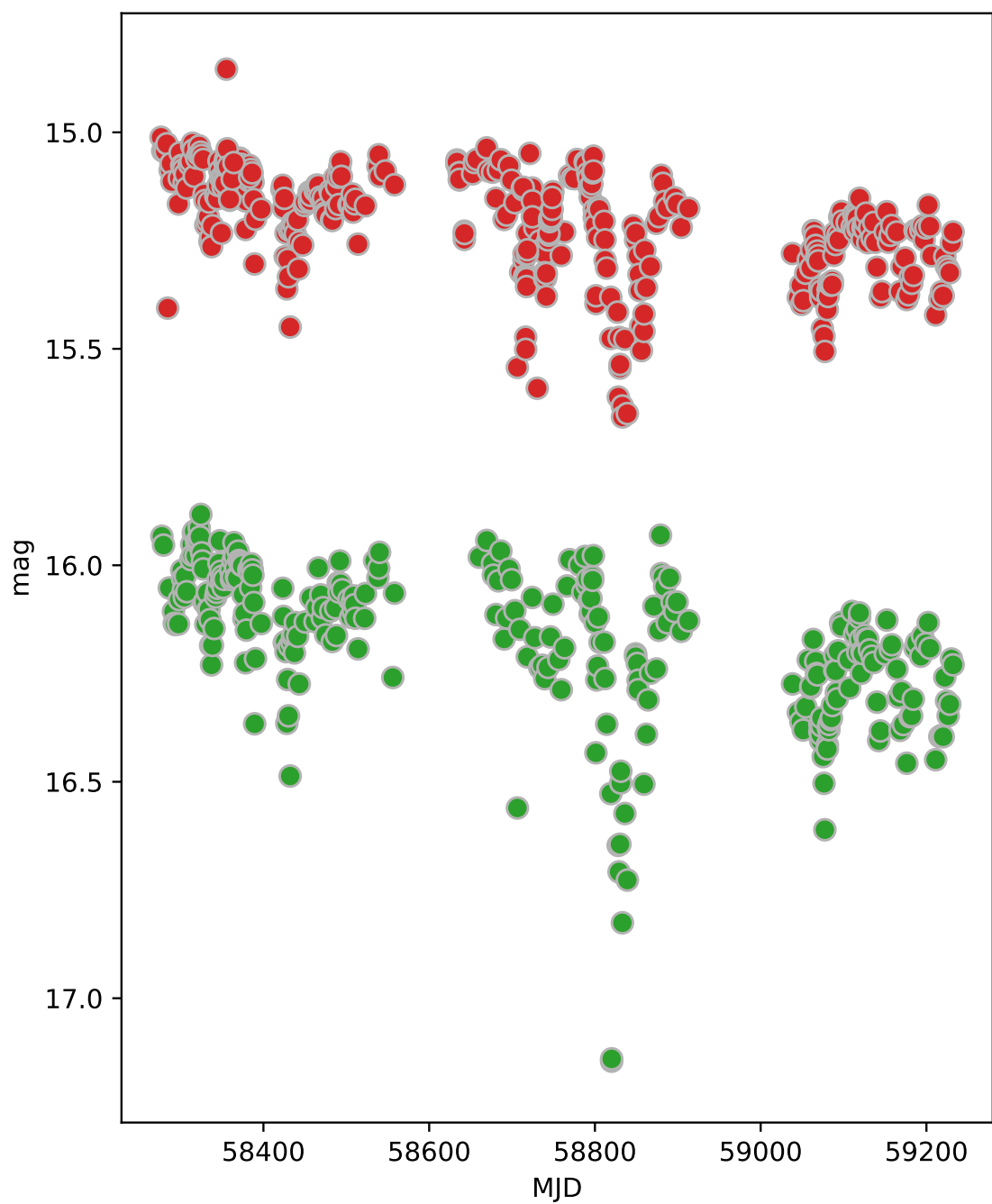


Рисунок 3.10 – Кривая блеска объекта 808105200012960 II класса
идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

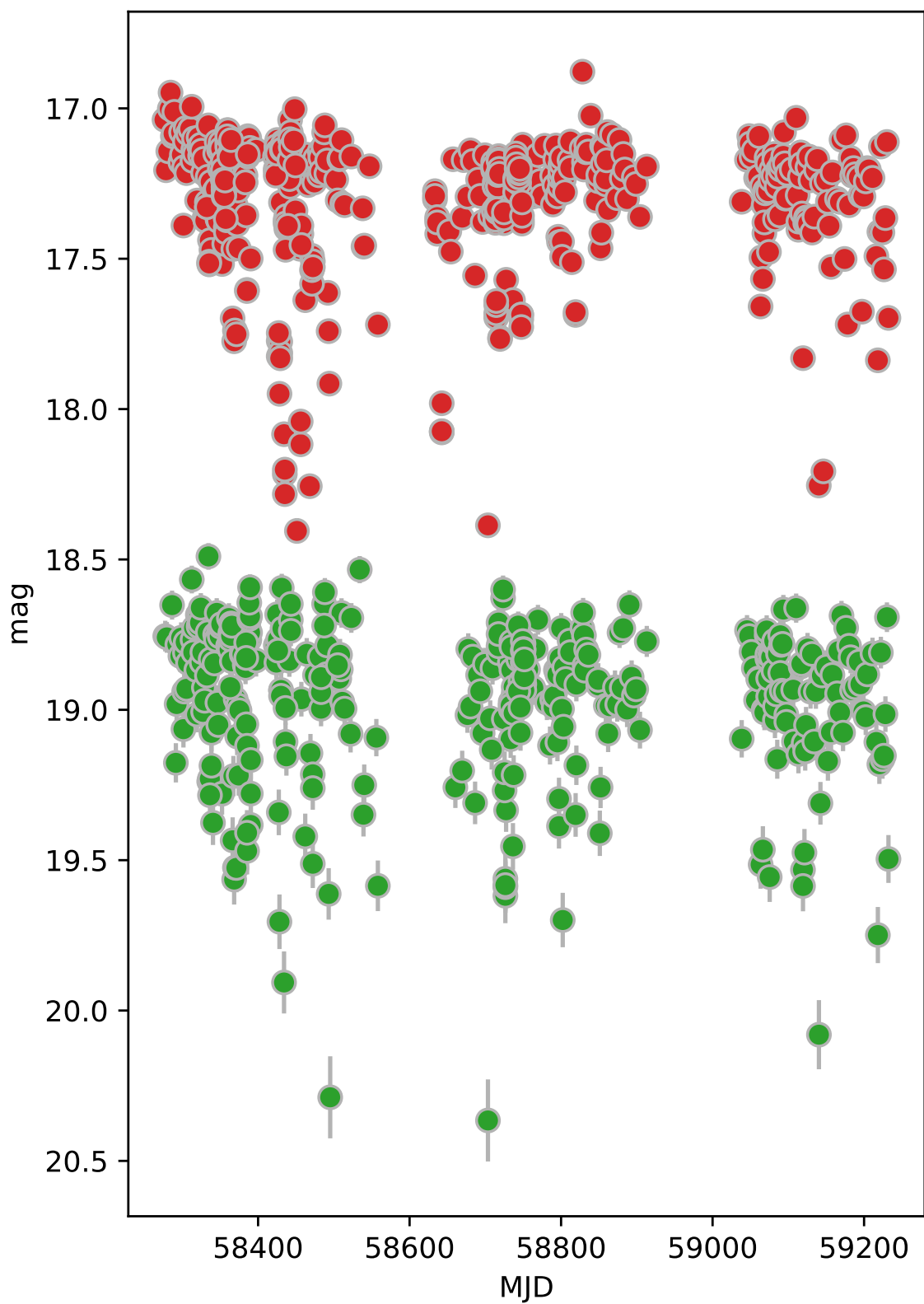


Рисунок 3.11 – Кривая блеска объекта 808105200004038 II класса
идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

11. 808105200002907 – Класс II YSO / CTTS

Объект был классифицирован в Simbad как YSO и звезда с эмиссией. Объект показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 0.5^m в г и до 0.8^m в g (см.рисунок 3.12). Он находится на расстоянии 1999 пк. Нами звезда классифицирована как CTTS.

12. 808105200019207 – Класс II YSO / CTTS

Объект был классифицирован как кандидат в YSO в 2MASS. Объект показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 1.3^m в г и до 1.6^m в g (см.рисунок 3.13). Он находится на расстоянии 2006 пк. Нами звезда классифицирована как CTTS.

13. 808205200019854 – Класс II объект / WTTS

Объект 808205200019854 был классифицирован как кандидата в YSO [10]. YSO показывает полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.2^m в г и до 0.25^m в g (см.рисунок 3.14). YSO на расстоянии 2219 пк. Нами звезда классифицирована как WTTS.

14. 808205200009260 – Класс II YSO / WTTS

объект 808205200009260 был классифицирован как YSO в работе Panwar [26] и VSX. Объект находится на расстоянии 980 пк. Наблюдаются полуправильные колебания блеска с амплитудой до 1^m в г. Обнаруживается период 6.6428 дня (см.рисунок 3.15). Нами звезда классифицирована как WTTS.

15. 1811213400003515 – Класс II YSO / CTTS

Объект 1811213400003515 был классифицирован как YSO [27]. Он находится на 3424 пк. На кривых блеска ZTF наблюдаются непериодическое уменьшение блеска с амплитудой до 0.7^m в г и до 1^m в g (см.рисунок 3.16). Нами звезда классифицирована как CTTS.

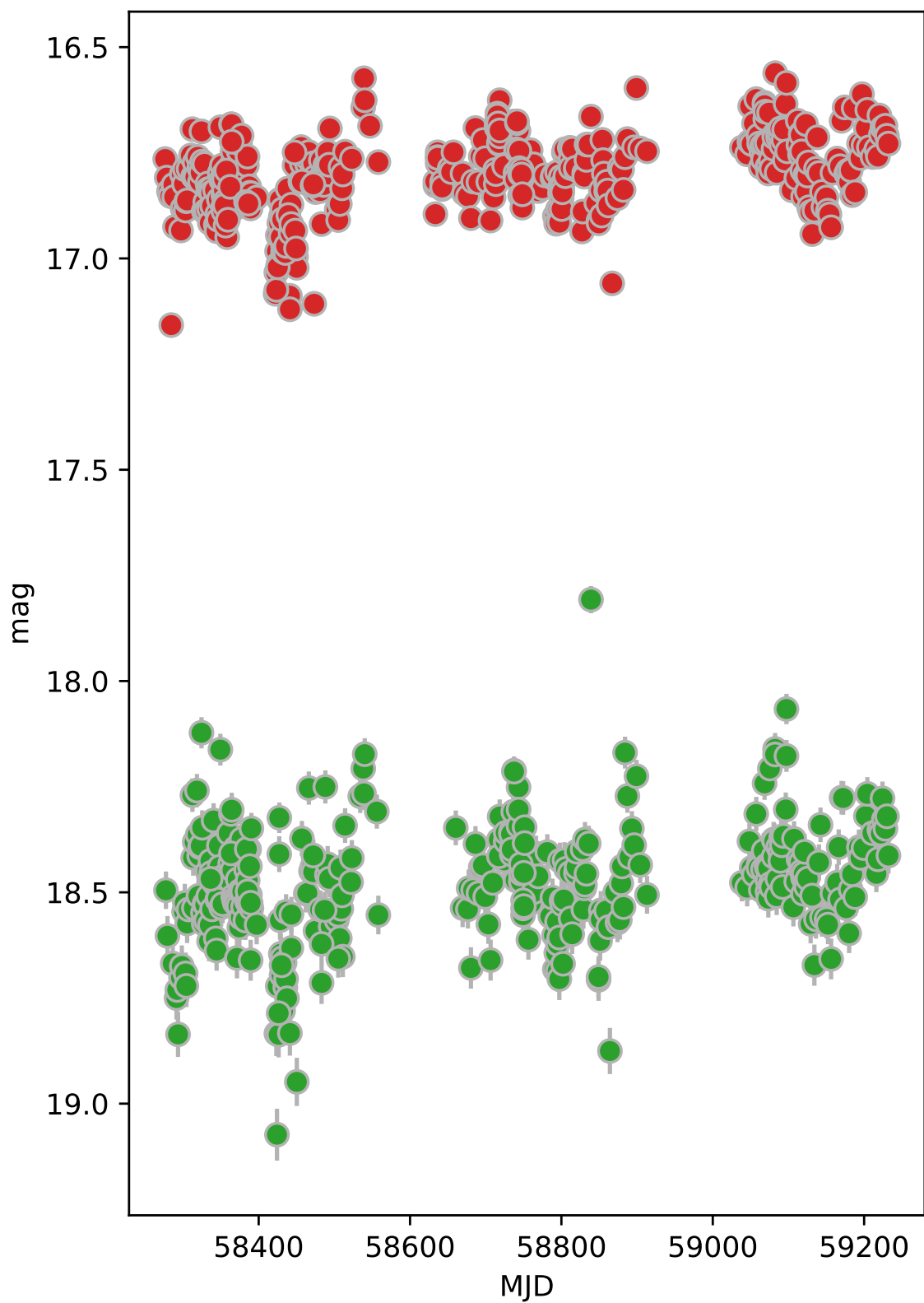


Рисунок 3.12 – Кривая блеска объекта 808105200002907 II класса
идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

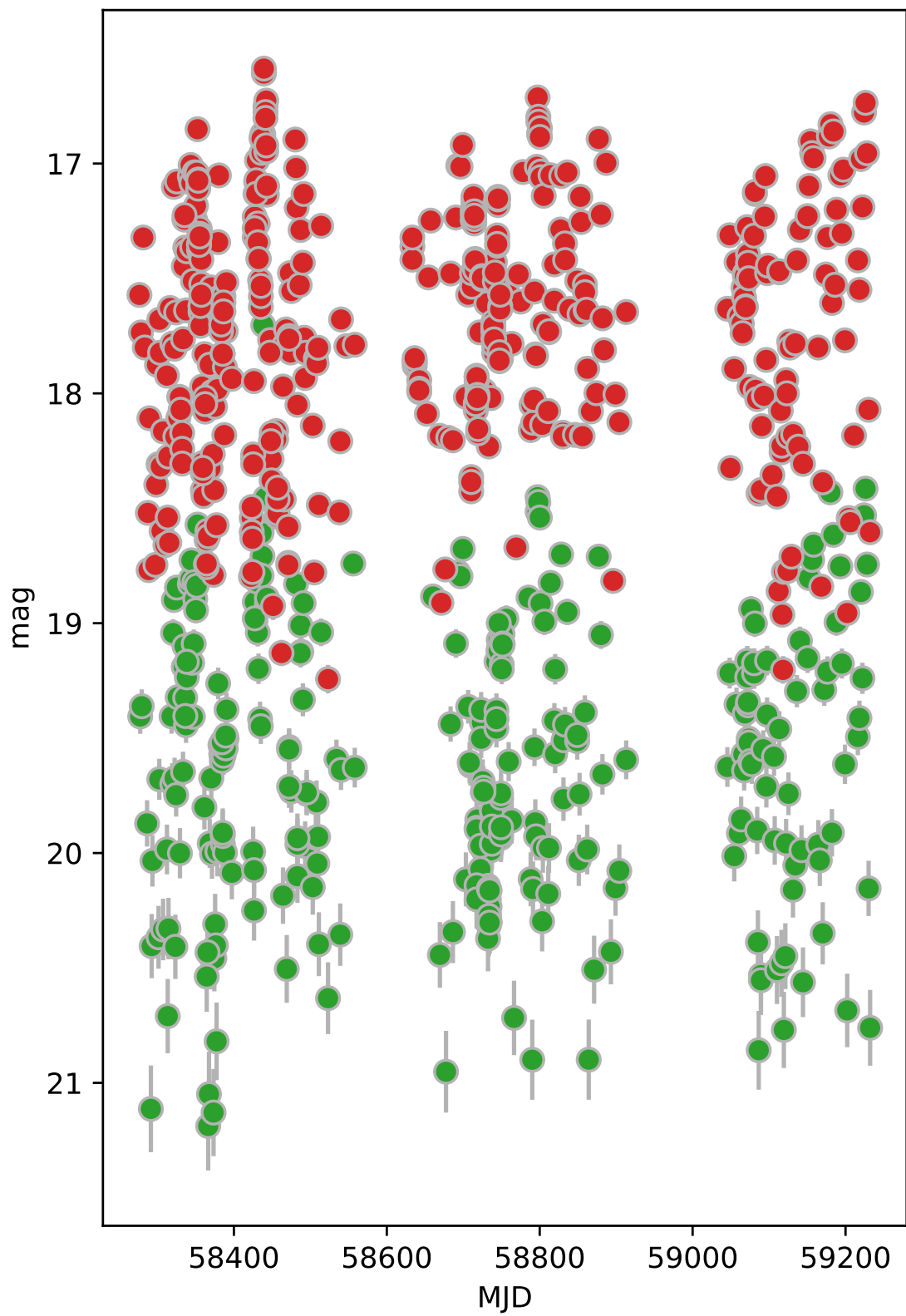


Рисунок 3.13 – Кривая блеска объекта 808105200019207 II класса
идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

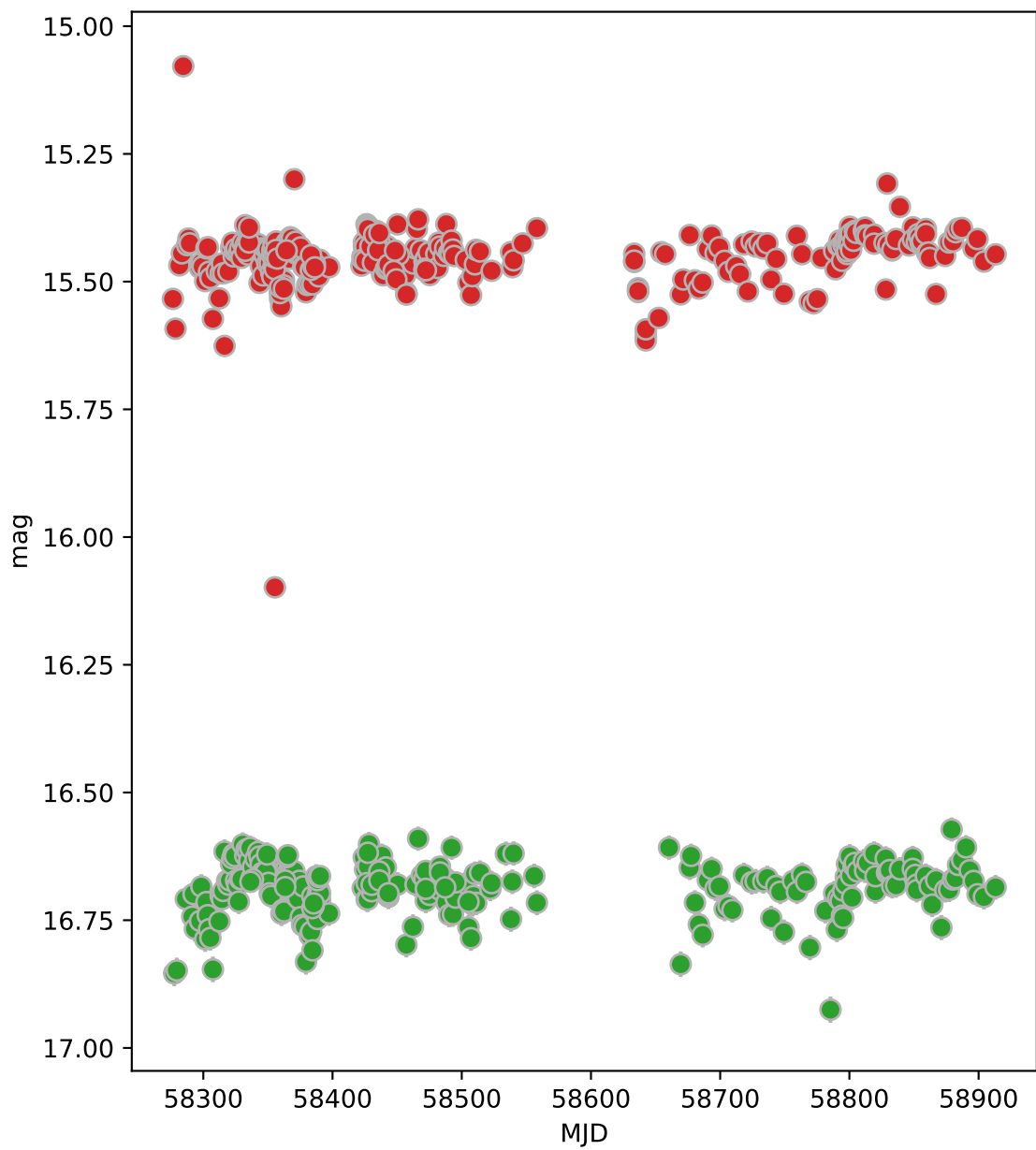


Рисунок 3.14 – Кривая блеска объекта 808205200019854 II класса
идентифицированная нами как WTTS по данным ZTF

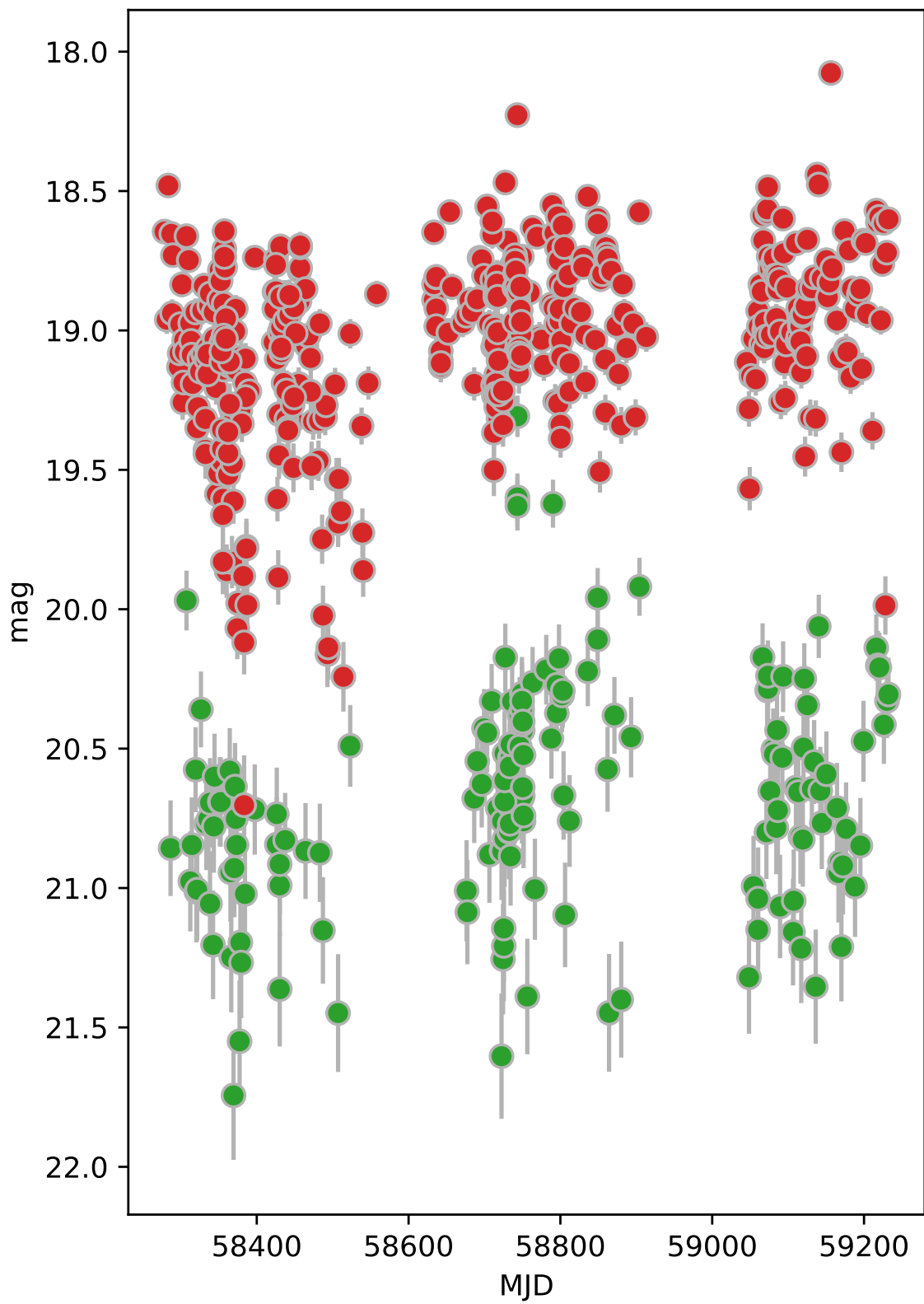


Рисунок 3.15 – Кривая блеска объекта 808205200009260 II класса
идентифицированная нами как WTTS по данным ZTF

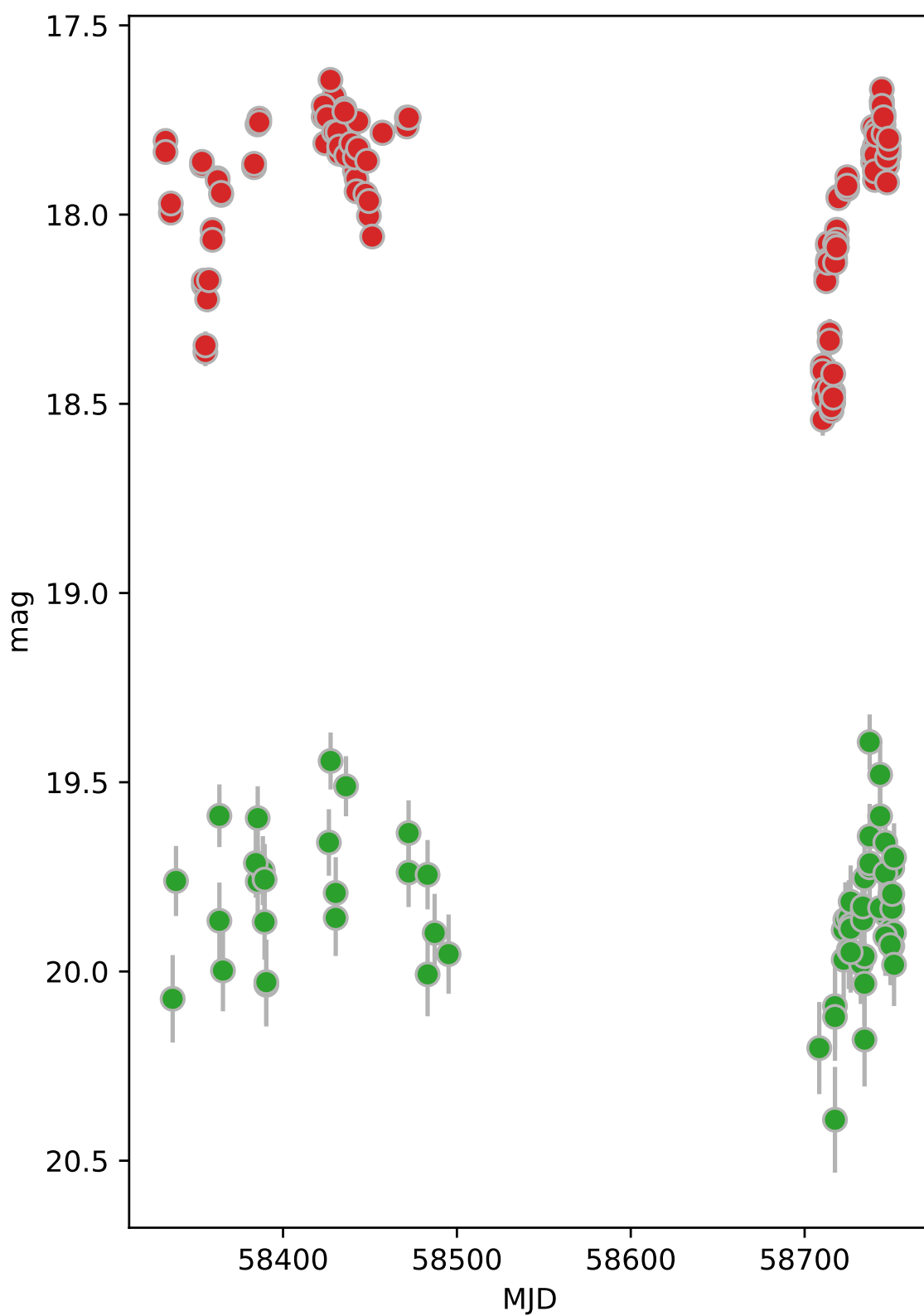


Рисунок 3.16 – Кривая блеска объекта 1811213400003515 II класса
идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

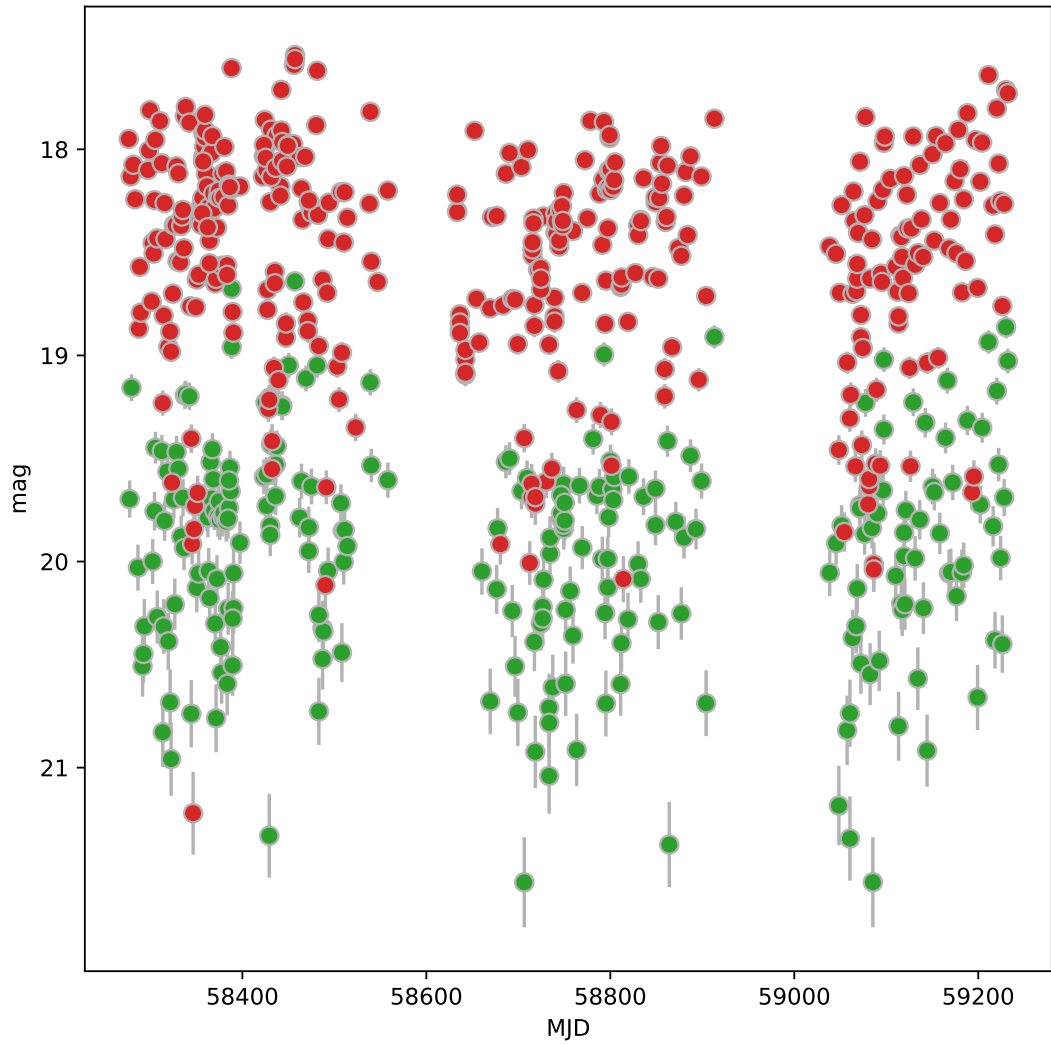


Рисунок 3.17 – Кривая блеска объекта 808205200035168 II класса идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

16. 808205200035168 – Класс II YSO / CTTS

Объект 808205200035168 был классифицирован в [27] и VSX как YSO на расстоянии 1642 пк. На кривых блеска ZTF наблюдается неперриодическое уменьшение блеска с амплитудой до 2^m в г и g (см.рисунок 3.17). Нами звезда классифицирована как CTTS.

17. 808105200024057 – Класс II YSO / CTTS

Объект 808105200024057 был классифицирован в 2MASS как кандидат в YSO

на расстоянии 3256.4 пк. В других каталогах объект не встречается. На кривых блеска ZTF, мы наблюдаем непериодические падения блеска с амплитудой до 1.0^m в полосах g и r (см.рисунок 3.18). Нами звезда классифицирована как CTTS.

18. 808105200008105 – Класс II YSO / CTTS

Объект был классифицирован как YSO в 2MASS и как YSO неизвестного типа в VSX. Объект показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 1.9^m в r и до 2.1^m в g (см.рисунок 3.19). Согласно Gaia DR2, он находится на расстоянии 3143 пк. Нами звезда классифицирована как CTTS.

19. 808105200000385 – SR звезда поля

Объект классифицируется как YSO III класса на расстоянии 2843 пк. Он упоминается в VSX как полуправильная гигантская звезда. Объект показывает полуправильные колебания блеска с амплитудой менее 0.5^m (см.рисунок 3.20).

20. 808105200013634 – SR звезда поля

По цветам AllWISE объект классифицируется как YSO III класса. Наблюдаются полуправильные колебания блеска с амплитудой до 1^m и характерным временем ~ 100 дней (см.рисунок 3.21). Звезда классифицируется как гигантская звезда в ZTF [25] на расстоянии 6287 пк. Нами звезда классифицирована как полуправильная пульсирующая переменная.

21. 808105200012893 – SR звезда поля

По цветам AllWISE объект классифицируется как YSO III класса. В ZTF – как полурегулярная переменная гигантская звезда на расстоянии 5309 пк. Объект показывает полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.5^m и характерным временем ~ 100 дней (см. рисунок 3.22). Нами звезда классифицирована как полуправильная пульсирующая переменная.

22. 808105200009572 – SR звезда поля

По цветам AllWISE объект классифицируется как YSO III класса. Объект находится на расстоянии 4738 пк. В ZTF и VSX классифицируется как полуправильная

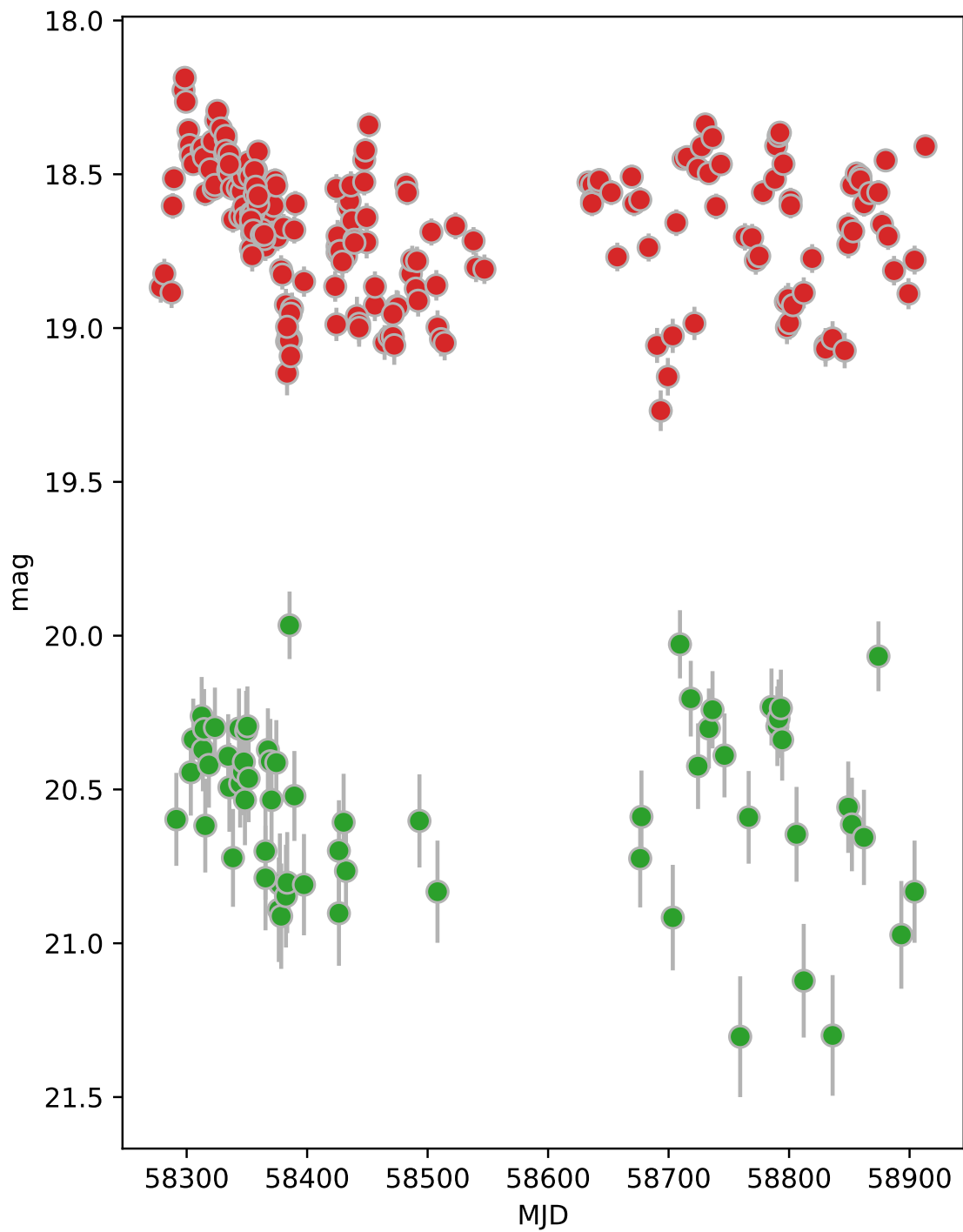


Рисунок 3.18 – Кривая блеска объекта 808105200024057 II класса
идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

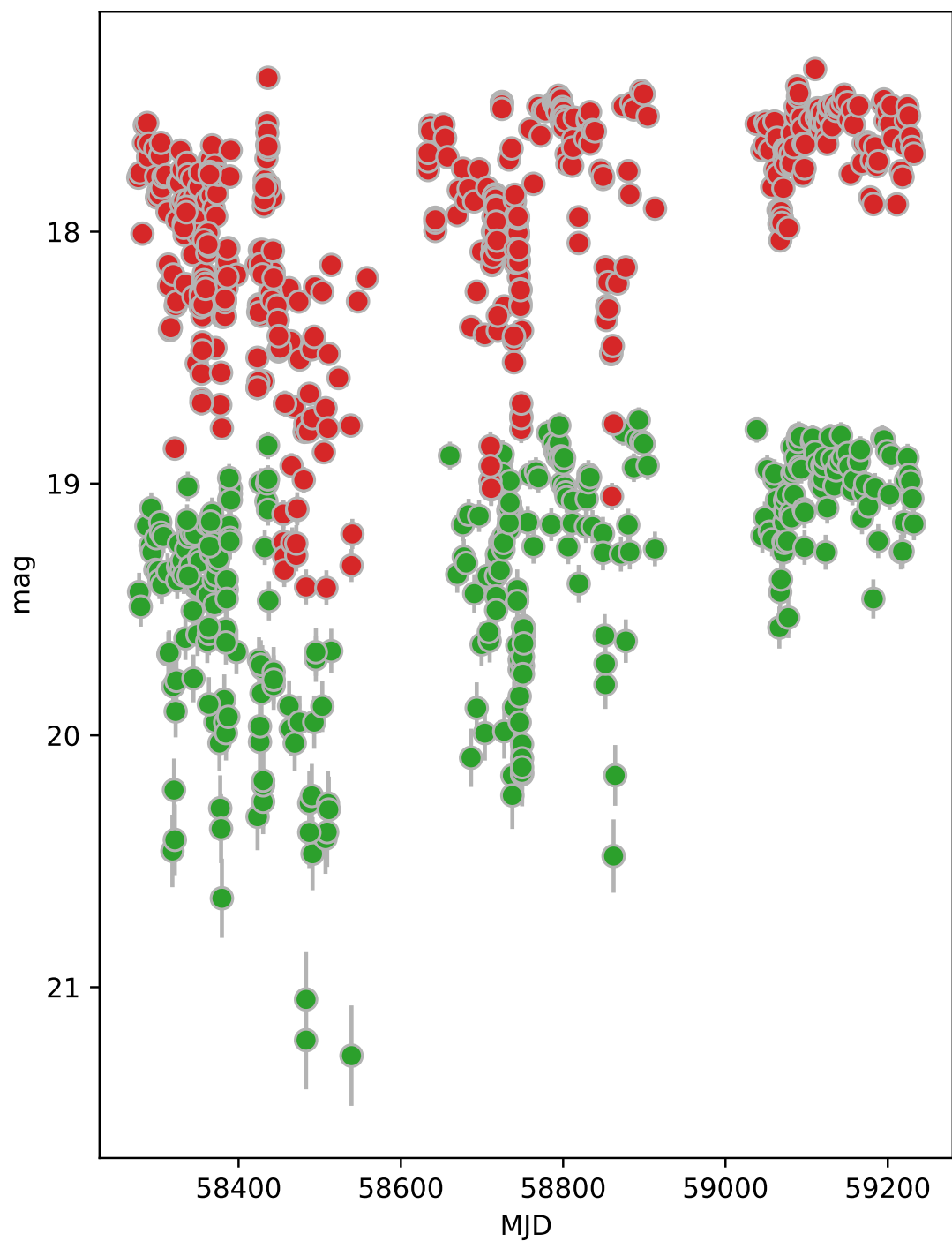


Рисунок 3.19 – Кривая блеска объекта 808105200008105 II класса идентифицированная нами как CTTS по данным ZTF

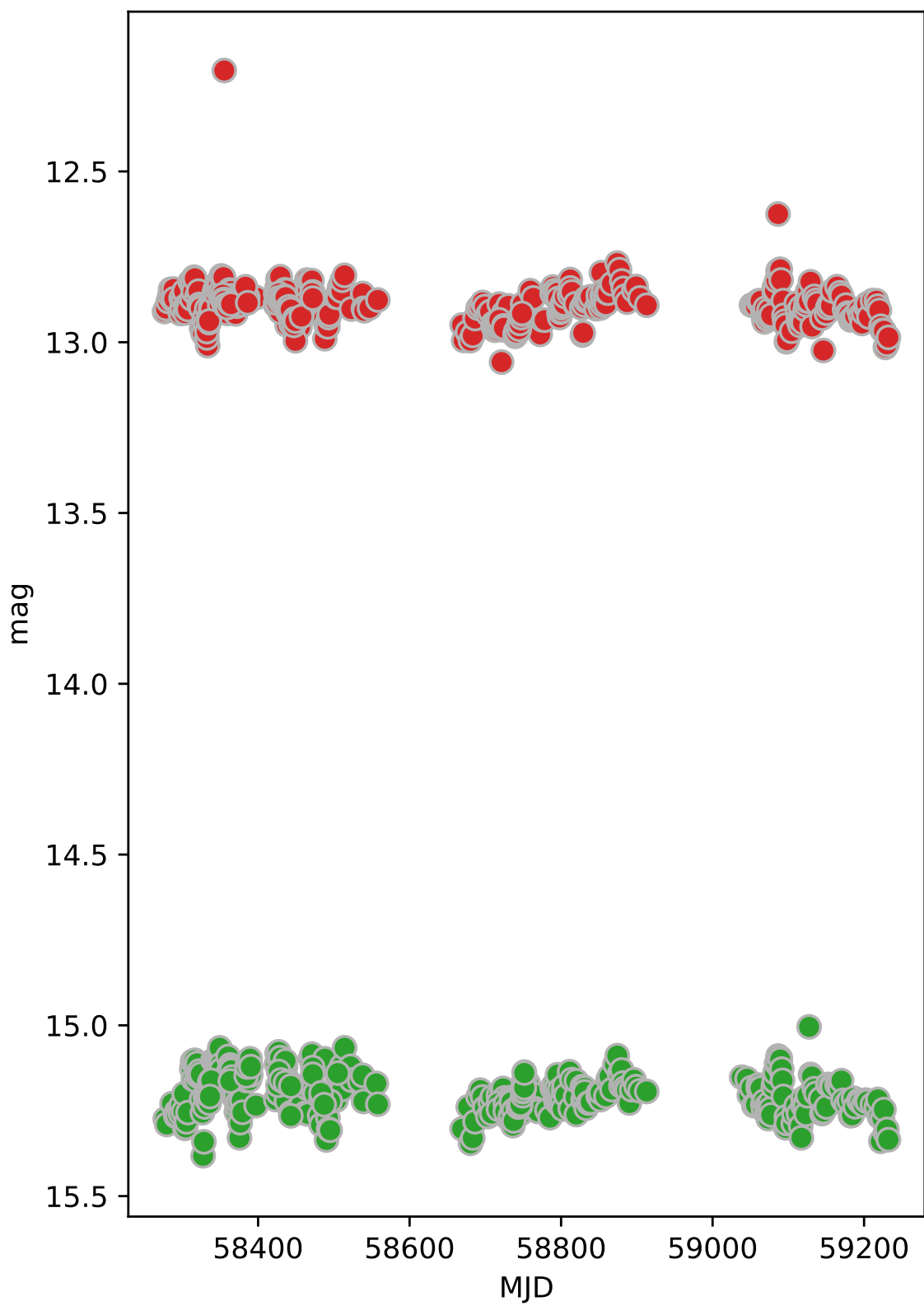


Рисунок 3.20 – Кривая блеска объекта 808105200000385 III класса
идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

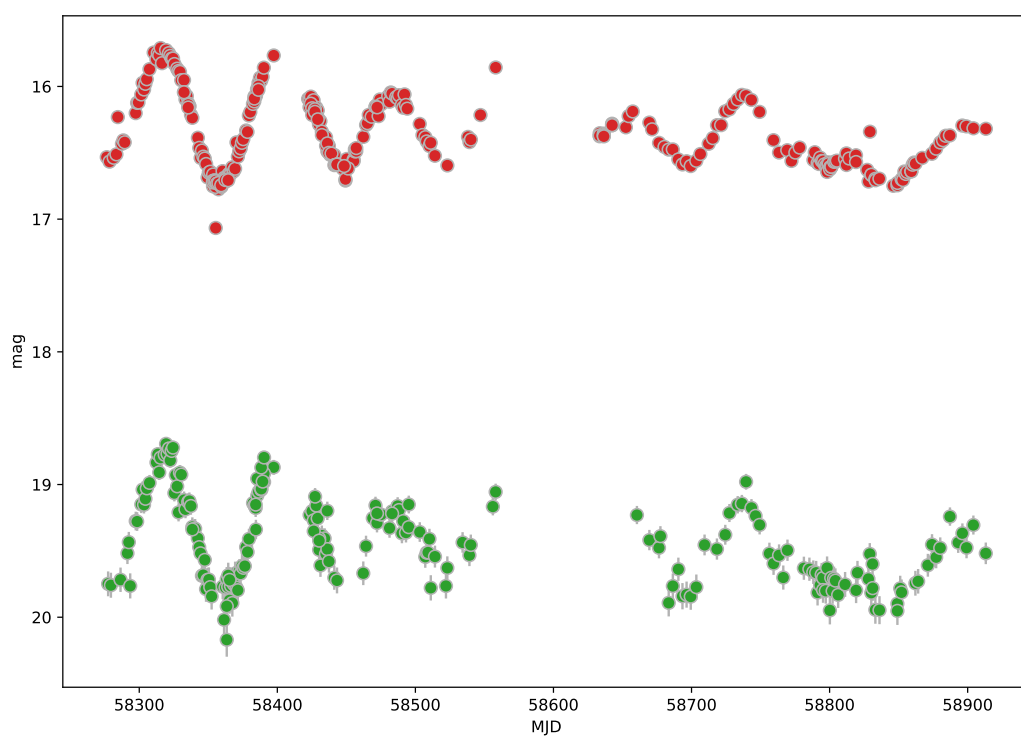


Рисунок 3.21 – Кривая блеска объекта 808105200013634 III класса идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

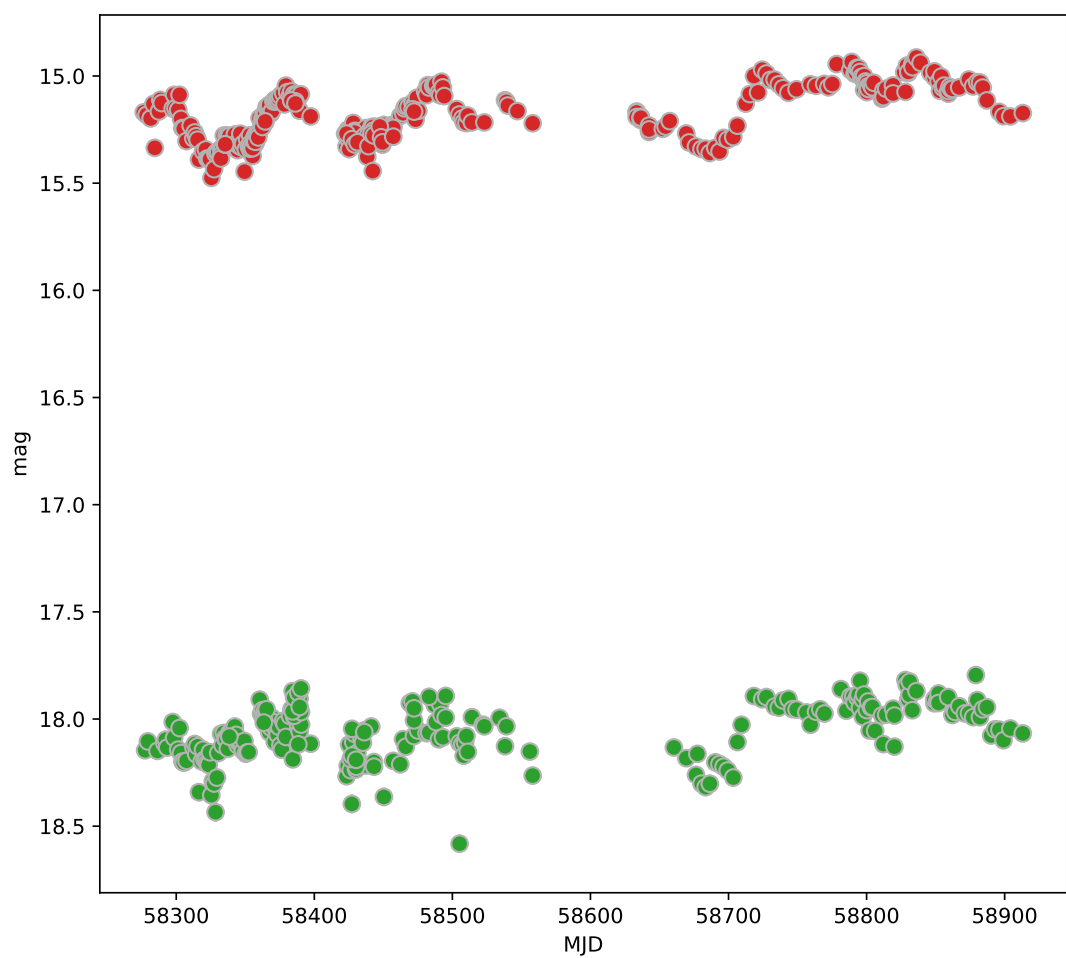


Рисунок 3.22 – Кривая блеска объекта 808105200012893 III класса
идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

переменная звезда-гигант. Наблюдается полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.25^m и характерным временем ~ 100 дней (см. рисунок 3.23). Нами звезда классифицирована как поуправильная переменная.

23. 808105200010147 – EB звезда поля

По цветам AllWISE объект классифицируется как YSO III класса. Звезда расположена примерно на расстоянии 1631 пк. Классифицируется в каталоге 2MASS как YSO, в ZTF как затменная типа EW, которые представляют собой затмения с периодами обычно короче 1 дня и амплитудой 0.4^m в r и g (см. рисунок 3.24). Нами звезда классифицирована как затменная переменная.

24. 808105200015243 – SR звезда поля

Объект III класса был классифицирован как кандидат в YSO в 2MASS. Объект показывает полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.3^m и характерным временем ~ 100 дней (см. рисунок 3.25). Согласно Gaia DR2 он находится на расстоянии 3474 пк. Нами звезда классифицирована как полуправильная пульсирующая переменная.

25. 808105200005432 – SR звезда поля

Объект III класса был классифицирован как переменная гигантская звезда в [28] и ZTF. Объект показывает полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.6 и характерным временем ~ 100 дней (см. рисунок 3.26). Он находится на расстоянии 1722 пк. Нами звезда классифицирована как полуправильная пульсирующая переменная звезда.

26. 808105200005687 – SR звезда поля

Звезда III класса показывает полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.158^m в r и до 0.3^m в g (см. рисунок 3.27). Звезда на расстоянии 4790 пк. Нами звезда классифицирована как полуправильная переменная.

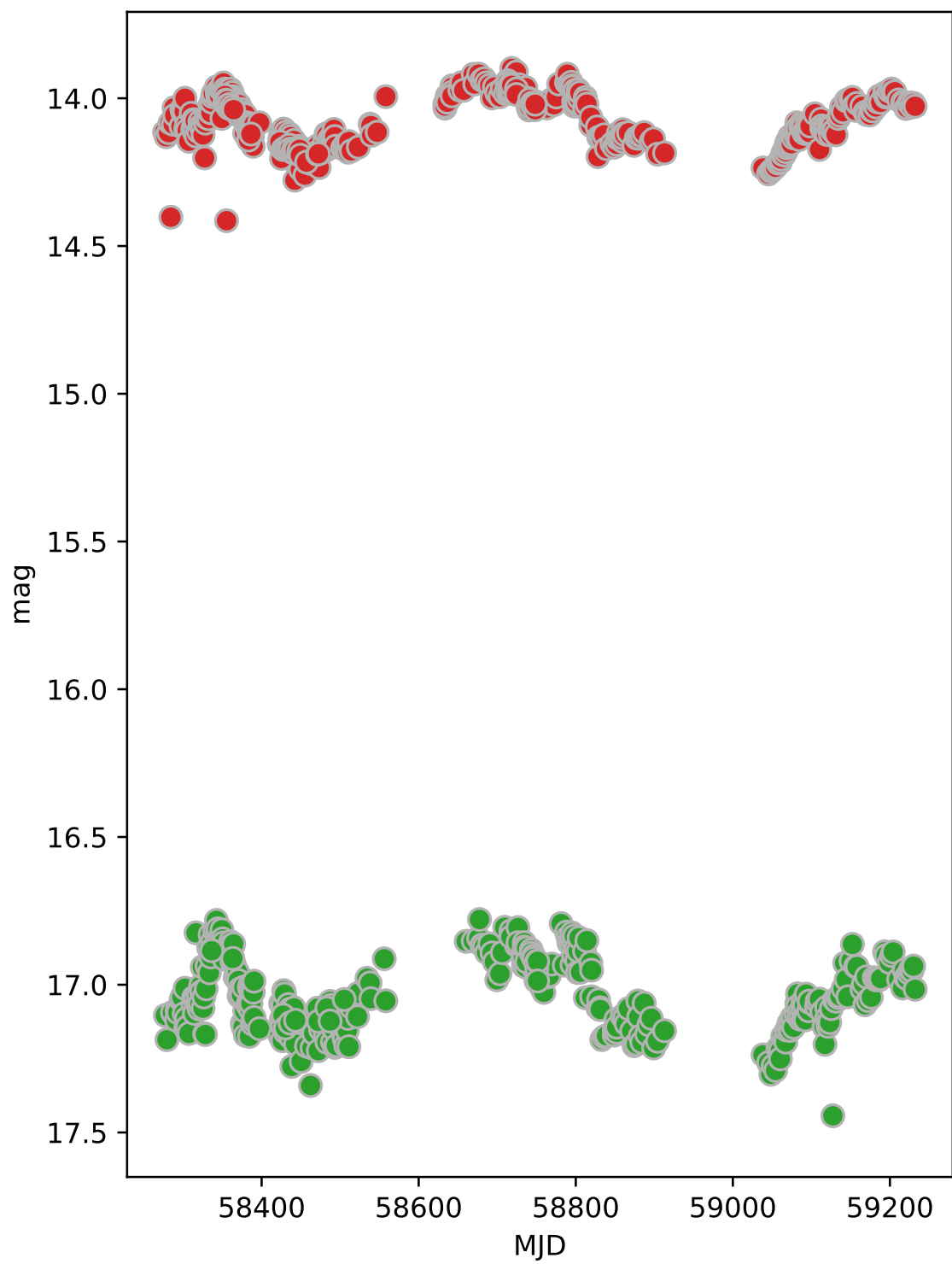


Рисунок 3.23 – Кривая блеска объекта 808105200009572 III класса идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

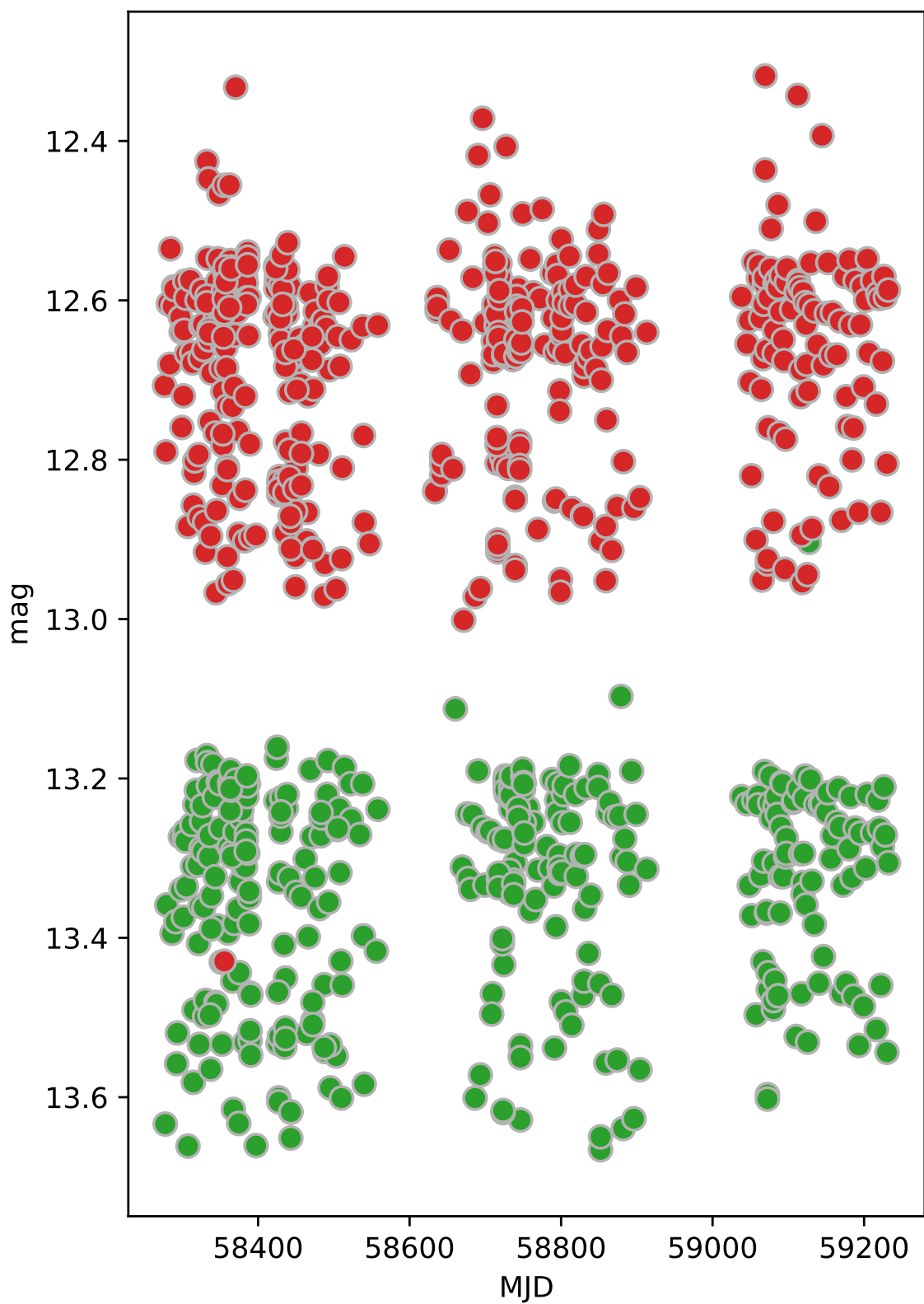


Рисунок 3.24 – Кривая блеска объекта 808105200010147 III класса
идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

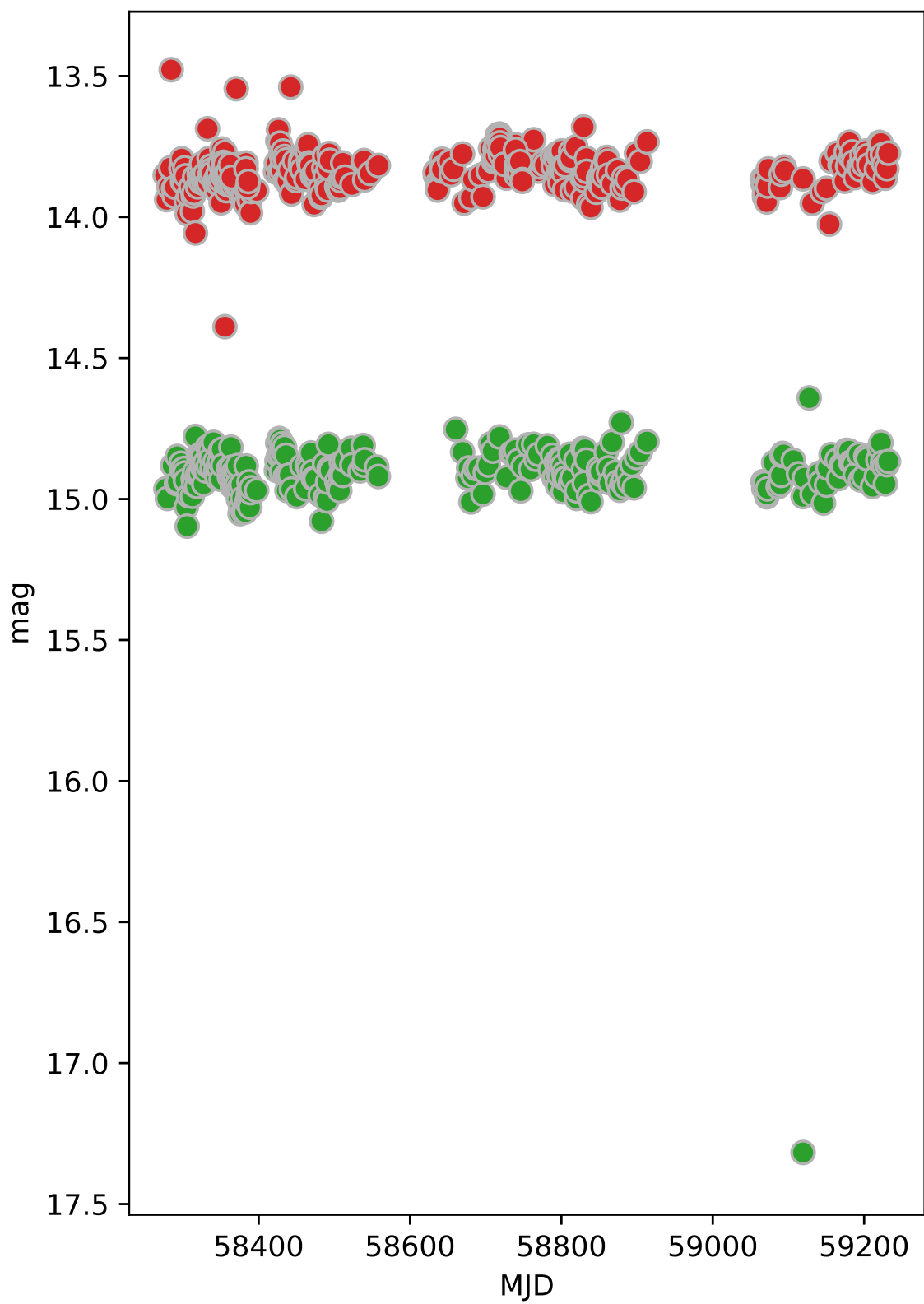


Рисунок 3.25 – Кривая блеска объекта 808105200015243 III класса
идентифицированная нами как звезда поля

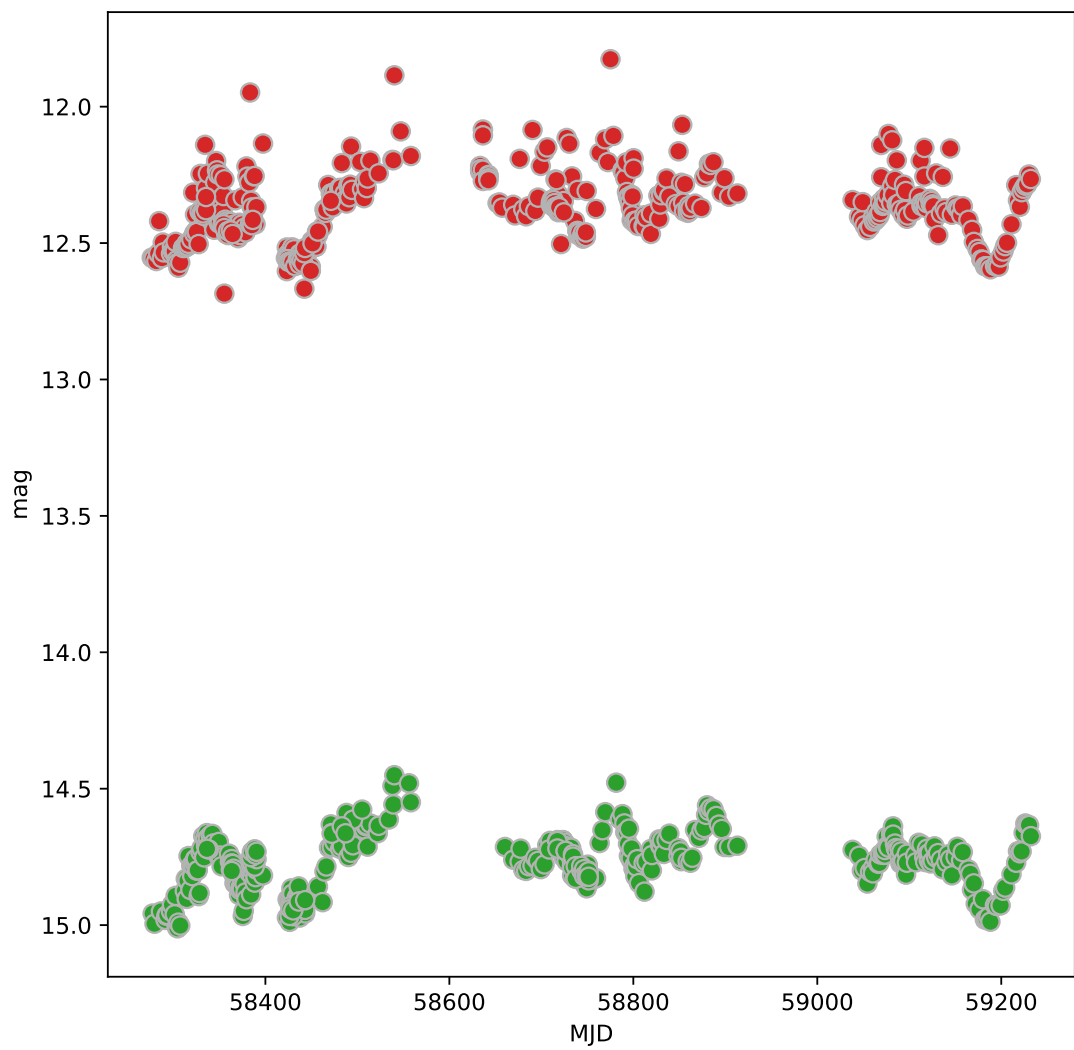


Рисунок 3.26 – Кривая блеска объекта 808105200005432 III класса идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

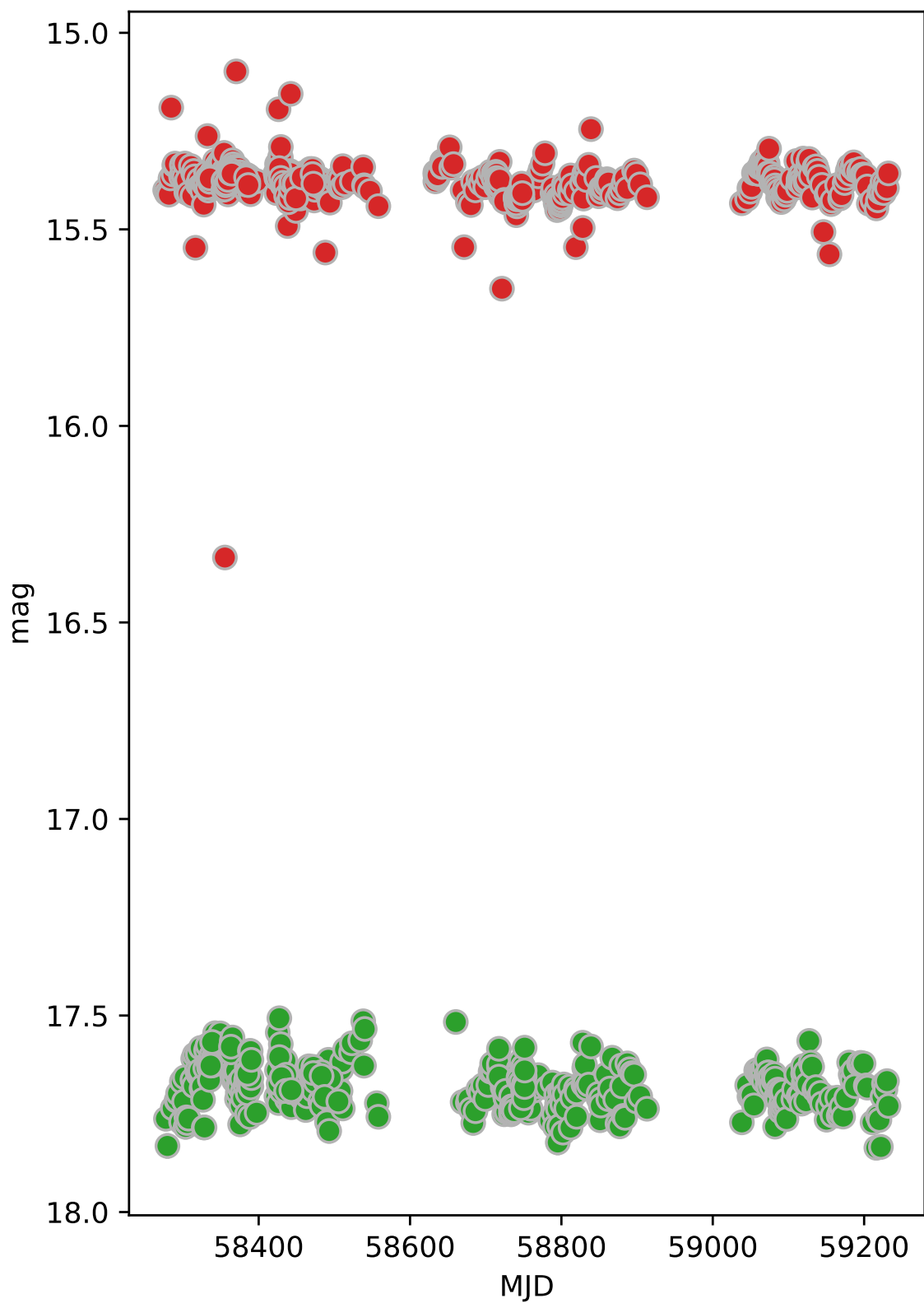


Рисунок 3.27 – Кривая блеска объекта 808105200005687 III класса
идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

27. 808105200035611 – SR звезда поля

Объект II класса 808105200035611 был классифицирован как источник инфракрасного излучения и как полуправильная переменная звезда-гигант в ZTF и VSX. Наблюдаются полуправильные колебания блеска с амплитудой до 1^m в г и до 1.1^m в g (см.рисунок 3.28). Звезда на расстоянии 5169 пк. Нами звезда классифицирована как полуправильная пульсирующая переменная.

28. 808105200028052 – SR звезда поля

Кривая блеска III класса объекта 808105200028052 показывает полуправильные колебания блеска с амплитудой до 0.185^m в г и до 0.3^m в g (см.рисунок 3.29). Расстояние до объекта 6038 пк. Нами звезда классифицирована как полуправильная переменная.

29. 808105200011528 – Класс III YSO / -

Объект показывает непериодические падения блеска с амплитудой до 0.3^m в г и до 0.5^m в g (см.рисунок 3.30). Он находится на расстоянии 3297 пк. Нами не удалось однозначно классифицировать этот объект, но мы предполагаем, что переменность вызвана пятенной активностью.

30. 808205200026935 – SR звезда поля

Объект III класса по AllWISE был классифицирован как полуправильная гигантская переменная звезда в ZTF[25]. Кривая блеска источника показывает полуправильные колебания блеска с амплитудой до 1^m и характерным временем ~ 100 дней (см.рисунок 3.31). Он находится на расстоянии 2003 пк. Нами звезда классифицирована как полуправильная переменная.

31. 808205300000608 – EW звезда поля

Объект II класса по AllWISE был классифицирован как YSO в 2MASS. Наблюдаются периодические синусообразные колебания блеска с периодом 0.8606 дня и амплитудой 0.4^m в г, мы классифицируем эту звезду как затменную переменную типа EW (см.рисунок 3.32).

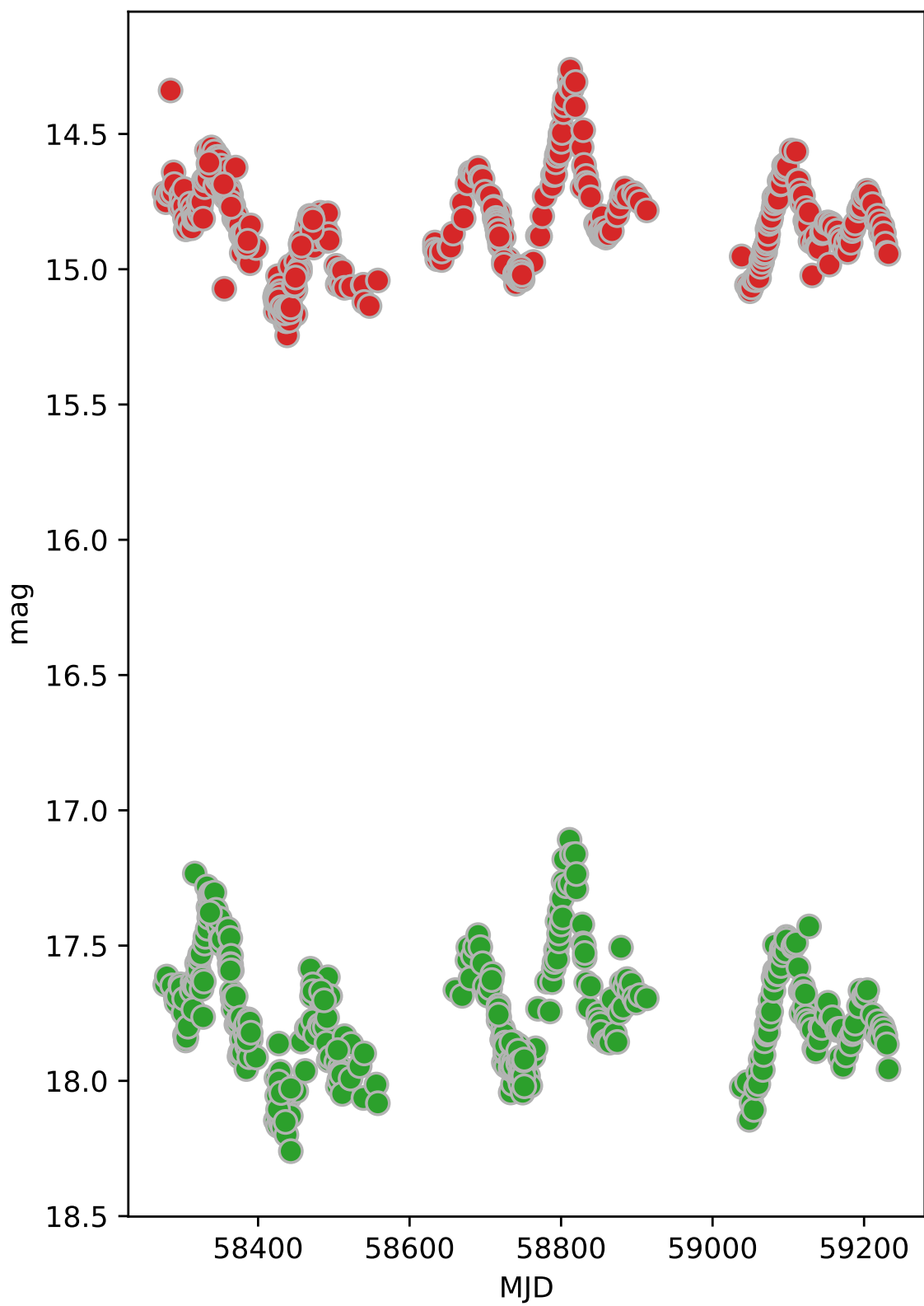


Рисунок 3.28 – Кривая блеска объекта 808105200035611 II класса
идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

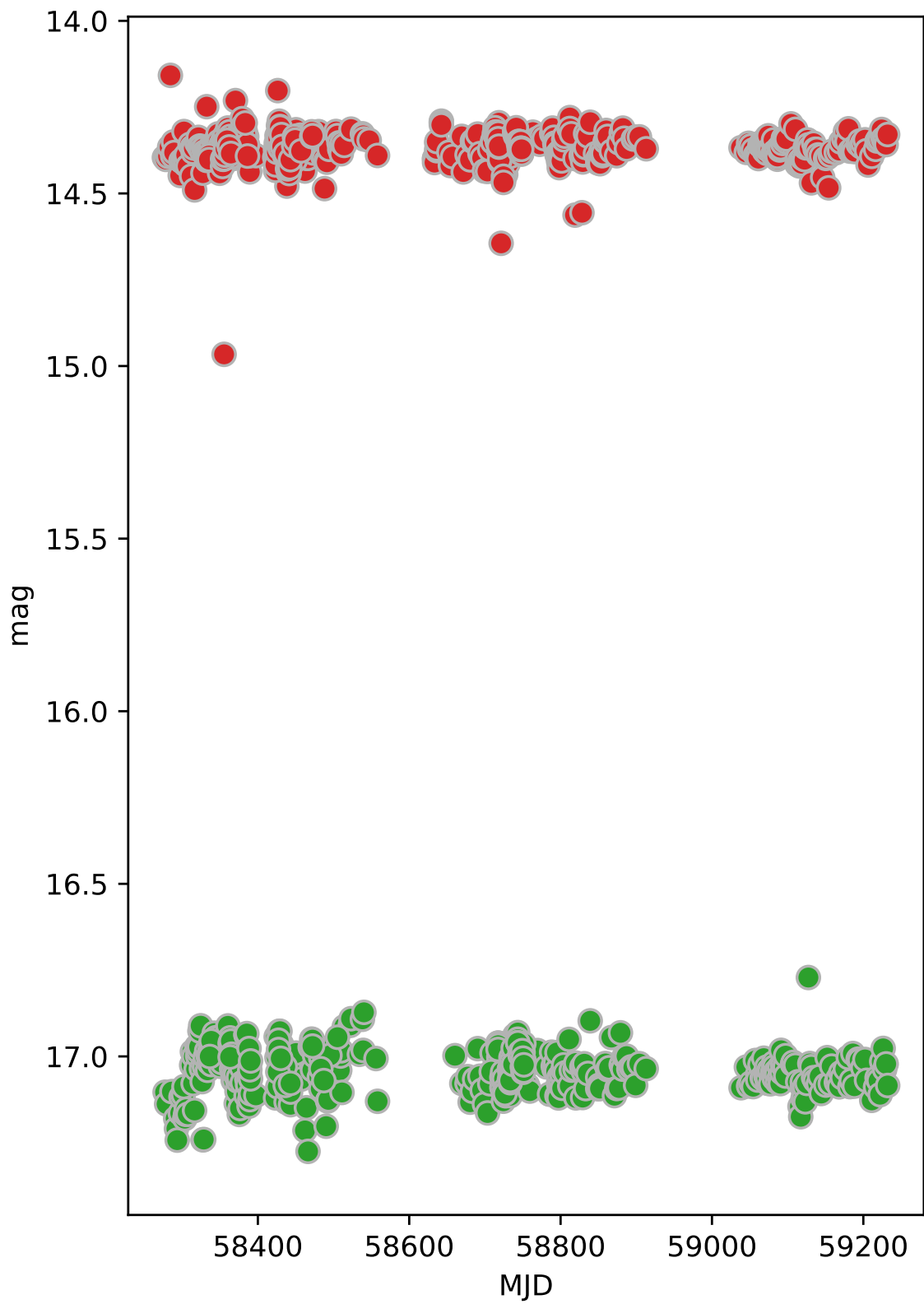


Рисунок 3.29 – Кривая блеска объекта 808105200028052 III класса
идентифицированная нами как звезда дальнего поля по данным ZTF

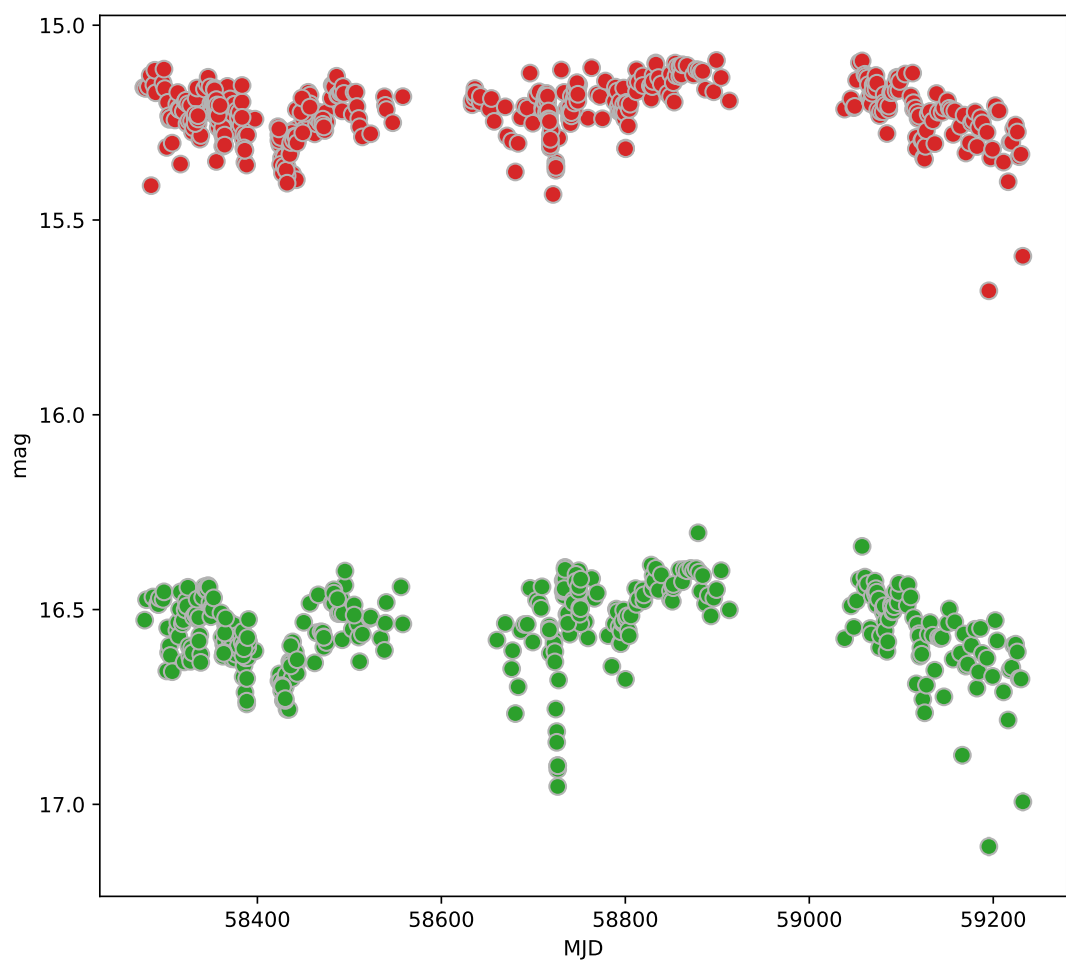


Рисунок 3.30 – Кривая блеска объекта 808105200011528 III класса по данным ALLWISE

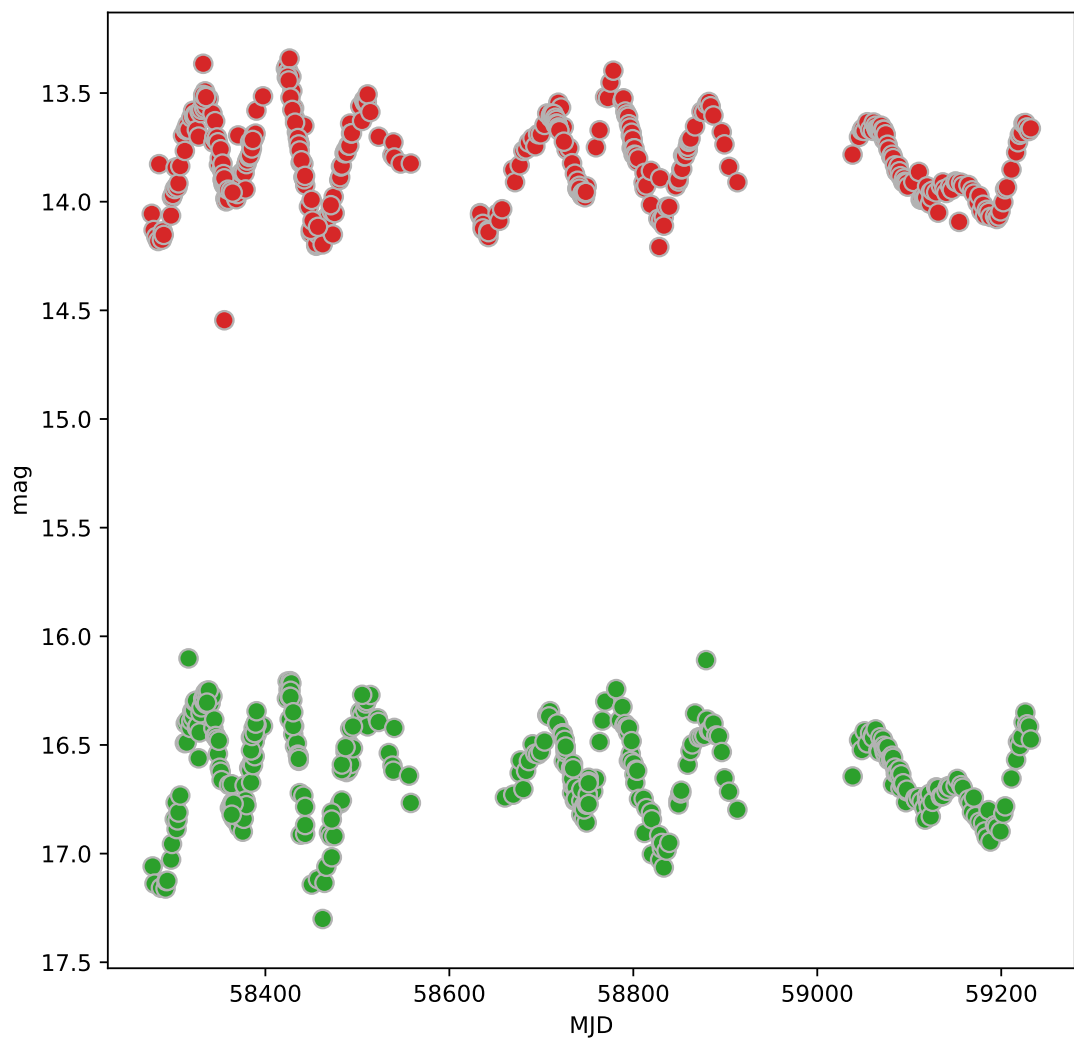


Рисунок 3.31 – Кривая блеска объекта 808205200026935 III класса
идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

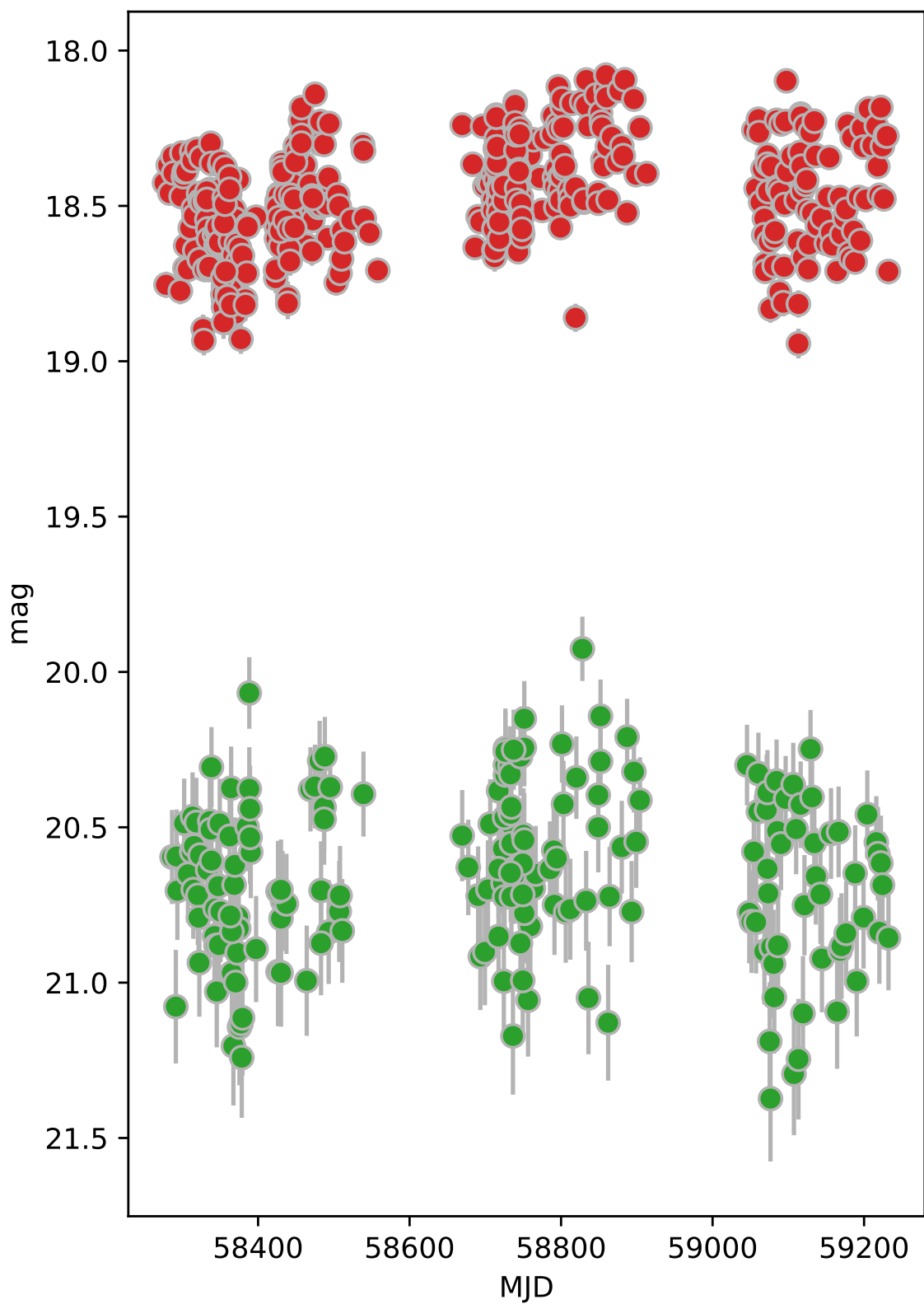


Рисунок 3.32 – Кривая блеска объекта 808205300000608 II класса
идентифицированная нами как затменная переменная типа EW

32. 808205200009380 – SR звезда поля

Объект III класса по AllWISE был классифицирован как полуправильная гигантская переменная звезда в ZTF[25] с полуправильными колебаниями блеска с амплитудой до 0.5^m и характерным временем ~ 100 дней (см. рисунок 3.33). Объект находится на расстоянии 1734 пк. Нами звезда классифицирована как полуправильная переменная.

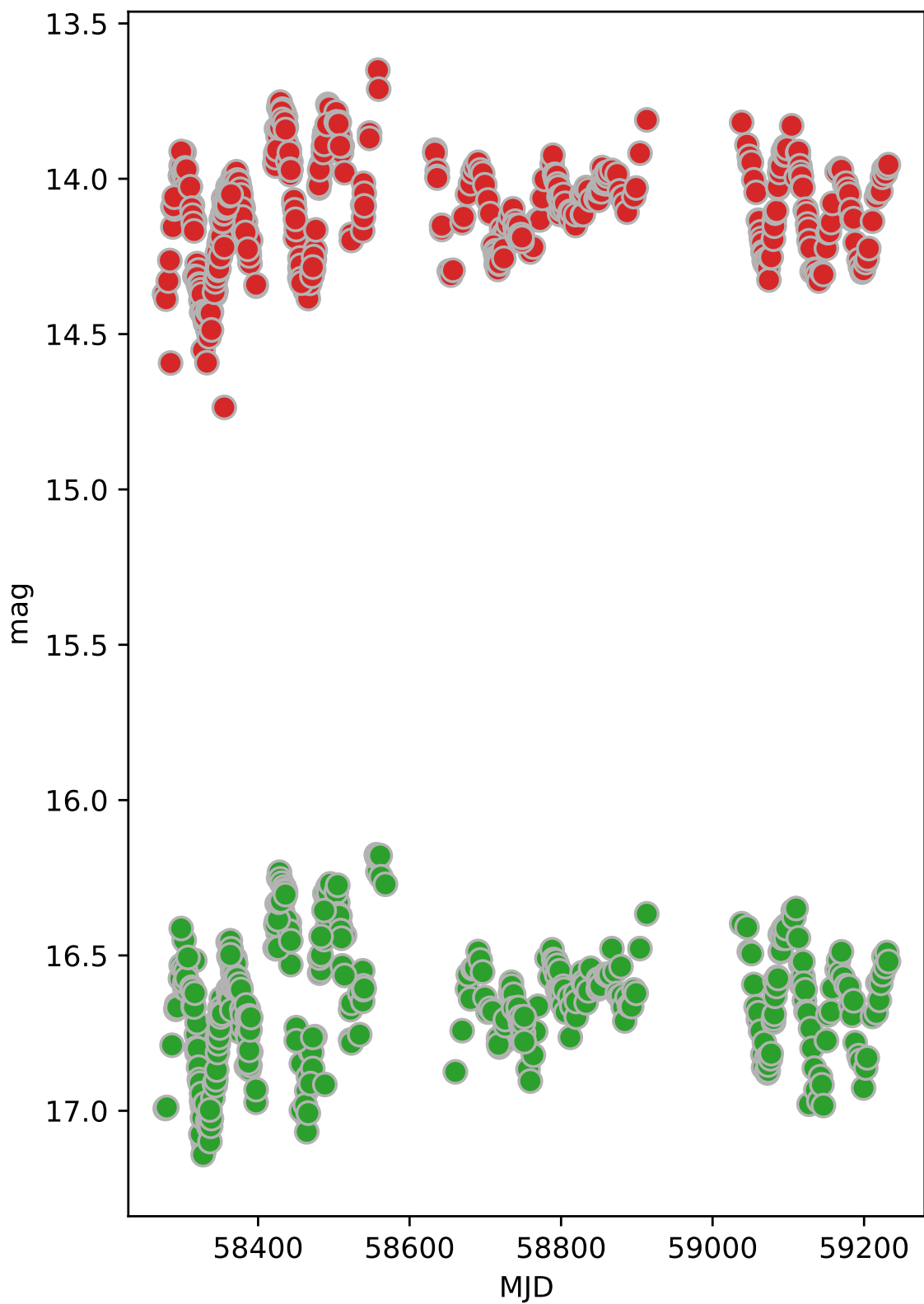


Рисунок 3.33 – Кривая блеска объекта 808205200009380 II класса
идентифицированная нами как звезда поля по данным ZTF

3.4 Индексы переменности при идентификации VARYSO

Мы рассчитали различные индексы переменности упомянутые ранее в разделе 1.3 для каждой кривой блеска.

Цель использования различных типов индексов переменности состоит в том, чтобы повышать точность идентификации путем выявления различных моделей поведения переменности, наблюдаемые среди YSOs, именно у звезд Т-Тельца.

Мы использовали различные индексы Стетсона: J , K и L . Индекс S_J , который количественно определяет корреляцию переменности в двух (или более) полосах ZTF. Этот метод используется только при наличии наблюдения в двух полосах ZTF. Объекты с некоррелированной переменностью в разных полосах не будут идентифицированы этим методом. Мы не наблюдали такого поведения в нашей выборке. Индекс S_L обычно велик для ахроматических переменных источников и мал для неперемежных или хроматических переменных.

Мы также использовали индекс Уэлча-Стетсона (I), который устойчив к небольшому количеству искаженных наблюдений: одно наблюдение с необычно большой погрешностью фактически приводит к тому, что индекс приближается к немного меньшему значению, т. е. снижает вероятность того, что звезда будет помечена как переменная. Он используется для поиска медленных непериодических изменений блеска но не используется в качестве основного метода обнаружения переменности.

Мы также использовали индексы на основе разброса, такие как: критерий хи-квадрат (χ^2), σ_w (взвешенное стандартное отклонение), MAD, RoMS и нормированная избыточная дисперсия σ_{NXS} .

Критерий хи-квадрат дает возможность выявления VARYSO которые наблюдались в одной полосе ZTF ($z_{g'}$ или $z_{r'}$). MAD в основном нечувствителен к выбросам, и мы не хотели, чтобы результаты зависели от того, какой алгоритм использовался для обнаружения и отклонения выбросов. RoMS используется для исследования переменности с низкой амплитудой. σ_{NXS} используется для источников с различной амплитудой переменности.

Мы также рассчитали ν (переменность от пика к пику), поскольку некоторые кривые блеска содержат небольшое количество наблюдений.

Мы использовали индексы на основе корреляции: автокорреляция ($lag1$) и индекс фон-Неймана (η). η используется для проверки того, являются ли последовательные точки данных независимыми или нет. Это означает проверить, существуют ли какие-либо тренды в данных. Если существует положительная серийная корреляция, η относительно мало. С другой стороны, если существует отрицательная серийная корреляция – η велико. Неперемежные показывают большие значения фон Неймана поскольку у них нет сильной положительной автокорреляции.

3.5 Алгоритм тестирования индексов переменности

Распределения значений индексов для переменных и не переменных объектов пересекаются. Нет никаких ограничений на возможную амплитуду переменности. В этой работе выбор VARYSO на основе индекса переменности сопровождался визуальным осмотром кривых блеска.

Мы проверили поведение индексов переменности как на описанной выше выборке из 32 переменных звезд (см.раздел 3.3), так и на основной выборке из 268 YSOs. Мы следовали следующему алгоритму для интерпретации результатов, которые мы получали от индексов переменности, представленных в разделе 3.4.

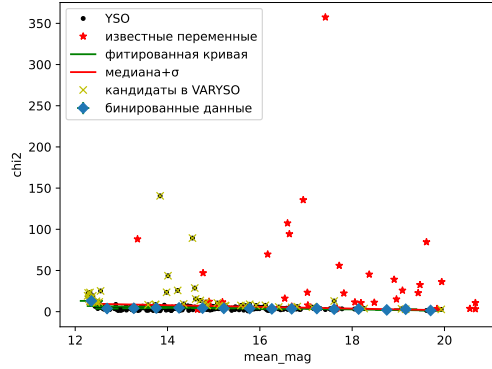
Для идентификации VARYSO на основе результатов, полученных при применении индексов переменности, мы использовали следующий алгоритм позволяющий отличить кандидаты в VARYSO от непостоянных объектов и объектов с искаженной фотометрией.

На каждом графике зависимости индекса (A) от средней звездной величины ($\text{mean_mag} - A$), вычисляем медиану для каждой группы значений индекса в бине по звездной величине шириной 0.5. Для каждой группы звездной величины в интервале 0.5 вычисляем статистику с $\sigma_{clipping}$ (см.рисунки 3.34, 3.35 и 3.36, 3.37 и 3.38). Точки за пределом $\sigma_{clipping} = 3$, выбрасываются при вычислении.

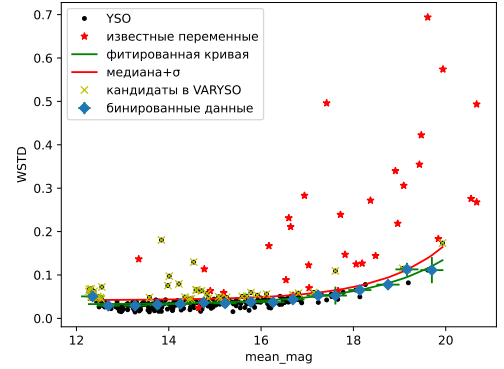
На рисунки 3.34, 3.35, 3.36, 3.37 и 3.38: черные точки представляют 268 YSOs в IC 1805, выборка сравнения из 33 переменных объектов отмечена красными ' \star ', красная кривая представляет собой нижний предел (медиана + σ) для индекса для данной величины. Объекты над красной кривой являются кандидатами в VARYSO.

Для объектов, наблюдаемых в одном и двух фильтрах, считаем кандидатами в VARYSO, если они выше нижнего предела (медиана + σ) по (6-8) индексам среди : χ^2 , σ_w , $ROMs$, MAD η , $lag1$, σ_{NXS} , и v .

Объекты, наблюдаемые в двух фильтрах, с высокой вероятностью считаем кандидатами в VARYSO, если они выше нижнего предела (медиана + σ) по индексам: S_J, S_K, S_L , и I .

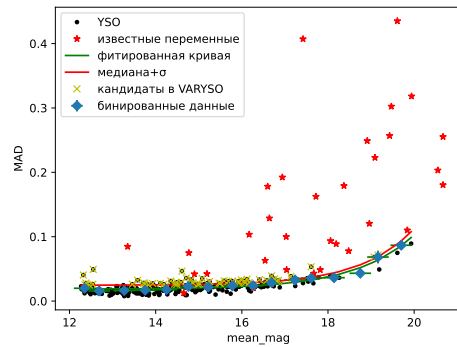


(a)

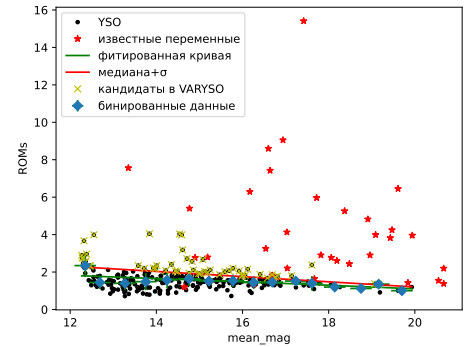


(b)

Рисунок 3.34 – Индексы переменности χ^2 (chi2) (a) и σ_w (WSTD)(b) в зависимости от средней звездной величины для YSO в IC 1805. Черные точки представляют 268 YSOs в IC 1805. Ранее известные переменные звезды отмечены красным ' \star '. Зеленая кривая соответствует среднему значению для каждого индекса. Красная кривая представляет собой нижний предел (медиана + σ) для χ^2 и σ_w для данной величины, чтобы считаться кандидатом в VARYSO. Кандидаты в VARYSO отмечены желтым

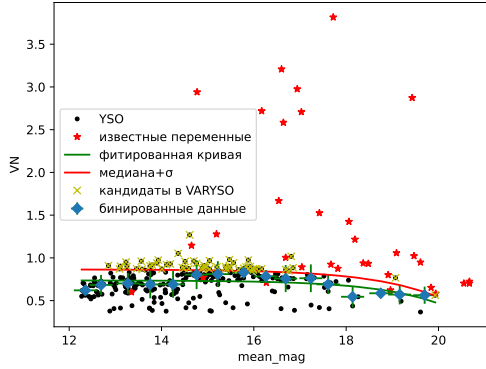


(a)

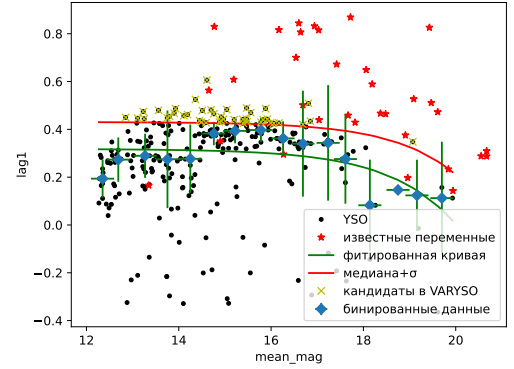


(b)

Рисунок 3.35 – Индексы переменности MAD (a) и $ROMs$ (b) в зависимости от средней звездной величины для YSO в IC 1805. Черные точки представляют 268 YSOs в IC 1805. Ранее известные переменные звезды отмечены красным ' \star '. Зеленая кривая соответствует среднему значению для каждого индекса. Красная кривая представляет собой нижний предел (медиана + σ) для MAD и $ROMs$ для данной величины, чтобы считаться кандидатом в VARYSO. Кандидаты в VARYSO отмечены желтым

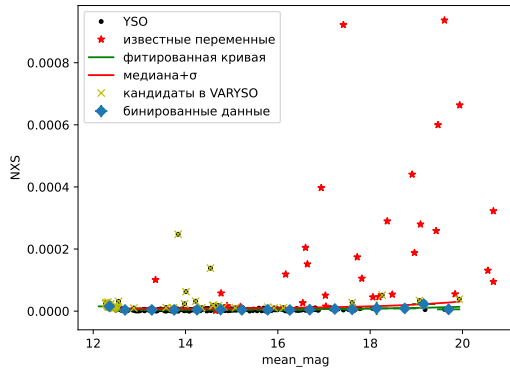


(a)

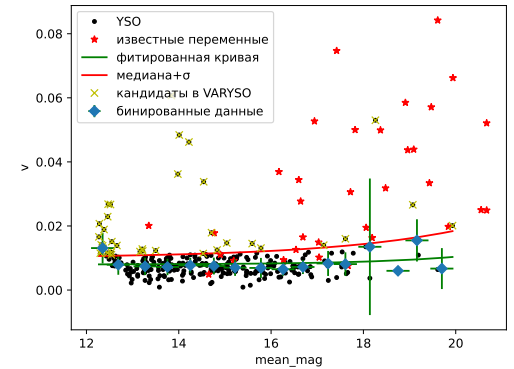


(b)

Рисунок 3.36 – Индексы переменности η (VN) (a) и $lag1$ (b) в зависимости от средней звездной величины для YSO в IC 1805. Черные точки представляют 268 YSOs в IC 1805. Ранее известные переменные звезды отмечены красным ' \star '. Зеленая кривая соответствует среднему значению для каждого индекса. Красная кривая представляет собой нижний предел (медиана + σ) для η (VN) и $lag1$ для данной величины, чтобы считаться кандидатом в VARYSO. Кандидаты в VARYSO отмечены желтым

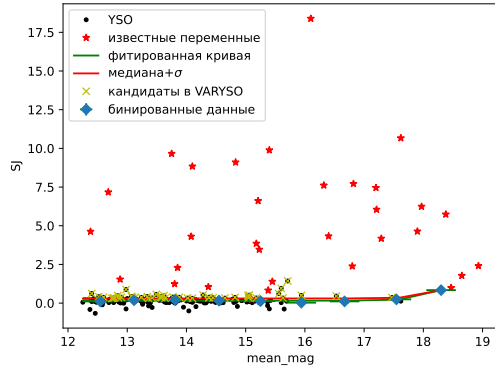


(a)

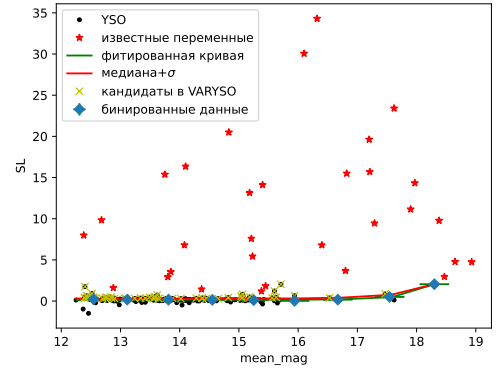


(b)

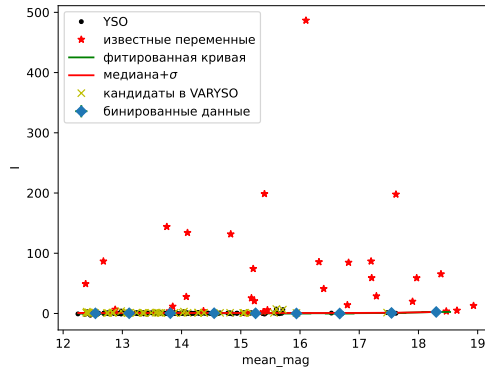
Рисунок 3.37 – Индексы переменности σ_{NXS} (NXS) (a) и v (P2P) (b) в зависимости от средней звездной величины для YSOs в IC 1805. Черные точки представляют 268 YSOs в IC 1805. Ранее известные переменные звезды отмечены красным ' \star '. Зеленая кривая соответствует среднему значению для каждого индекса. Красная кривая представляет собой нижний предел (медиана + σ) для σ_{NXS} и v для данной величины, чтобы считаться кандидатом в VARYSO. Кандидаты в VARYSO отмечены желтым



(a)



(b)



(c)

Рисунок 3.38 – Индексы переменности S_J (a), S_L (b) (индексы Стетсона), и I (c) (индекс Уэлча-Стетсона) в зависимости от средней звездной величины для YSOs в IC 1805. Черные точки представляют 268 YSOs в IC 1805. Ранее известные переменные звезды отмечены красным \star . Зеленая кривая соответствует среднему значению для каждого индекса. Красная кривая представляет собой нижний предел (медиана + σ) для S_J, S_L , и I для данной величины, чтобы считаться кандидатом в VARYSO.

Кандидаты в VARYSO отмечены желтым

3.6 Классификация кандидаты в VARYSO

Мы классифицировали 9 объектов, наблюдаемых в двух фильтрах как кандидаты в VARYSO. Мы проверили эти объекты визуально и заметили низкоамплитудное изменение блеска.

1. 808105200012059 – Класс III YSO

Объект 808105200012059 был ранее классифицирован как YSO в 2MASS и как DSCT (Переменная звезда типа Дельты Щита) в ZTF и VSX. Он показывает низкоамплитудное изменение блеска с амплитудой около 0.057^m в полосе g и 0.030^m в r (см.рисунок 3.39). Согласно Gaia DR3, этот объект находится на расстоянии приблизительно 2148 пк. Наша классификация – DSCT.

2. 808105200013046 – Класс II YSO

Объект 808105200013046 был ранее классифицирован как кандидата в YSO в 2MASS [23]. Он показывает низкоамплитудное изменение блеска (см.рисунок 3.40). Согласно Gaia DR3, этот объект находится на расстоянии приблизительно 2025 пк. Наша классификация – CTTS.

3. 808105200042118 – Класс II YSO

Объект 808105200042118 был ранее классифицирован как YSO в 2MASS. Он показывает неперiodические изменения блеска (см.рисунок 3.41). Осмотр в SNAD-ZTF показал, что наблюдаемая перменность связана с тем, что звезда визуально-двойная и изменения качества изображения приводят к ошибкам фотометрии.

4. 808105200015848 – Класс III YSO

Объект 808105200015848 был ранее классифицирован как кандидата в YSO в 2MASS [23]. Он показывает неперiodические изменения блеска (см.рисунок 3.42). Согласно Gaia DR3, этот объект находится на расстоянии приблизительно 1811 пк. Наша классификация – CTTS.

5. 808105200014922 – Класс III YSO

Объект 808105200014922 показывает неперiodические изменения блеска (см.рисунок 3.43). Согласно Gaia DR3, этот объект находится на расстоянии приблизительно 662 пк. Объект находится на краю линейного диапазона приемника. Вероятнее всего, что наблюдаемая перменность не физическая.

6. 808105200014448 – Класс III YSO

Объект 808105200014448 был ранее классифицирован как YSO в 2MASS. Он показывает непериодические изменения блеска (см.рисунок 3.44). Согласно Gaia DR3, этот объект находится на расстоянии приблизительно 446 пк. Объект находится на краю линейного диапазона приемника. Вероятнее всего, что наблюдаемая переменность не физическая.

7. 808105200001434 – Класс II YSO

Объект 808105200001434 был ранее классифицирован как звезда в Simbad. Он показывает непериодические изменения блеска (см.рисунок 3.45). Согласно Gaia DR3, этот объект находится на расстоянии приблизительно 2190 пк. Наша классификация – CTTS.

8. 808105200003122 – Класс III YSO

Объект 808105200003122 показывает непериодические изменения блеска (см.рисунок 3.46). Согласно Gaia DR3, этот объект находится на расстоянии приблизительно 1622 пк. Объект находится на краю линейного диапазона приемника. Вероятнее всего, что наблюдаемая переменность не физическая.

9. 808105200007155 – Класс III YSO

Объект 808105200007155 показывает непериодические изменения блеска (см.рисунок 3.47). Согласно Gaia DR3, этот объект находится на расстоянии приблизительно 206.196 пк. Объект находится на краю линейного диапазона приемника. Вероятнее всего, что наблюдаемая переменность не физическая.

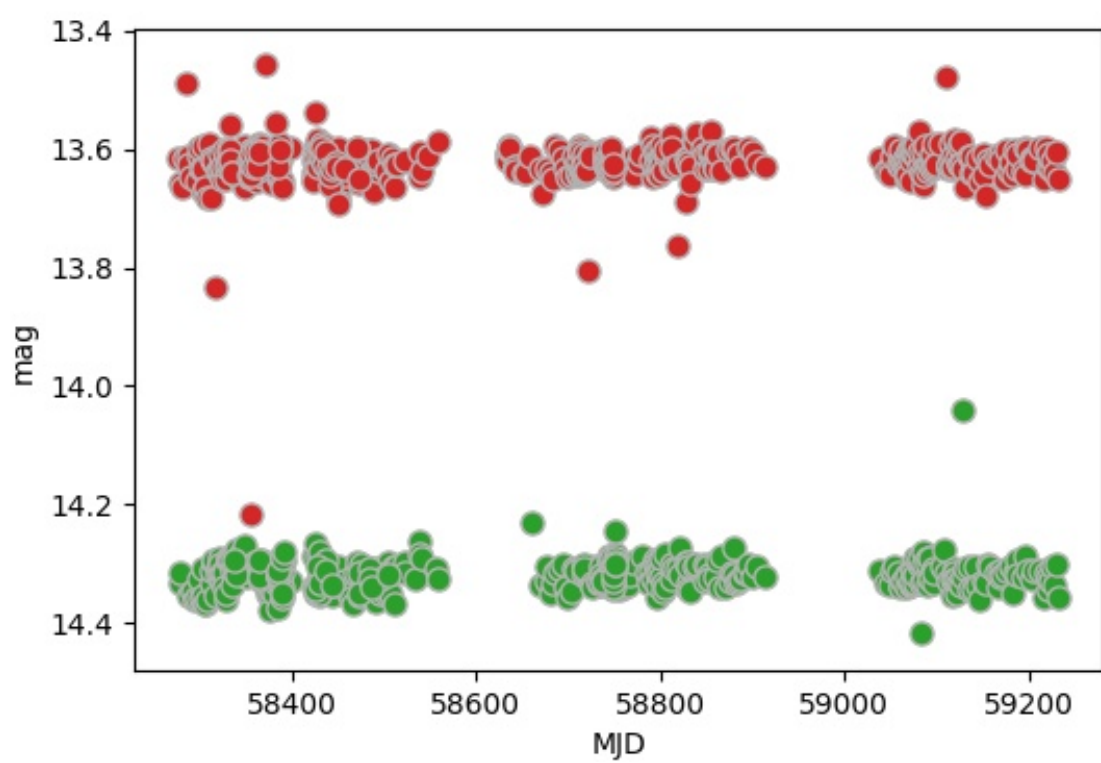


Рисунок 3.39 – Кривая блеска объекта 808105200012059 III класса идентифицированная нами как кандидата в VARYSO по индексам переменности

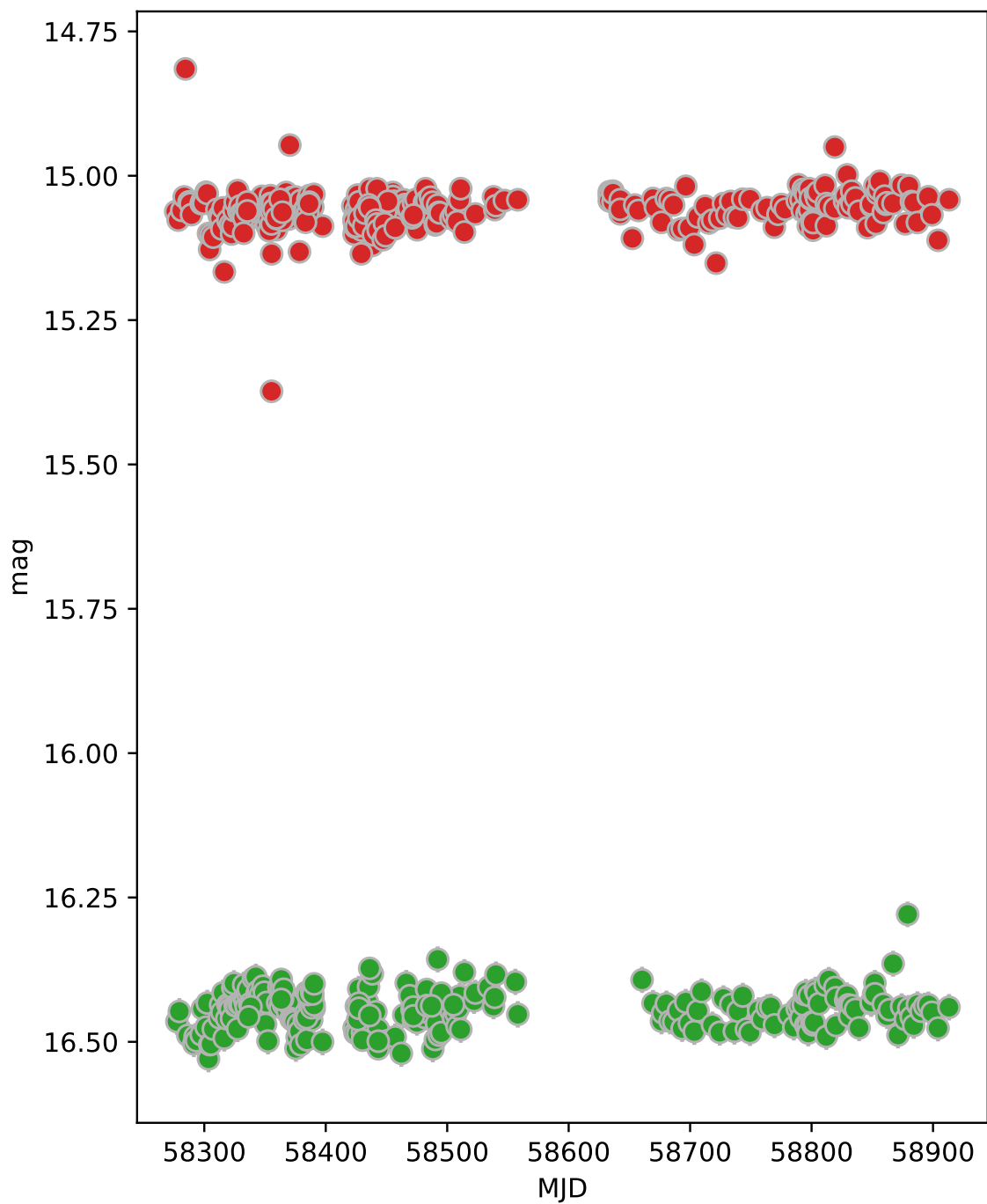


Рисунок 3.40 – Кривая блеска объекта 808105200013046 II класса идентифицированная нами как кандидата в VARYSO по индексам переменности

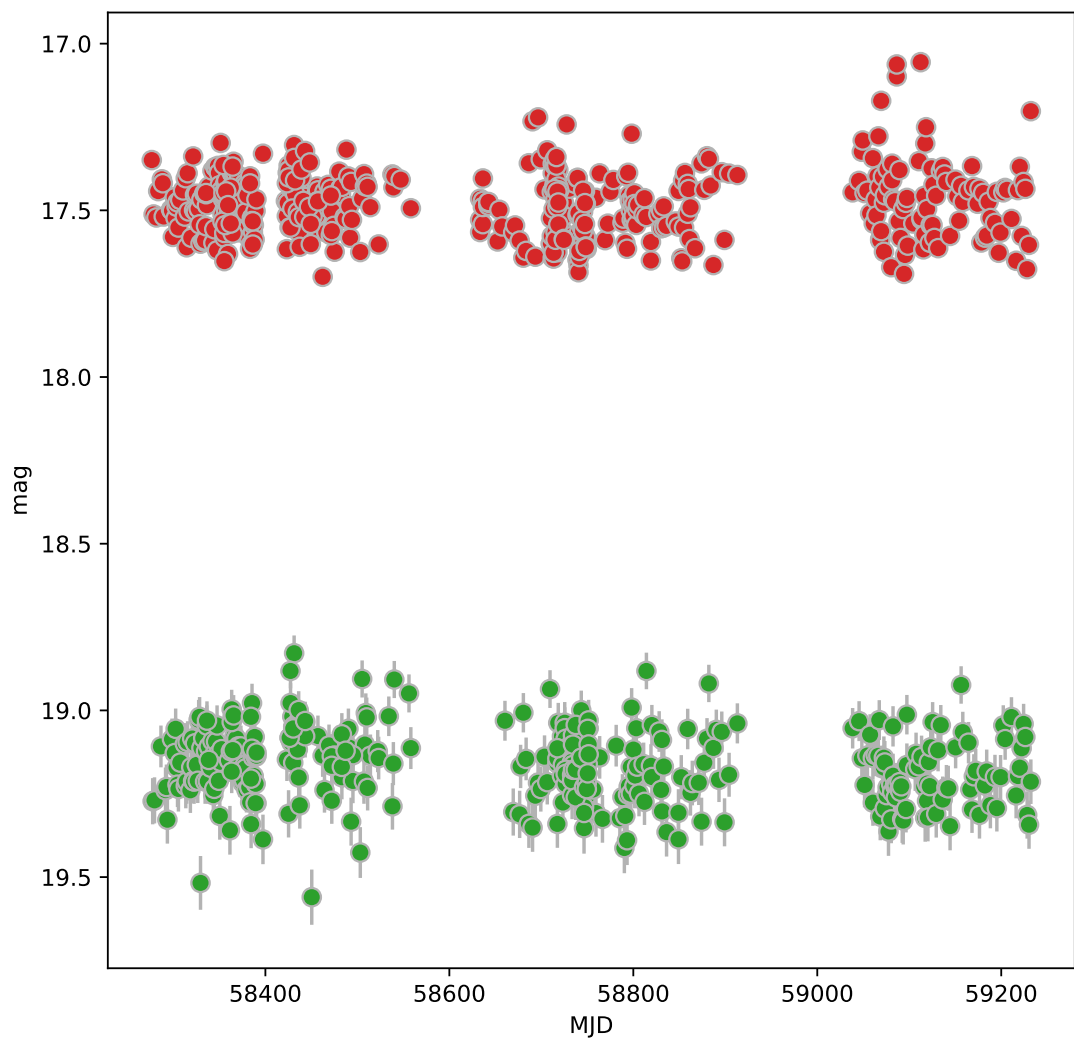


Рисунок 3.41 – Кривая блеска объекта 808105200042118 II класса
идентифицированная нами как кандидата в VARYSO по индексам переменности

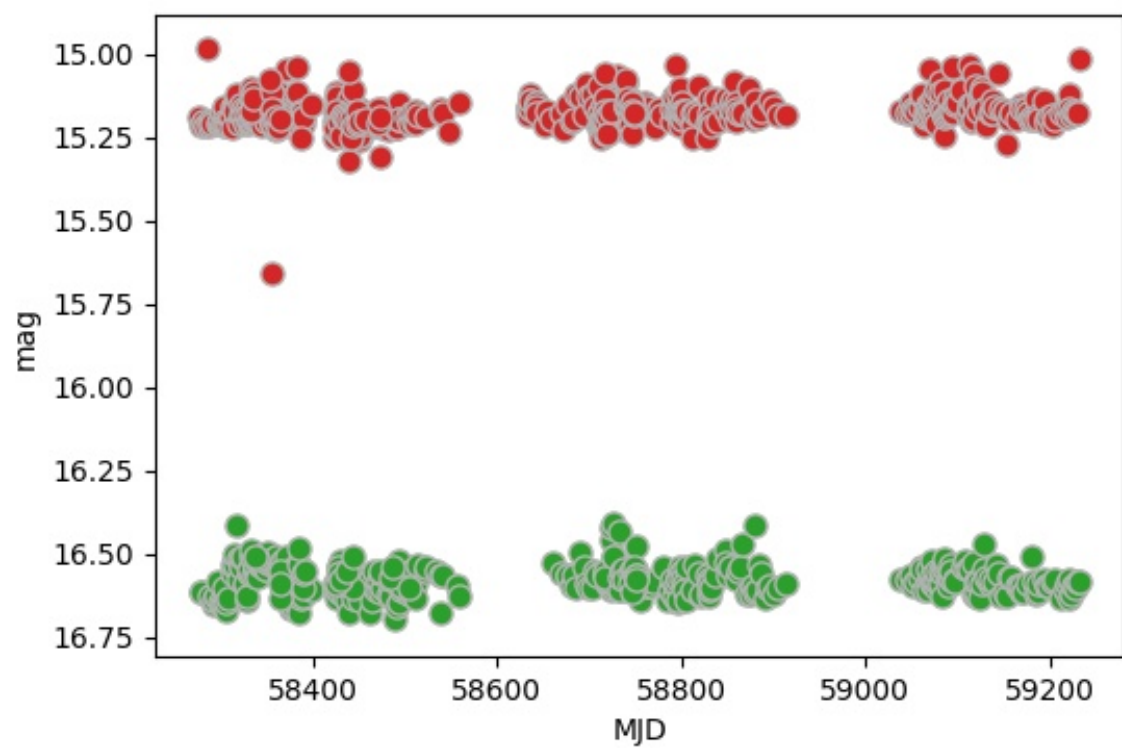


Рисунок 3.42 – Кривая блеска объекта 808105200015848 II класса идентифицированная нами как кандидата в VARYSO по индексам переменности

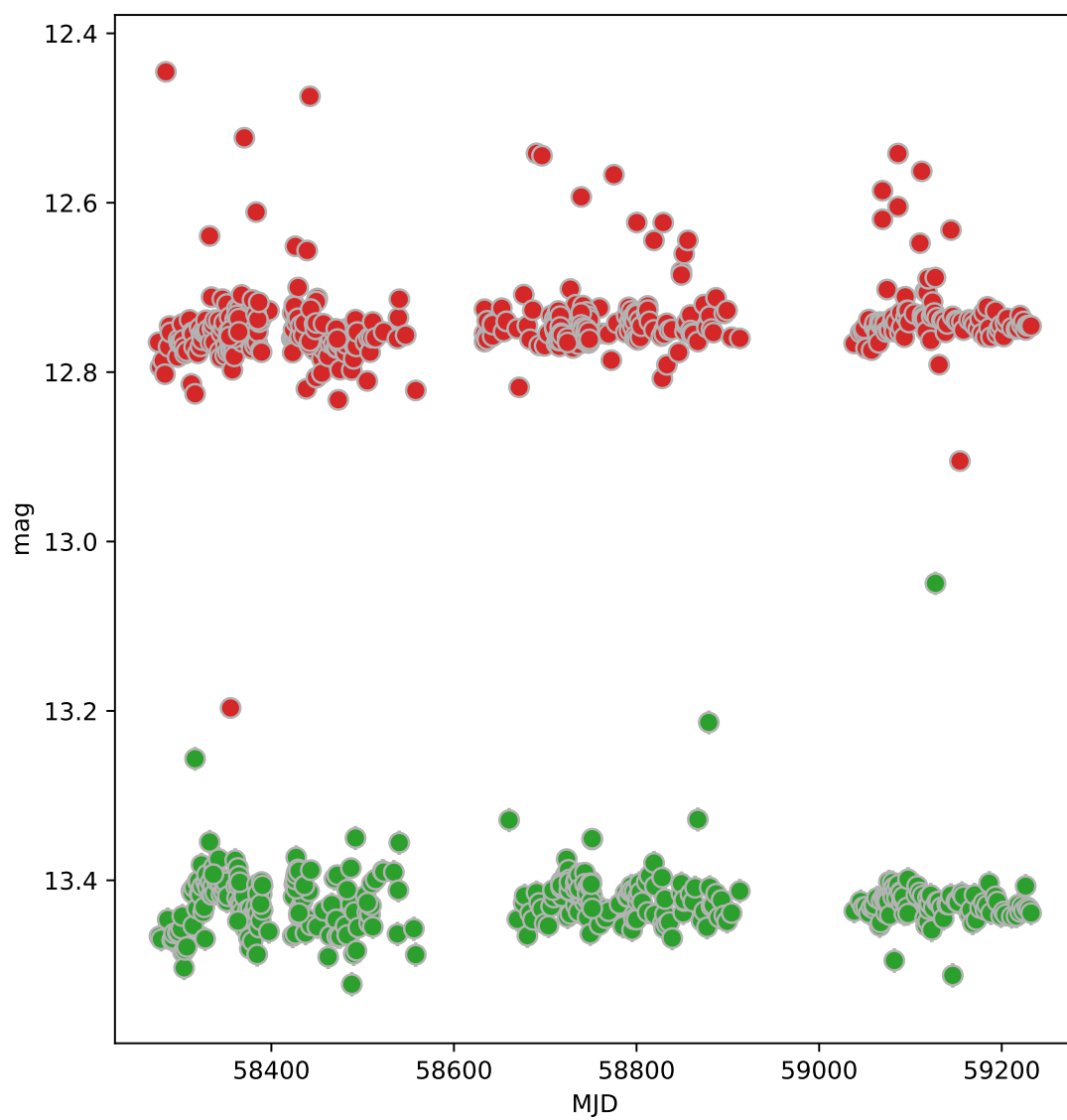


Рисунок 3.43 – Кривая блеска объекта 808105200014922 III класса идентифицированная нами как кандидата в VARYSO по индексам переменности

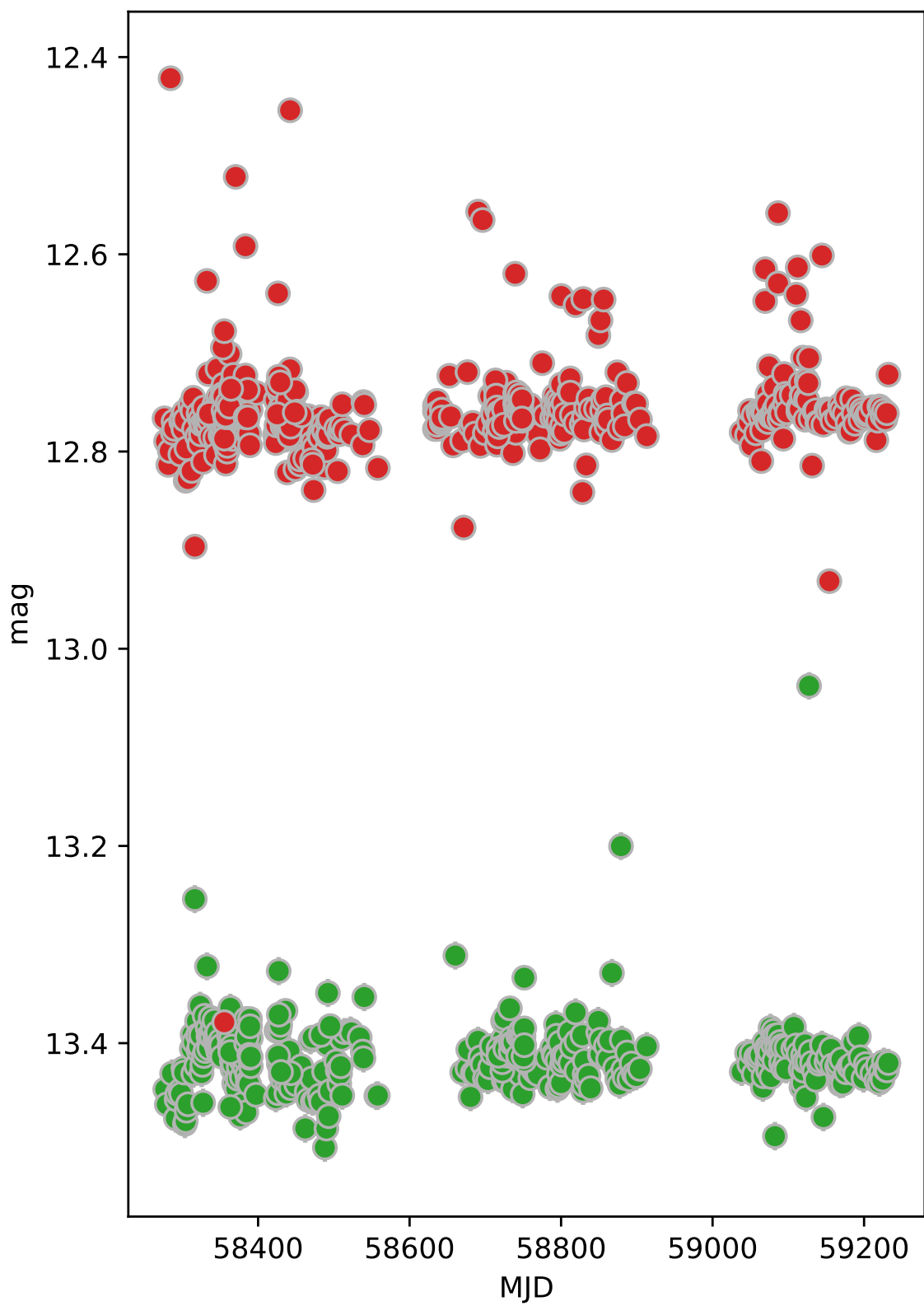


Рисунок 3.44 – Кривая блеска объекта 808105200014448 III класса
идентифицированная нами как кандидата в VARYSO по индексам переменности

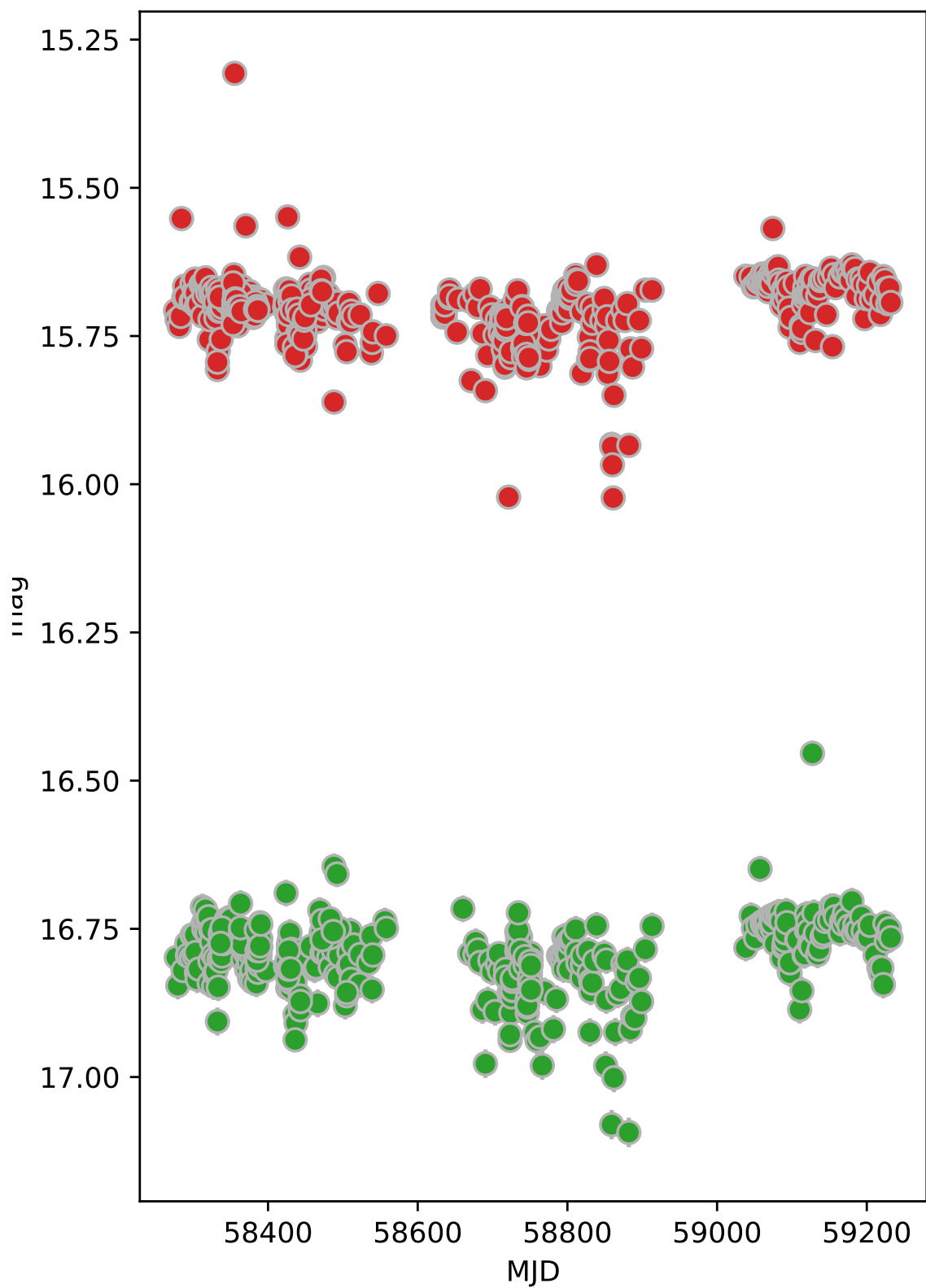


Рисунок 3.45 – Кривая блеска объекта 808105200001434 II класса
идентифицированная нами как кандидата в VARYSO по индексам переменности
82

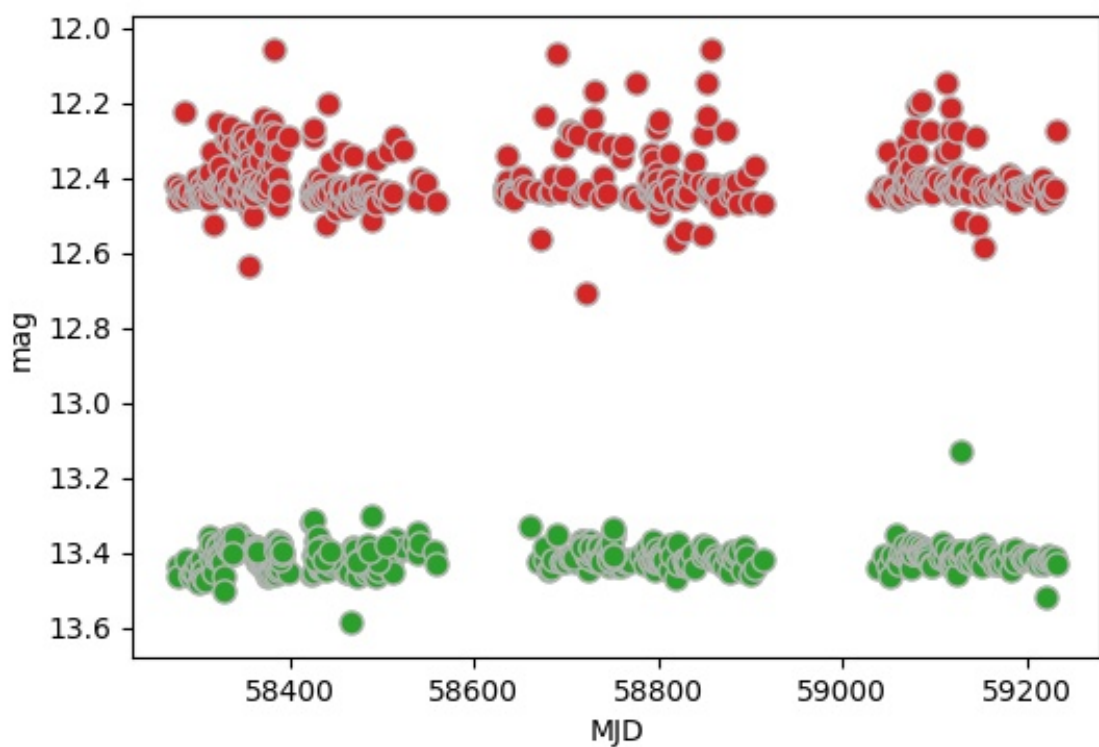


Рисунок 3.46 – Кривая блеска объекта 808105200003122 III класса идентифицированная нами как кандидата в VARYSO по индексам переменности

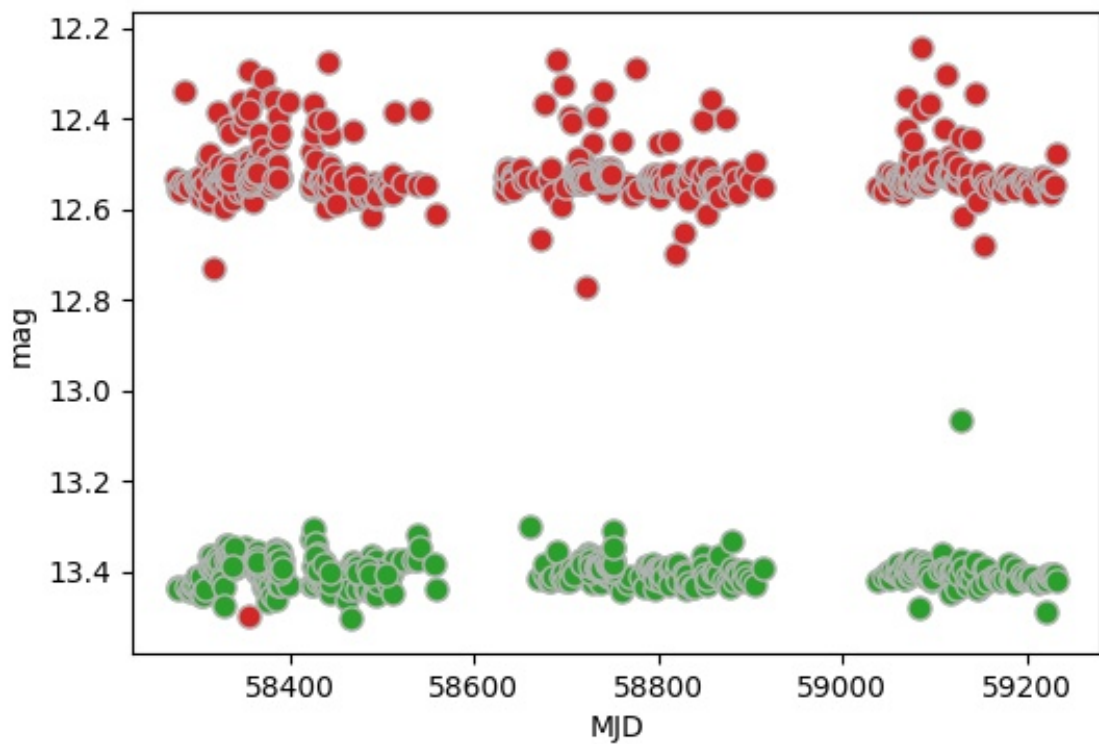


Рисунок 3.47 – Кривая блеска объекта 808105200007155 III класса идентифицированная нами как кандидата в VARYSO по индексам переменности

4 Результаты и их обсуждение

На рисунках 3.34, 3.35, 3.36, и 3.37 хорошо видно, что в области звезд ярче 12 mag и слабее 18 mag присутствует много ложноположительных кандидатов в VARYSO. Наличие ярких ложноположительных кандидатов мы связываем с тем, что эти звезды находятся за пределами диапазона линейного отклика приемника (CCD). Наличие слабых кандидатов объясняется превалированием случайного шума над переменностью для них.

Для индексов S_J , S_L , и I (см. рисунок 3.38), основанных на корреляции кривых блеска в двух фильтрах, описанный эффект менее выражен. Эти индексы более устойчивы к случайным ошибкам фотометрии, но все равно дают ложноположительных кандидатов в переменные звезды. Изменение критериев отбора по значениям индексов переменности, например, до 3σ , значительно снижает количество ложноположительных кандидатов, но вместе с ними теряются и малоамплитудные переменные.

Найденные нами кандидаты в VARYSO имеют низкие значения S_J , S_L , и I по сравнению с ранее известными переменными. Это указывает на то, что амплитуда изменения их блеска существенно меньше, чем у известных переменных. Такие кандидаты сложно обнаруживать при беглом визуальном осмотре кривых блеска, они слабо отличаются от случайного шума. Именно такие кандидаты с большой вероятностью могут являться малоамплитудными VARYSO.

Не все объекты, которые были классифицированы как кандидаты в VARYSO по индексам на основе разброса, таким как: $\sigma_{NXS,v}$, MAD , $ROMs$, σ_w , и χ^2 показывают реальную переменность. Мы связываем это с их большей чувствительностью к случайному шуму.

Индексы на основе корреляции : $lag1$ и η не эффективны при обнаружении VARYSO.

Все объекты, классифицированные как кандидаты в VARYSO, являются низкоамплитудными. Почти все кандидаты в VARYSO относятся к III классу по цветам AllWISE. Отметим что трудно найти корреляцию между классификацией YSOs, основанной на цветах AllWISE, и классификацией VARYSO, основанной на форме кривой блеска. Это связано с небольшим количеством классифицированных VARYSO.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы:

- Мы идентифицировали и классифицировали 653 YSO в IC 1805 по цветам AllWISE;
- Используя онлайн-инструмент SNAD ZTF, мы исключили звезды поля и сократили нашу выборку до 284 YSOs;
- Среди 284 YSOs мы обнаружили 16 VARYSO с помощью SNAD ZTF и визуального осмотра;
- Мы использовали множество индексов переменности, основанных на разбросе и корреляции, для обнаружения переменности YSOs;
- Индексы Стетсона более эффективны для поиска малоамплитудных VARYSO наблюдаемых в двух полосах ZTF. ZTF, который наблюдает в двух фильтрах квазисовременно, дает прекрасную возможность для поиска VARYSO в диапазоне от 13 до 18mag в помощью индексов Стетсона;
- Индексы на основе корреляции более эффективны при выборе переменных объектов, чем индексы на основе разброса;
- Мы обнаружили дополнительно 8 кандидатов в VARYSO с использованием индексов переменности Стетсона, основанных на корреляции кривых блеска в двух разных фильтрах;
- Кандидаты в VARYSO были классифицированы как CTTS с переменностью, вызванной затмением околозвездной среды;
- Не было обнаружено связи между классификацией YSOs на основе AllWISE и VARYSO как CTTS и WTTS из-за небольшого количества классифицированных VARYSO и ограниченной формы переменности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Lada Charles J.* Star formation: from OB associations to protostars. // Star Forming Regions / Ed. by Manuel Peimbert, Jun Jugaku. — 1987. — Vol. 115. — P. 1.
- 2 *Gutermuth R. A., Megeath S. T., Myers P. C. et al.* A Spitzer Survey of Young Stellar Clusters Within One Kiloparsec of the Sun: Cluster Core Extraction and Basic Structural Analysis // The Astrophysical Journal. — 2009. — Vol. 184, № 1. — P. 18–83. 0906.0201.
- 3 *Werner M. W., Roellig T. L., Low F. J. et al.* The Spitzer Space Telescope Mission // The Astrophysical Journal Supplement. — 2004. — Vol. 154, № 1. — P. 1–9. astro-ph/0406223.
- 4 *Kang Sung-Ju, Kerton C. R., Choi Minho, Kang Miju.* A Comparative Observational Study of YSO Classification in Four Small Star-forming H II Regions // The Astrophysical Journal. — 2017. — Vol. 845, № 1. — P. 21.
- 5 *Cutri R. M., et al.* VizieR Online Data Catalog: AllWISE Data Release (Cutri+ 2013) // VizieR Online Data Catalog. — 2014. — P. II/328.
- 6 *Appenzeller I., Mundt R.* T Tauri stars // Astronomy and Astrophysics Reviews. — 1989. — Vol. 1, № 3-4. — P. 291–334.
- 7 *Herbst W., Herbst D. K., Grossman E. J., Weinstein D.* Catalogue of UBVRI Photometry of T Tauri Stars and Analysis of the Causes of Their Variability // Astronomical Journal. — 1994. — Vol. 108. — P. 1906.
- 8 *Masci Frank J., Laher Russ R., Rusholme Ben et al.* The Zwicky Transient Facility: Data Processing, Products, and Archive // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2019. — Vol. 131, № 995. — P. 018003. 1902.01872.
- 9 *Bouvier J., Cabrit S., Fernandez M. et al.* COYOTES I : the photometric variability and rotational evolution of T Tauri stars. // Astronomy and Astrophysics. — 1993. — Vol. 272. — P. 176–206.
- 10 *Straižys V., Boyle R. P., Janusz R. et al.* The open cluster IC 1805 and its vicinity: investigation of stars in the Vilnius, IPHAS, 2MASS, and WISE systems // Astronomy and Astrophysics. — 2013. — Vol. 554. — P. A3.

- 11 *Lim Beomdu, Hong Jongsuk, Yun Hyeong-Sik et al.* The Origin of a Distributed Stellar Population in the Star-forming Region W4 // *Astrophysical Journal*. — 2020. — Vol. 899, № 2. — P. 121. 2006.15262.
- 12 *Panwar Neelam, Samal M. R., Pandey A. K. et al.* Low-mass young stellar population and star formation history of the cluster IC 1805 in the W4 H II region // *Monthly Notices of the RAS*. — 2017. — Vol. 468, № 3. — P. 2684–2698. 1703.03604.
- 13 *Bertout Claude.* T Tauri stars: wild as dust. // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1989. — Vol. 27. — P. 351–395.
- 14 *Shu Frank H., Adams Fred C., Lizano Susana.* Star formation in molecular clouds: observation and theory. // *Annual Review of Astron and Astrophy*. — 1987. — Vol. 25. — P. 23–81.
- 15 *Skrutskie M. F., Meyer Michael R., Whalen D., Hamilton C.* Near-Infrared Photometric Monitoring of Young Stellar Objects // *Astronomical Journal*. — 1996. — Vol. 112. — P. 2168.
- 16 *Herbig G. H.* The Properties and Problems of T Tauri Stars and Related Objects // *Advances in Astronomy and Astrophysics*. — 1962. — Vol. 1. — P. 47–103.
- 17 *Sokolovsky K. V., Gavras P., Karampelas A. et al.* Comparative performance of selected variability detection techniques in photometric time series data // *Monthly Notices of the RAS*. — 2017. — Vol. 464, № 1. — P. 274–292. 1609.01716.
- 18 *Günther H. M., Cody A. M., Covey K. R. et al.* YSOVAR: Mid-infrared Variability in the Star-forming Region Lynds 1688 // *Astronomical Journal*. — 2014. — Vol. 148, № 6. — P. 122. 1408.3063.
- 19 *Gaia bCollaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al.* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Vol. 616. — P. A1. 1804.09365.
- 20 *Rigault Mickael.* ztfquery, a python tool to access ZTF data. — 2018.
- 21 *Malanchev K. L., Pruzhinskaya M. V., Korolev V. S. et al.* Anomaly detection in the Zwicky Transient Facility DR3 // *Monthly Notices of the RAS*. — 2021. — Vol. 502, № 4. — P. 5147–5175. 2012.01419.
- 22 *Bailer-Jones C. A. L., Rybizki J., Fouesneau M. et al.* Estimating Distances from Parallaxes. V. Geometric and Photogeometric Distances to 1.47 Billion Stars in Gaia Early Data Release 3 // *Astronomical Journal*. — 2021. — Vol. 161, № 3. — P. 147. 2012.05220.

- 23 *Cutri R. M., Skrutskie M. F., van Dyk S. et al.* VizieR Online Data Catalog: 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (Cutri+ 2003) // VizieR Online Data Catalog. — 2003. — P. II/246.
- 24 *Watson C. L., Henden A. A., Price A.* The International Variable Star Index (VSX) // Society for Astronomical Sciences Annual Symposium. — 2006. — Vol. 25. — P. 47.
- 25 *Chen Xiaodian, Wang Shu, Deng Licai et al.* The Zwicky Transient Facility Catalog of Periodic Variable Stars // Astrophysical Journal, Supplement. — 2020. — Vol. 249, № 1. — P. 18. 2005.08662.
- 26 *Panwar Neelam, Chen W. P., Pandey A. K. et al.* Young stellar population of bright-rimmed clouds BRC 5, BRC 7 and BRC 39 // Monthly Notices of the RAS. — 2014. — Vol. 443, № 2. — P. 1614–1628. 1406.6116.
- 27 *Panwar Neelam, Samal Manash R., Pandey A. K. et al.* Understanding Formation of Young, Distributed Low-mass Stars and Clusters in the W4 Cloud Complex // Astronomical Journal. — 2019. — Vol. 157, № 3. — P. 112. 1901.00888.
- 28 *Laur Jaan, Kolka Indrek, Eenmäe Tõnis et al.* Variability survey of brightest stars in selected OB associations // Astronomy and Astrophysics. — 2017. — Vol. 598. — P. A108. 1611.02452.